INSTITUTO DEL FONDO NACIONAL DE LA VIVIENDA PAR LOS TRABAJADORES

I N F O N A V I T

“ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO EN LA ZONA NORTE Y SUR DE LA CUENCA DE EL BARREAL EN CIUDAD JUAREZ, CHIHUAHUA”

REPORTE

DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL EN LA ZONA NORTE Y SUR DE LA CUENCA EL BARREAL

INDICE

I. INTRODUCCIÓN 3
II. OBJETIVO 3
IV. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA HIDROLÓGICO 4
IV.1. Ubicación de la zona del proyecto 4
V. JUSTIFICACION 5
V.1. Descripción de la problemática 6
VI. RECOPILACION DE INFORMACION 13
VI.1. NORMATIVIDAD 13
VII. ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE LA INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA 14
VII.1. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN HIDROCLIMATOLÓGICA 14
VII.2. ANALISIS ESTADÍSTICO DE LA PRECIPITACIÓN 19
VII.3. DISTRIBUCIÓN DE LA LLUVIA EN EL TIEMPO PARA 24 HORAS 22
VIII. ACTIVIDADES REALIZADAS 25
IX. DIAGNOSTICO DE LOS ESCURRIMIENTOS EN CONDICIONES ACTUALES 26
IX.1. ZONA NORTE 26
IX.2. ZONA PONIENTE 30
X.2.1. Microcuenca Barreal Poniente 31
IX.2.2. Microcuenca Barreal Sur 32
IX.2.3. Microcuenca Barreal Sur-Oriente 33
IX.3. ZONA CENTRO 34
IX.4. ZONA SUR 35
X. FUNCION DE RIESGO PRELIMINAR DE ACUERDO A LAS CONDICIONES ACTUALES DE LA CUENCA 37
XI. CONCLUSIONES DE LA CUENCA EN CONDICIONES ACTUALES 41
XII. RECOMENDACIONES 44

I. INTRODUCCIÓN

En Ciudad Juárez, en el estado de Chihuahua, durante la temporada de lluvias se presentan situaciones de riesgo a causa de la intensidad con que se presenta la precipitación. El problema se genera aguas abajo de los principales arroyos y diques que desembocan hacia asentamientos urbanos, incrementando con esto los daños a la población y a la infraestructura urbana en general. Ante esta situación es imperativo llevar a cabo la actualización de los estudios hidrológicos requeridos para los diferentes periodos de retorno en las zonas con un marcado crecimiento urbano, de tal forma que podamos conocer a detalle las modificaciones que se han presentado en las cuencas, con el fin de diseñar las obras de control hidráulico requeridas para salvaguardar tanto la vida como de la propiedad en un ambiente de convivencia armónico y sustentable con el medio ambiente.

II. OBJETIVO

Emitir un instrumento ejecutivo a nivel de diagnostico que sintetice las condiciones hidrológicas actuales de la subcuenca El Barreal.

III. ALCANCES

Generar un documento que englobe la problemática general y condiciones de operación hidráulica actual de la subcuenca El Barreal ante eventos hidrometeorológicos.

IV. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA HIDROLÓGICO

IV.1. Ubicación de la zona del proyecto

El proyecto en cuestión se localiza en el municipio de Ciudad Juárez, Estado de Chihuahua, en la Región Hidrológica "**Bolsón del Hueco**", en la cuenca definida por el Plan Sectorial de Manejo de Agua Pluvial (PSMAP) Zona **VIII - El Barreal** al sur de la ciudad, tal como se puede ver en la Figura IV.1.1.

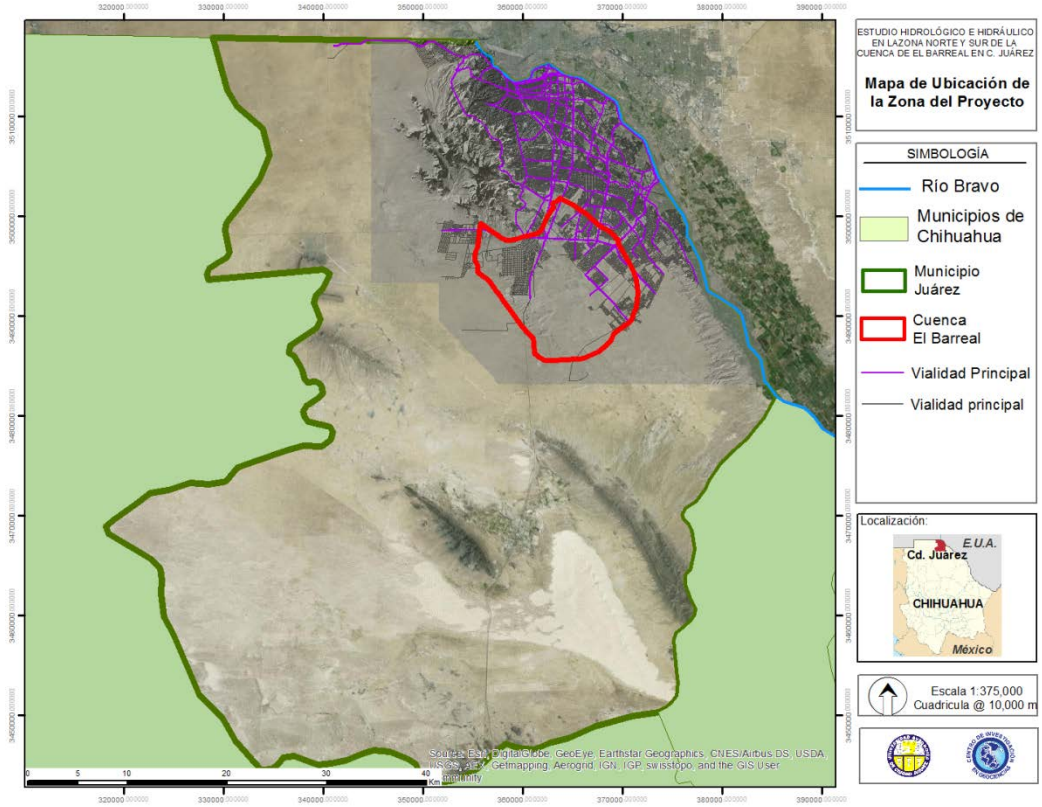


Figura IV.1.1. Localización general de la cuenca El Barreal en Cd. Juárez.

V. JUSTIFICACION

La cuenca hidrológica del Barreal es una cuenca endorreica donde todos los escurrimientos de tipo intermitente convergen en una zona baja definida como laguna de patos. En esta laguna se han reportado recientemente (2006 y 2008) inundaciones ante eventos de lluvia de hasta 25 años de periodo de retorno. Las inundaciones registradas en esta zona obedecieron al efecto combinado de un tren de lluvias con periodo de retorno de 25 años y falla de estructuras aguas arriba tales como la ruptura de la Presa Santa Elena I, la falta de capacidad de los diques Charly y Santa Elena II, la carencia de una última barrera de blindaje hidráulico de la zona ya desarrollada, además de la colmatación de estructuras de infiltración en algunos de los vasos de contención de cada desarrollo o fraccionamiento localizados en la zona lagunar.

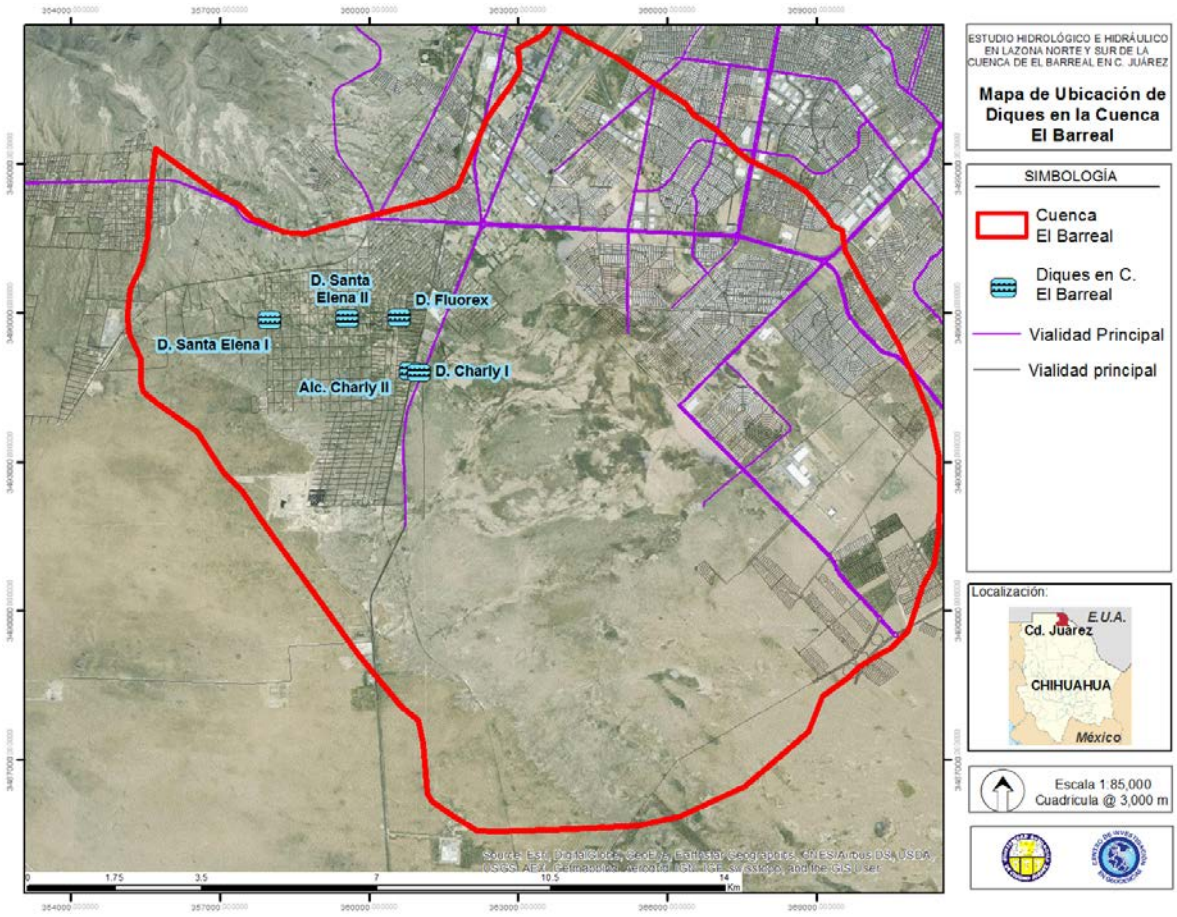


Figura V.1. Localización general de la cuenca El Barreal en Cd. Juárez.

V.1. Descripción de la problemática

Los constantes embates de los fenómenos hidrometeorológicos extremos, tales como lluvias extraordinarias en los últimos años han ocasionado pérdidas humanas y materiales cuantiosas, así como daños a la infraestructura urbana de la ciudad.

El Barreal es una cuenca cerrada que drena la zona sureste de la Sierra de Juárez (Figura V.1.1). El centro de la cuenca está ocupado por una llanura plana con una superficie de 2,3 km^2. Existen 50 m de diferencia en elevación topográfica entre el punto más bajo en el centro de la cuenca y el punto más alto en la parte noroccidental de la cuenca más cercana a la Sierra de Juárez (Figura V.1.2), así como 15 m y 4 m de desnivel, respectivamente, a las terrazas occidental y oriental mas cercanas desde el centro de la cuenca o zona lagunar (Figura V.1.3). Los sedimentos acumulados en lo alto de la cuenca se definen por un tamaño de grano más grueso como arenas, mientras que van disminuyendo en tamaño de limos y arcillas hacia el centro de la cuenca.

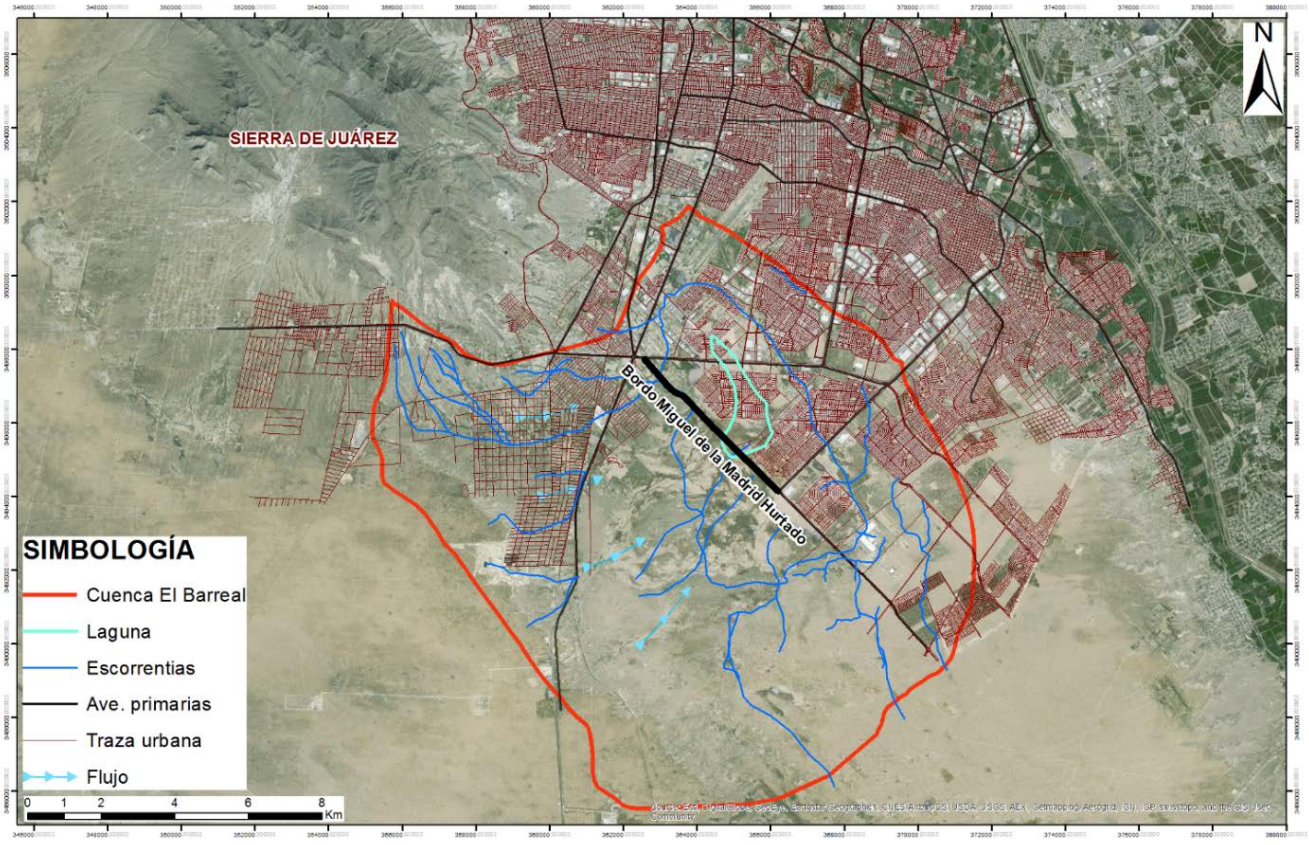


Figura V.1.1.. Localización y escurrimientos de la Cuenca Barreal y la subcuenca MMH-TC-BI.

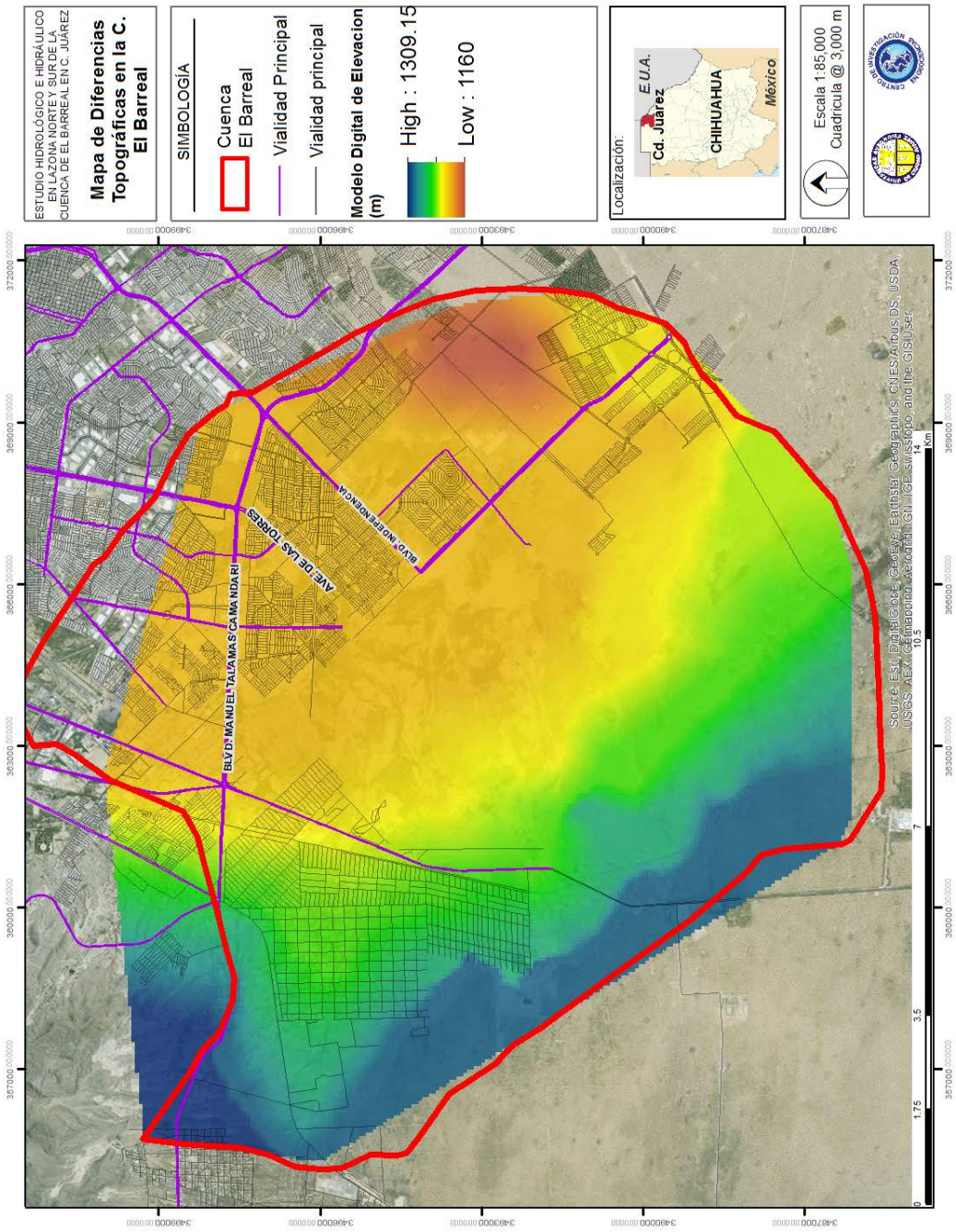


Figura V.1.2. Diferencia de elevación entre las vertientes y centro de la subcuenca Barreal.

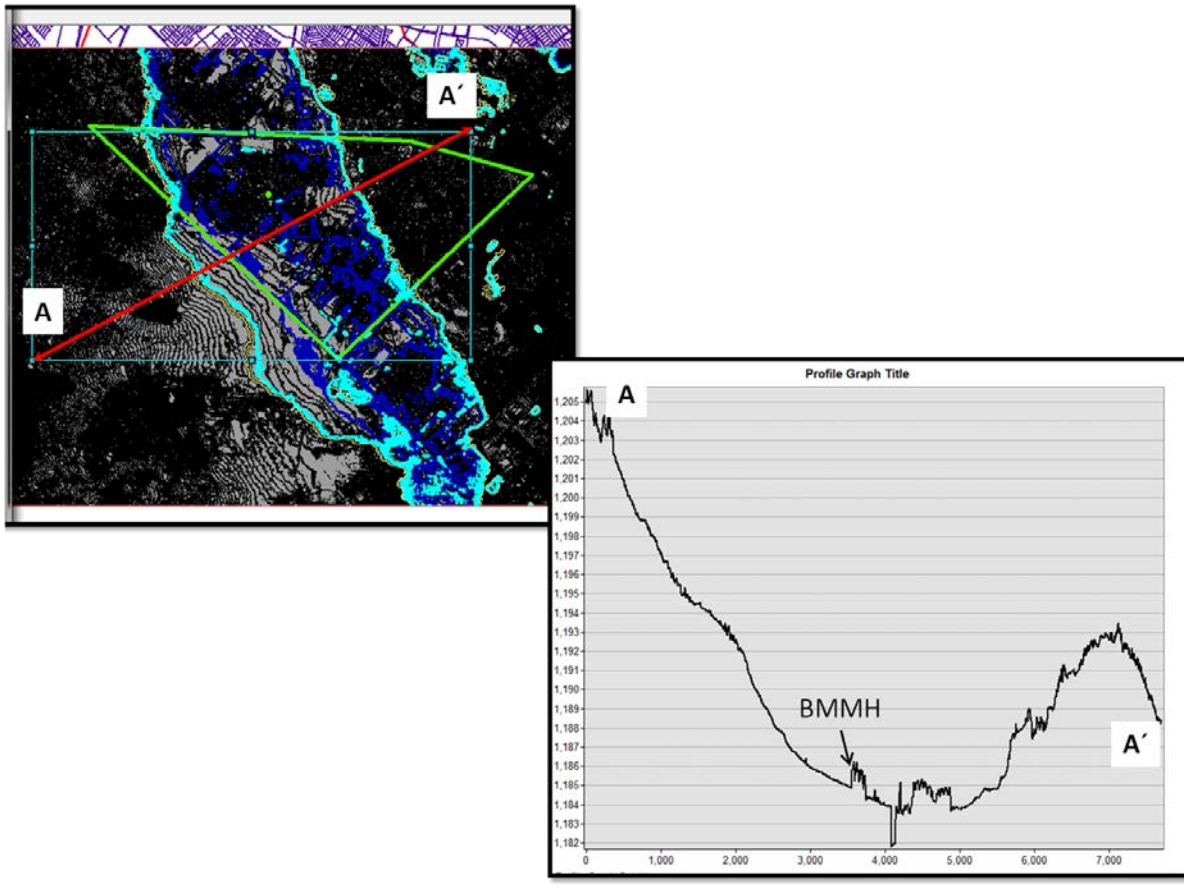


Figura V.1.3. Diferencia de elevación entre las terrazas y centro de la subcuenca Barreal. En verde se muestra el triangulo conformado por las vialidades Miguel de la Madrid, Boulevard Independencia y Talamas Camandari como referencia.

La cuenca de El Barreal cubre aproximadamente 164.114 km^2 (IMIP, 2004b), obteniéndose un volumen aproximado de 1,318.37 m^3 (IMIP, 2004), para una precipitación media anual de 300 mm (ACCV, 2007) esto con datos muy antiguos (sin datos LiDAR) sin tomar en cuenta los modelos digitales de elevación más actuales, los bordos existentes, y respecto de solo dos estaciones hidrometeorológicos, por lo que es necesario una actualización al estudio. Dicha masa relativamente grande de agua es transportada por varias corrientes o arroyos intermitentes de primer y segundo orden que drenan el

agua a un área más baja definido por la curva de nivel de elevación 1,160 m, lo que define el límite histórico de la Laguna de los Patos (El Barreal) (IMIP, 2004b). Sin embargo, se espera un área de inundación de hasta 6 km^2 si no se contiene o no existen instalaciones hidráulicas para contener la escorrentía (IMIP, 2004b).

Actualmente, la antigua zona lagunar, o parte más baja de este sistema endorreico, está protegida por un bordo con capacidad de contención de eventos hidrometeorológicos extremos de periodo de retorno de 100 años con bordo libre a 500 años. Esta zona está definida por el polígono (casi un triángulo) delimitado por la vialidad Miguel de la Madrid Hurtado (MMH) al oeste que constituye el bordo en sí, por la vialidad Manuel Talamas Camandari (TC) al norte, y por el Boulevard Independencia (BI) al Este (Figura V.1.4).

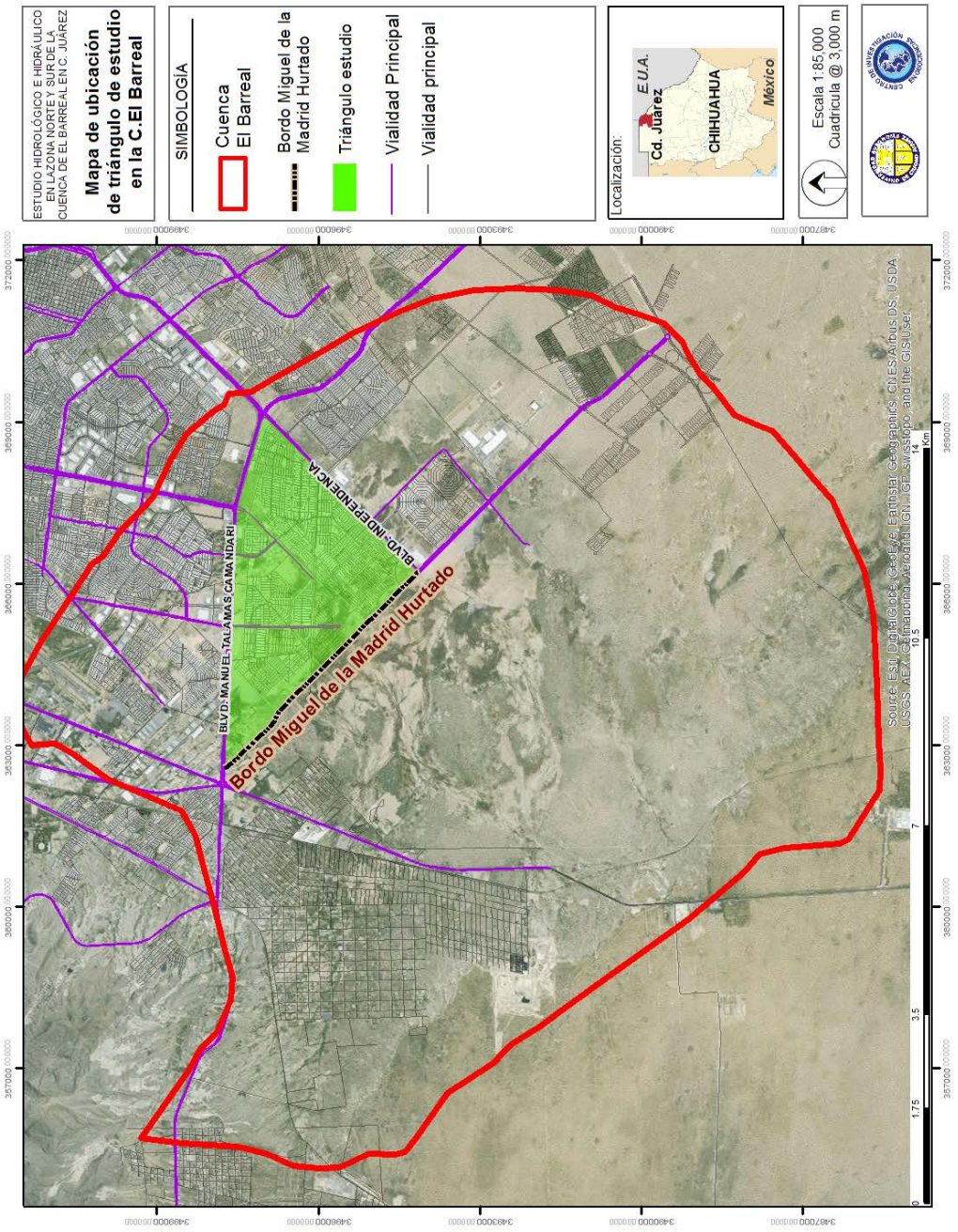


Figura V.1.4. Diferencia de elevación entre las vertientes y centro de la subcuenca Barreal.

La problemática hidrológica de los desarrollos dentro del Triángulo MMH-TC-BI es compleja y requiere no solo el remontarse a la propuesta original del

Plan Sectorial de Manejo de Aguas Pluviales sino a la propia Constitución de los Estados Unidos Mexicanos que en su artículo 27 establece que solo serán aguas nacionales aquellas que desemboquen a ríos que desemboquen al mar o bien lagunas que desemboquen a conducciones que eventualmente desemboquen al océano. Este artículo automáticamente excluye a la zona lagunar del barreal de la categoría de aguas nacionales pues su drenaje es de tipo endorreico, correspondiendo entonces **a la autoridad local el regular su desarrollo**.

A este respecto, el PSMAP, establece que la cuenca El Barreal requiere de diques de regulación aguas arriba en las cuencas Norte y Poniente a fin de garantizar el flujo de escurrimientos regulados a la zona lagunar, además, este plan propone que cada desarrollo urbano se "blinde" hidrológicamente mediante estrategias de manejo pluvial que le permita a cada desarrollo o fraccionamiento el captar, conducir e infiltrar, en un plazo no mayor a 72 horas, los escurrimientos por cuenca propia de aportación, siendo obligatoria que las obras de captación e infiltración almacenen volúmenes correspondientes a eventos ordinarios asociados con lluvias de periodo de retorno a 25 años. En cuanto a la capacidad de desalojo pluvial de las vialidades, estas deberán ser capaces de manejar y conducir hasta eventos con periodo de retorno de 100 años.

Bajo las condiciones mencionadas, el desarrollo urbano en la subcuenca Triangulo MMH-TC-BI debe estar en primer lugar protegido de los volúmenes que escurren de la parte norponiente de la cuenca. Esta protección está garantizada con la presencia del Bordo Miguel de la Madrid Hurtado cuyas dimensiones actuales soportan lluvias de 100 años de periodo de retorno con bordo libre a 500 años. En cuanto, a los escurrimientos por cuenca propia, cada microcuenca deberá contener sus volúmenes, conducirlos a vasos de

captación de capacidad suficiente para eventos de 25 años e infiltrarlos al acuífero, de manera que el vaso este operativo al cabo de 72 horas.

VI. RECOPILACION DE INFORMACION

1. Revisión del "**Estudio, estrategias y propuestas para el control y manejo de agua pluvial en las zonas sur y oriente de Ciudad Juárez, Chih.",** elaborado en 2009 por el Gobierno del Estado de Chihuahua, y en el que se diseña la estrategia general, a nivel conceptual del manejo hidrológico de la Cuenca El Barreal.
2. Revisión del **"Análisis de las obras de mitigación ante inundaciones en la cuenca El Barreal, Ciudad Juárez, Chihuahua"**, elaborado en mayo del 2016 por el CENAPRED.
3. Revisión del **"Estudio hidrológico y simulación hidráulica del Bordo Miguel de la Madrid Hurtado"**, elaborado en agosto del 2016, por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
4. Revisión del **"Estudio hidrológico de la subcuenca del triángulo MMH-TC-BI en la cuenca El Barreal"**, elaborado en abril del 2017, por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

VI.1. NORMATIVIDAD

Al ser El Barreal una cuenca de tipo cerrado o endorreico, sin drenaje a ninguna corriente que desemboque al mar, los escurrimientos y cuerpos de agua de esta cuenca no se consideran como aguas nacionales conforme a la definición de este concepto en el artículo 27 de la Constitución de los Estados

Unidos Mexicanos, por lo que el manejo y regulación de este sistema hídrico no se somete a la ley de Aguas Nacionales ni a la jurisdicción de la Comisión Nacional del Agua.

Es entonces la autoridad local quien define la estrategia de manejo de escurrimientos en esta zona. Los instrumentos de ordenamiento territorial en cuanto a escurrimientos disponibles al momento son el *Plan Sectorial de Manejo de Aguas Pluviales* publicado por el IMIP en el 2004 y el *Estudio, Estrategias y Propuestas para el Control y Manejo de agua Pluvial en las zonas Sur y Oriente de Ciudad Juárez, Chih*., publicado por el Gobierno del Estado de Chihuahua en el 2009.

VII. ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE LA INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA

El régimen pluviométrico e hidrométrico se determinó en base al análisis de los registros históricos de precipitación y escurrimiento normal. El análisis pluviométrico e hidrométrico permitió establecer el modelo lluvia-escurrimiento prevaleciente en la zona de estudio en base a los datos climatológicos disponibles.

La información requerida para generar la lluvia de diseño a ser empleada en el estudio hidrológico consistió en recabar la mayor información pluviométrica disponible para la zona de estudio.

VII.1. RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN HIDROCLIMATOLÓGICA

En este análisis se incluye el cálculo de los gastos y volúmenes esperados para tormentas de 24 horas en base a los cuales se dimensionan los vasos

reguladores proponiendo su rehabilitación o de ser necesario, la construcción de nuevas estructuras de control de avenidas.

De acuerdo a las recomendaciones de los manuales del modelo de simulación hidrológica HEC-HMS, para grandes ciudades es recomendable diseñar las estructuras pluviales para tormentas cuya duración sea de un día o 24 horas. Además la Comisión Nacional del Agua establece que para localidades cuya población sea mayor de 1 millón de habitantes se obtengan los gastos máximos y volúmenes para un periodo de retorno de 100 a 500 años.

Para Ciudad Juárez, se ha establecido el criterio de utilizar tormentas de 24 horas y periodo de retorno de 100 años considerando que con el bordo libre puede ser desalojado el gasto máximo para un periodo de retorno de 500 años. Dichos criterios se encuentran aprobados en el Plan Sectorial de Manejo de Agua Pluvial (PSMAP) para Ciudad Juárez el cual ha sido aprobado por la CONAGUA (IMIP, 2004).

Para este análisis, se recopiló la información disponible de precipitación para un día, encontrando que históricamente se han tomado datos en diferentes estaciones climatológicas. De estos datos, se han tomado los máximos registrados para cada año, resultando lo que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla I. Registro de datos pluviales anuales.

AÑO	CILA	CD. JUÁREZ	CNA	CHAMIZAL Lat. 34°45' Long. 106°27'	EL PASO Lat. 31°49'43" Long. 106°26'56"'	ACEQUIA MADRE	CILA NORTE	IIT/UACJ Lat. 31°44'36" Long. 106°25'54"'	MONTADA Lat. 31°43'30" Long. 106'25'54"	ADOPTADO
1969	22.80			19.50						22.80
1970	36.20			36.20						36.20
1971	55.50			55.50						55.50
1972	38.20			38.20	41.90					41.90

1973	80.20			80.20	45.00					80.20
1974	52.70			52.70	42.40					52.70
1975	63.00			63.00	62.00					63.00
1976	28.10			28.10	51.10					51.10
1977	28.70			28.70						28.70
1978	62.50			62.50	39.10					62.50
1979	26.50			26.50						26.50
1980	31.90			31.90	33.00					33.00
1981	30.90	24.00		30.90	46.50					46.50
1982	53.90	51.00		53.90	56.10					56.10
1983	38.70	23.00		30.00	24.90					38.70
1984	31.20	50.00		38.70	58.40					58.40
1985	30.50	25.70		32.20	26.90					32.20
1986	30.00	24.00		30.50	39.60					39.60
1987	28.30	70.50		33.50	44.70					70.50
1988	28.30	35.60		28.30	32.50					35.60
1989	23.00	24.30		23.00	37.30					37.30
1990	29.40	34.90		29.40	62.00					62.00
1991		40.00								40.00
1992		44.00								44.00
1993		27.40								27.40
1994										0.00
1995					21.34					21.34
1996			24.00		26.42					26.42
1997			19.00		22.86					22.86
1998			16.00		12.70					16.00
1999			22.00		22.35					22.35
2000			50.00		34.54	35.00	66.80	17.30		66.80
2001			19.00		15.24	80.00		5.00		80.00
2002			18.50		13.71			26.60	19.40	26.60
2003			25.00		15.14			28.30	26.20	28.30
2004			28.00		34.79			32.00	74.00	74.00
2005			32.00		57.40			35.20	64.00	64.00
2006			59.00		72.13			46.20	91.70	91.70
2007			36.00		33.00			25.50	23.80	36.00
2008			40.00		44.90			45.00	34.80	45.00

Todas estas estaciones meteorológicas están localizadas dentro de la zona urbana Cd. Juárez (Figura VII.1.1(puntos rojos)) y El Paso, Texas, EE.UU. Se observa que las tormentas son muy variables en su intensidad de un sitio a otro ((Figura VII.1.1(reflectividad doppler)), características principales de las lluvias en estas latitudes.

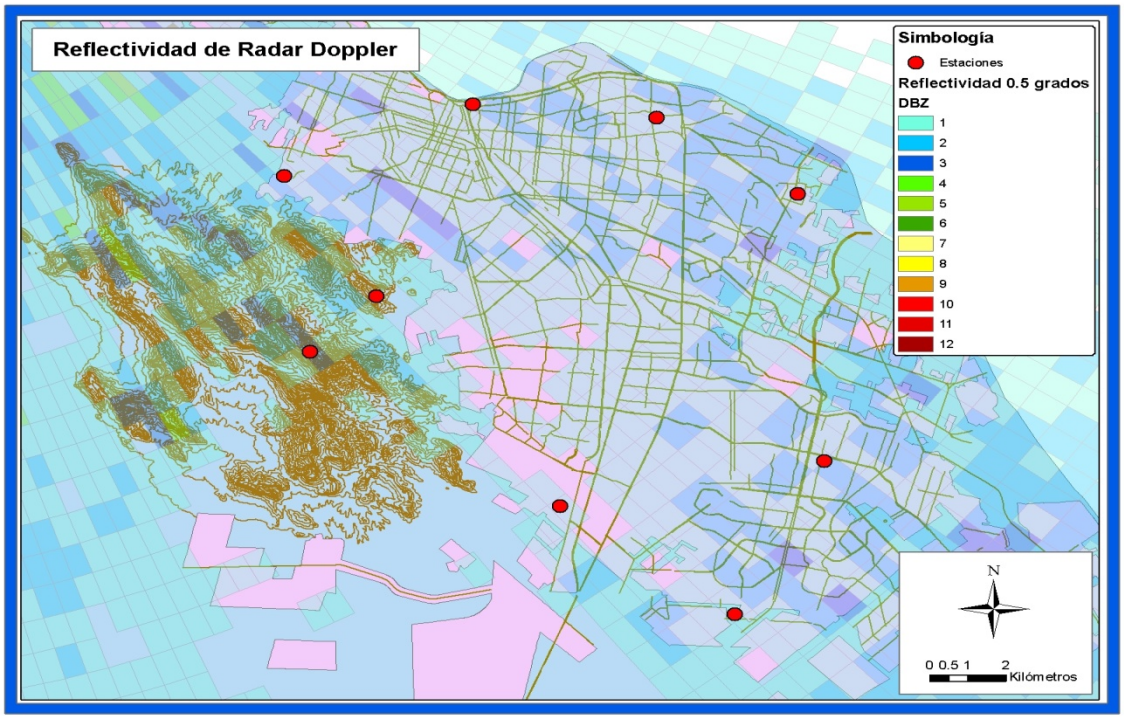


Figura VII.1.1. Localización de estaciones de lluvia y reflectividad Doppler (Laboratorio de Climatología y Calidad del Aire, UACJ).

La columna de lluvia adoptada, recoge la máxima precipitación registrada por todas las estaciones en el área, considerándola como la más crítica de la zona de estudio, y la que traería por consecuencia el mayor gasto y volumen escurrido, considerando como válido que la precipitación máxima se puede presentar en cualquier parte de la ciudad. Se observa que en el año 1994 no

se cuenta con información, por lo cual queda eliminado como parte del análisis. Con el criterio anterior, para el análisis estadístico se adopta la siguiente información:

Tabla II. Precipitación máxima anual.

AÑO	PRECIPITACIÓN MAX. EN 24 HRS (MM)
1969	22.80
1970	36.20
1971	55.50
1972	41.90
1973	80.20
1974	52.70
1975	63.00
1976	51.10
1977	28.70
1978	62.50
1979	26.50
1980	33.00
1981	46.50
1982	56.10
1983	38.70
1984	58.40
1985	32.20
1986	39.60
1987	70.50
1988	35.60
1989	37.30
1990	62.00
1991	40.00

1992	44.00
1993	27.40
1995	21.34
1996	26.42
1997	22.86
1998	16.00
1999	22.35
2000	66.80
2001	80.00
2002	26.60
2003	28.30
2004	74.00
2005	64.00
2006	91.70
2007	36.00
2008	45.00

VII.2. ANALISIS ESTADÍSTICO DE LA PRECIPITACIÓN

Se asoció la lluvia máxima en 24 horas a varios periodos de retorno, utilizando la distribución normal, Log Normal y Gumbel, los resultados fueron comparados con los datos de precipitación calculados en el Plan Sectorial en donde el periodo de retorno es 15 años menor al que aquí se desarrolla.

En la Tabla III se muestran los valores del PSMAP, los resultados del análisis por los métodos señalados y las diferencias encontradas respecto al primero. En los resultados del análisis estadístico (Figura VII.2.1) se observa que la distribución normal se desplaza significativamente de los datos obtenidos en el PSMAP, y por los cálculos de los métodos Log-normal y Gumbel, por lo que este método se descarta.

Los métodos Log-Normal y Gumbel muestran que las precipitaciones obtenidas para diferentes periodos de retorno se incrementan en un promedio de 5%, principalmente por el efecto de las intensas tormentas registradas en los años 2004, 2005 y 2006. Los incrementos en los datos de precipitación se observan principalmente para los periodos de retorno de 5 a 50 años quedando el resto con diferencias mínimas en relación a los valores del PSMAP.

Tabla III. Distribución de las precipitaciones por TR.

TR	Plan Sectorial	Distr. Normal	Diferencia en %	Distr. Log Normal	Diferencia en %	Gumbel	Diferencia en %
2	41.3	45.22	109.49%	41.37	100.17%	42.30	102.42%
5	54.0	61.32	113.56%	59.28	109.78%	61.79	114.43%
10	66.8	69.73	104.39%	71.56	107.13%	74.69	111.81%
20		76.68		83.48		87.05	
25	84.0	78.7	93.69%	87.51	104.18%	91.00	108.33%
50	96.8	84.5	87.29%	99.49	102.78%	103.10	106.51%
100	110.0	89.7	81.55%	112.17	101.97%	115.10	104.64%
200		94.5		123.25		127.00	
500	140.0	100.27	71.62%	142.56	101.83%	143.00	102.14%
1000	153.0	104.32	68.18%	154.63	101.07%	155.00	101.31%
10000	196.0	116.35	59.36%	218.72	111.59%	191.00	97.45%
			87.68%		104.50%		105.45%

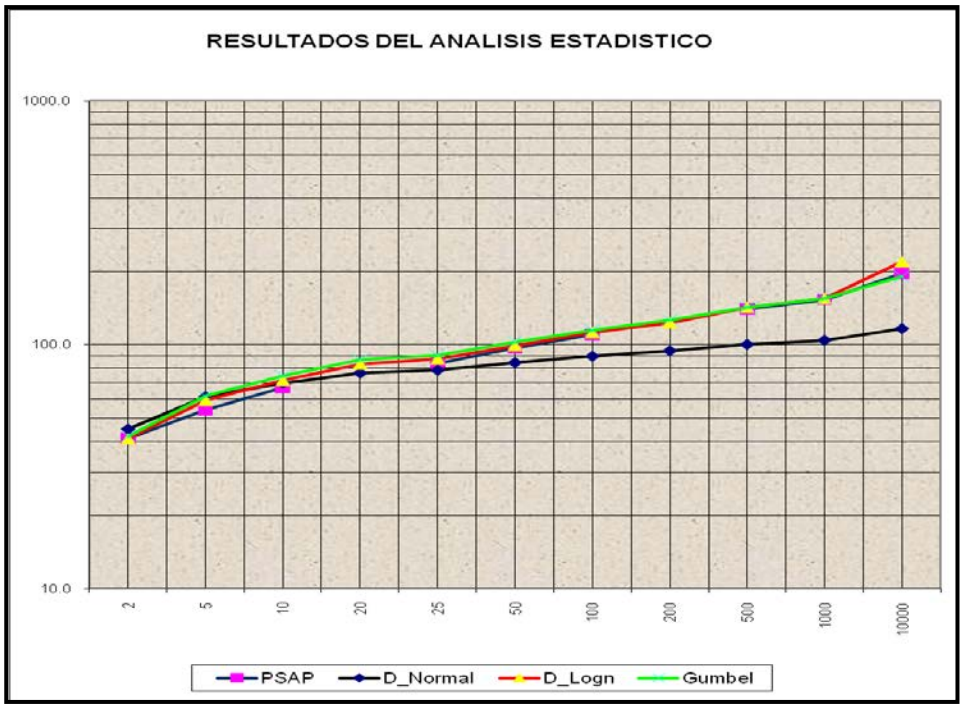


Figura VII.2.1. Resultados del análisis estadístico.

Por lo anterior, se propone que los próximos estudios hidrológicos tomen como base los datos de precipitación obtenidos por el método Log-normal con los siguientes valores:

Tabla IV. Distribución de la precipitación en Log-Normal.

TR	PRECIPITACIÓN (mm)
2	41.37
5	59.28
10	71.56
20	83.48
25	87.51
50	99.49
100	112.17
200	123.25
500	142.56

1000	154.63
10000	218.72

VII.3. DISTRIBUCIÓN DE LA LLUVIA EN EL TIEMPO PARA 24 HORAS

La distribución de la lluvia durante una tormenta de 24 horas, utilizada en el PSMAP se muestra en la siguiente tabla:

Tabla V. Periodos de retorno para una lluvia de 24 horas.

HORA	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)								
	2	5	10	25	50	100	500	1000	10000
5 minutos	8.30	10.90	12.80	15.30	17.30	20.05	24.40	26.70	34.20
15 minutos	16.50	21.60	25.40	30.40	34.40	39.86	48.50	53.00	67.90
1 hora	20.70	27.00	33.40	42.00	48.40	56.09	70.00	76.50	98.10
2 horas	24.00	31.40	38.90	48.90	56.29	65.23	81.40	88.90	114.10
3 horas	26.20	34.30	42.50	53.40	61.49	71.25	88.90	97.20	124.70
6 horas	30.50	39.90	49.40	62.10	71.52	82.88	103.50	113.10	145.00
12 horas	35.50	46.40	57.40	72.20	83.18	96.39	120.30	131.50	168.70
24 horas	41.30	54.00	66.80	84.00	96.80	112.17	140.00	153.00	196.20
% PARA 1 HR	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%

Para revisar la distribución a esta fecha, es necesario contar con información histórica de la precipitación máxima, en una hora similar a la que se utilizó para el análisis correspondiente a 24 horas. Actualmente no se cuenta con esta información, por lo cual se propone que se continúe con el criterio establecido originalmente en PSMAP, es decir tomar los datos anteriores ajustándolo únicamente para los nuevos valores resultantes de la actualización presentada previamente para 24 horas.

La distribución aproximada utilizada en el Plan Sectorial y adoptada para este caso es la siguiente:

Tabla VI. Porcentaje de precipitación por tiempo.

HORA	% DE PRECIPITACIÓN
5 minutos	20%
15 minutos	40%
1 hora	50%
2 horas	58%
3 horas	63%
6 horas	74%
12 horas	86%
24 horas	100%

Con lo anterior, la distribución de la precipitación de la lluvia para 24 horas, propuesta para los estudios hidrológicos es la siguiente:

Tabla VII. Distribución pluvial para una lluvia de 24 horas.

HORA	PERIODO DE RETORNO EN AÑOS										
	2	5	10	20	25	50	100	200	500	1000	10000
5 minutos	8.27	11.86	14.31	16.70	17.50	19.90	22.43	24.65	28.51	30.93	43.74
15 minutos	16.55	23.71	28.62	33.39	35.00	39.80	44.87	49.30	57.02	61.85	87.49
1 hora	20.69	29.64	35.78	41.74	43.76	49.75	56.09	61.63	71.28	77.32	109.36
2 horas	23.99	34.38	41.50	48.42	50.76	57.70	65.06	71.49	82.68	89.69	126.86
3 horas	26.06	37.35	45.08	52.59	55.13	62.68	70.67	77.65	89.81	97.42	137.79
6 horas	30.61	43.87	52.95	61.78	64.76	73.62	83.01	91.21	105.49	114.43	161.85
12 horas	35.58	50.98	61.54	71.79	75.26	85.56	96.47	106.00	122.60	132.98	188.10
24 horas	41.37	59.28	71.56	83.48	87.51	99.49	112.17	123.25	142.56	154.63	218.72

Lo conveniente es analizar información de precipitación máxima para una hora registrada en estaciones climatológicas de la región. Es probable contar con este tipo de datos en registros climatológicos en zonas similares a Cd. Juárez como puede ser la Cd. de Chihuahua o ciudades de Nuevo México y Texas en E.U.A.

De contar con esta información por un periodo similar al de los registros de 24 horas, entonces será posible llevar a cabo el análisis estadístico completo que puede ser aplicado a los modelos hidrológicos.

VIII. ACTIVIDADES REALIZADAS

Se realizó un análisis y diagnóstico de microcuencas y escurrimientos generados a través de Modelos Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) apoyados con topografía de gran precisión obtenida con la tecnología LIDAR (Laser Imaging Detection And Range). Esta tecnología maneja 'nubes de puntos' con una densidad de hasta 12 puntos a través de los cuales se calcula la elevación mediante el análisis de los tiempos dobles de retorno del pulso EM emitido por la aeronave y reflejado por el terreno, las diferencias en tiempo de viaje de la onda EM son proporcionales a la elevación del terreno. Posteriormente la señal es filtrada mediante el paquete computacional MARS (Merrick's Advanced Remote Sensing) para clasificar los arribos del pulso como Terreno Natural, vegetación o superestructuras tales como construcciones o cableado eléctrico. Como resultado se generan coberturas a nivel de terreno en curvas de nivel de hasta 50 cm y modelos de elevación de terreno con tamaños de píxel de 1 m, aproximadamente. Estos datos topográficos de alta precisión identifican hasta las depresiones mínimas en el terreno generando los modelos con gran apego a la realidad por su alta precisión. A través de la capa base de topografía a nivel de terreno, se obtienen los datos requeridos para la realización del análisis hidrológico, tales como: como definición de subcuencas y/o microcuencas, escurrimientos, pendientes, longitud máxima de cauces, tiempos de retardo, tiempos de concentración, definición de los cauces principales y tiempo de respuesta para alimentar el Sistema del Modelo Hidrológico (HMS, por sus siglas en ingles).

IX. DIAGNOSTICO DE LOS ESCURRIMIENTOS EN CONDICIONES ACTUALES

IX.1. ZONA NORTE

A la fecha, la única información disponible de la capacidad de respuesta hidrológica de la cuenca norte Barreal, ubicada al norte de la zona lagunar, corresponde a los resultados de la simulación hidráulica disponible en el Atlas de Riesgo 2016 (Figura IX.1.1). Esta modelación, generada para un periodo de retorno de 100 años, muestra que en la microcuenca Barreal norte se registran tirantes desde los 0.65 m hasta más de 1 m de altura en los puntos más críticos.

Respecto del modelado, es importante recalcar que estos modelos son con un mallado correspondiente a un tamaño de celda de 10 m x 10 m, lo que implica que estos modelos adolecen de falta de resolución espacial para localizar de manera precisa, es decir, a nivel de calle, que casas están situación de vulnerabilidad alta.

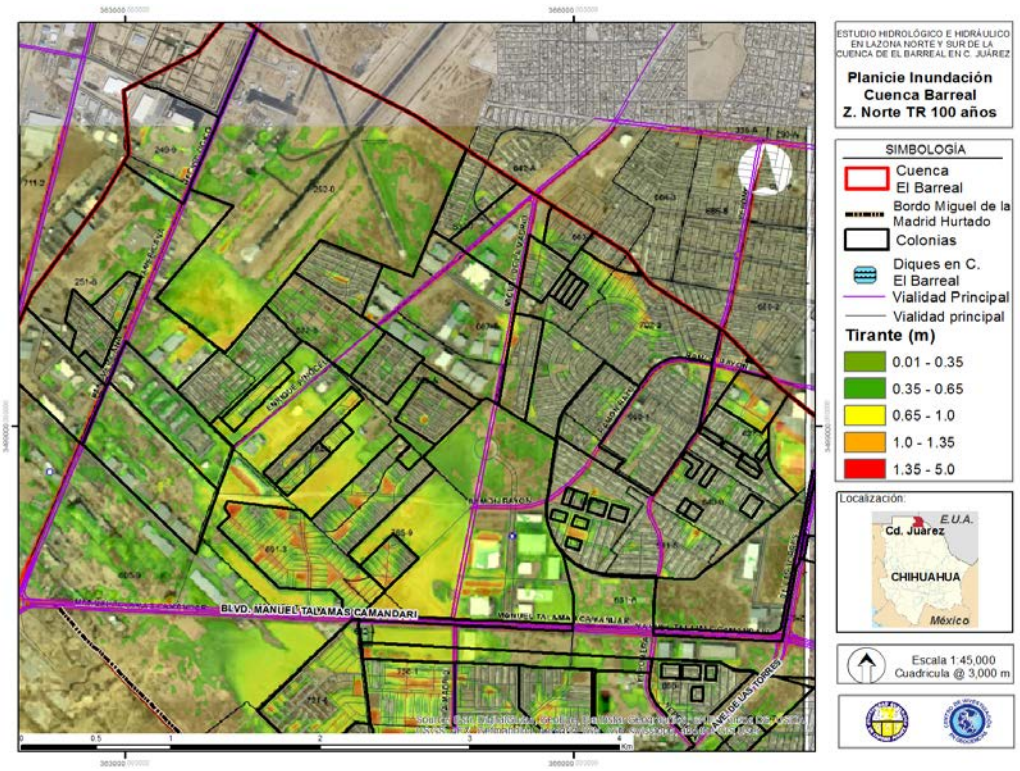


Figura IX.1.1. Diagnostico de la situación actual en Zona Norte de la Cuenca El Barreal en base a los resultados mostrados en el Atlas de Riesgos.

Estas zonas deben ser consideradas como vulnerables hidrológicamente o con poca capacidad de resiliencia hidrológica. En este documento, nos apegamos a la definición de resiliencia hidrológica dada por Mao et. Al. (2016), (FIGURA IX.1.2.) en la cual la se considera a un elemento, en este caso la subcuenca, como resiliente, si su vulnerabilidad ante el evento ha disminuido por causa de la capacidad de absorción, o de adaptación. En este caso, la capacidad de absorción es mínima, dado que las condición hidrológica de la cuenca es "pobre" como consecuencia del porcentaje de superficie impermeable como consecuencia de la urbanización.

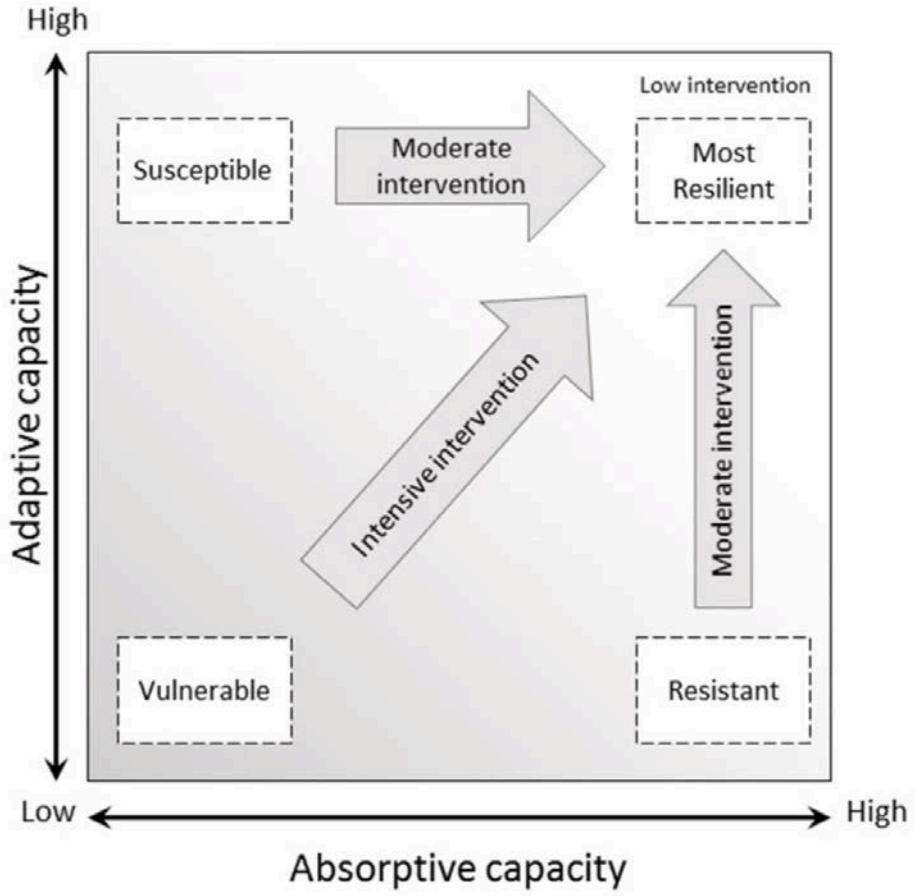


Figura IX.1.2. Definición de Resiliencia hidrológica (Mao et. Al., 2016) .

En cuanto a la capacidad de adaptación, es decir, las acciones referentes a la presencia de infraestructura que disminuya la vulnerabilidad, se observa que las estructuras de mitigación existentes en la subcuenca Jarudo (Figura IX.1.3), colindante al Noroeste con la subcuenca Barreal, son insuficientes para contener avenidas hidrológicas, ya que el dique Pemex esta inutilizado y los diques Campo Militar, Cementera y Oasis Revolución están localizados a una considerable distancia en dirección Norte, por lo que el drenaje de la parte sur de estas estructuras se aporta hacia la parte Norte de la subcuenca Barreal, causando afectaciones. Es decir, el Barreal norte, actualmente no

solo recibe aportaciones por cuenca propia, sino que recibe aportaciones de la parte Sur de la subcuenca Jarudo.

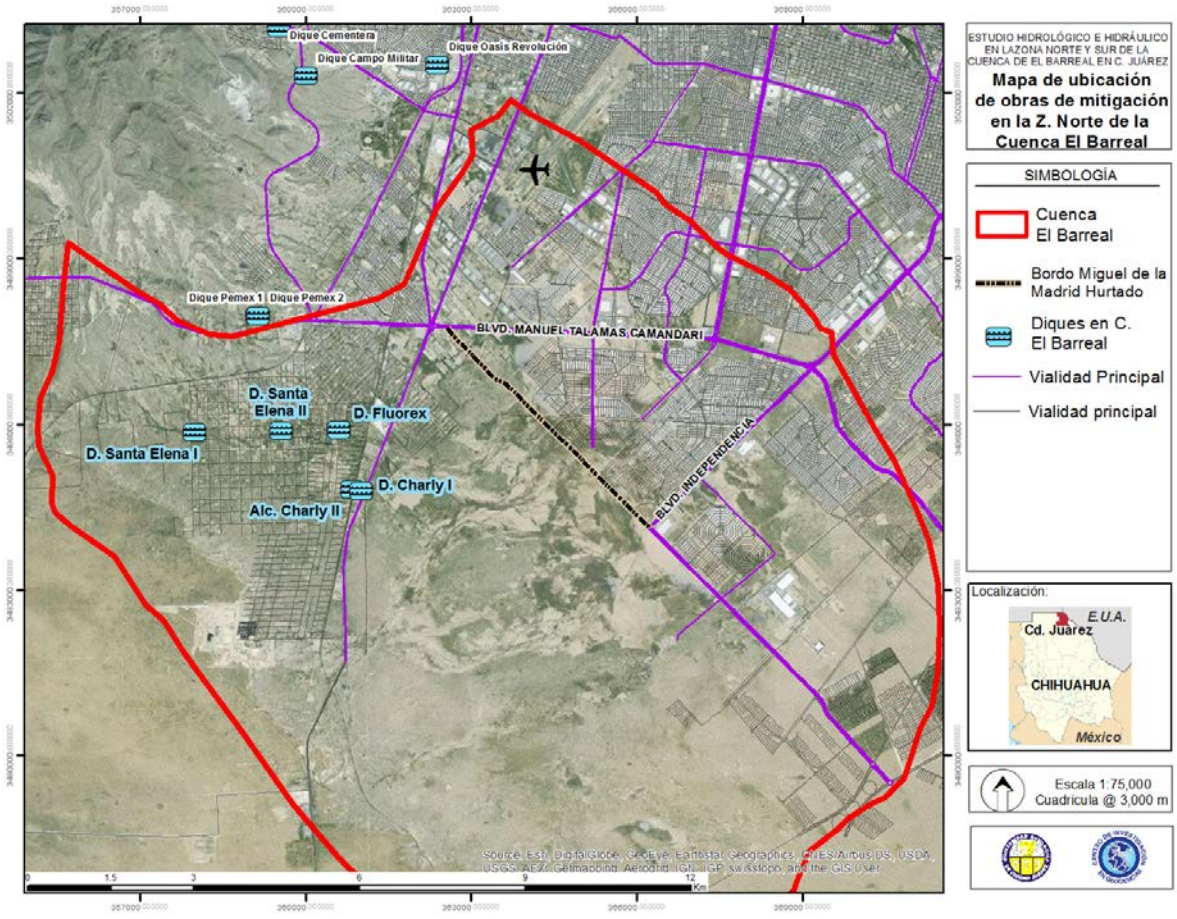


Figura IX.1.2. Carencia de estructuras de mitigación que afectan la Zona norte Barreal.

IX.2. ZONA PONIENTE

En esta zona se identifican tres subcuencas principales: Barreal Poniente, Barreal Sur-Centro y Barreal Sur-Oriente.

La primera subcuenca Barreal Poniente tiene como parteaguas dos principales avenidas, hacia el norte la Carretera Casas Grandes y hacia el este la Ave. Panamericana. La segunda subcuenca Barreal Sur-Centro está delimitada por la Carretera Casas Grandes, la Ave. Panamericana, y hacia el noreste el Bordo Miguel de la Madrid Hurtado. La tercera subcuenca Barreal Sur-Oriente se encuentra delimitada hacia el oeste por la Ave. Panamericana y hacia el norte por la subcuenca Barreal Centro (Figura IX.2.1).

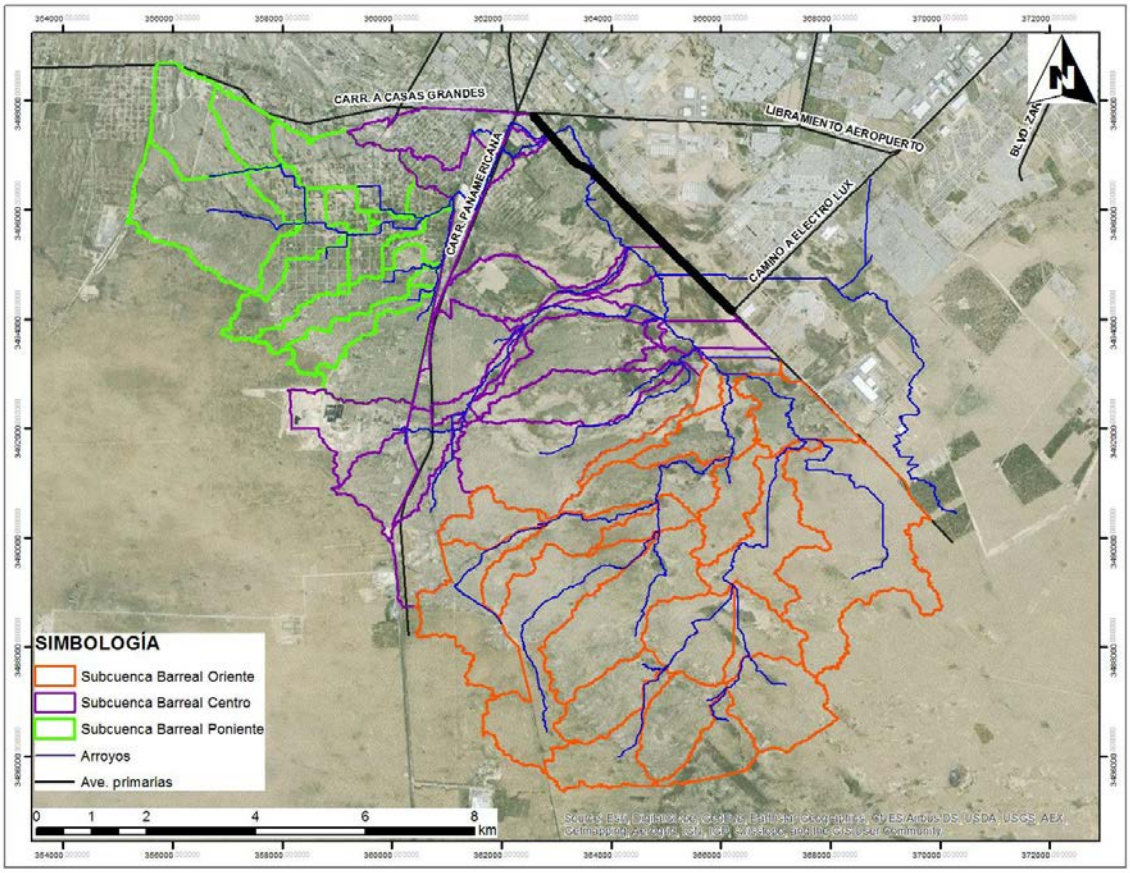


Figura IX.2.1. Ubicación de las subcuencas de aportación al bordo MMH

X.2.1. Microcuenca Barreal Poniente

La microcuenca Barreal Poniente tiene una superficie de 21.527 km^2 en la cual se observan dos arroyos principales con cinco arroyos tributarios. Se presentan pequeñas aglomeraciones de casas en su mayoría, en la parte noroeste y centro de la subcuenca (Figura IX.2.1.1).

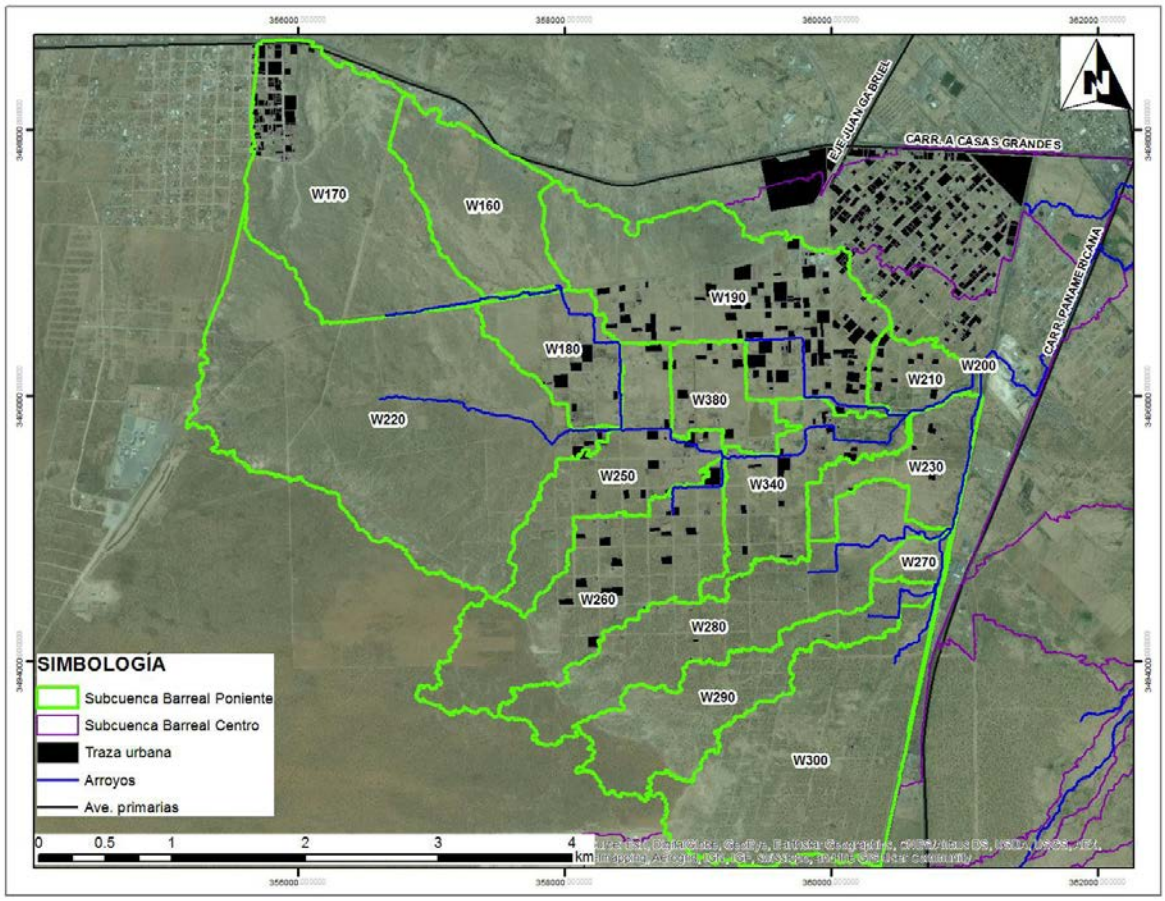


Figura IX.2.1.1. Subcuenca y escurrimientos principales Barreal Poniente.

IX.2.2. Microcuenca Barreal Sur

La microcuenca Barreal Sur-Centro tiene una superficie de 35.047 km^2 en la cual se observan 3 arroyos principales. Se presenta una aglomeración de casas en su mayoría, en la parte noroeste de la subcuenca cerca de la Ave. Panamericana, y hacia el este del bordo Miguel de la Madrid Hurtado, el cual delimita la subcuenca en su parte este (Figura IX.2.2.1).

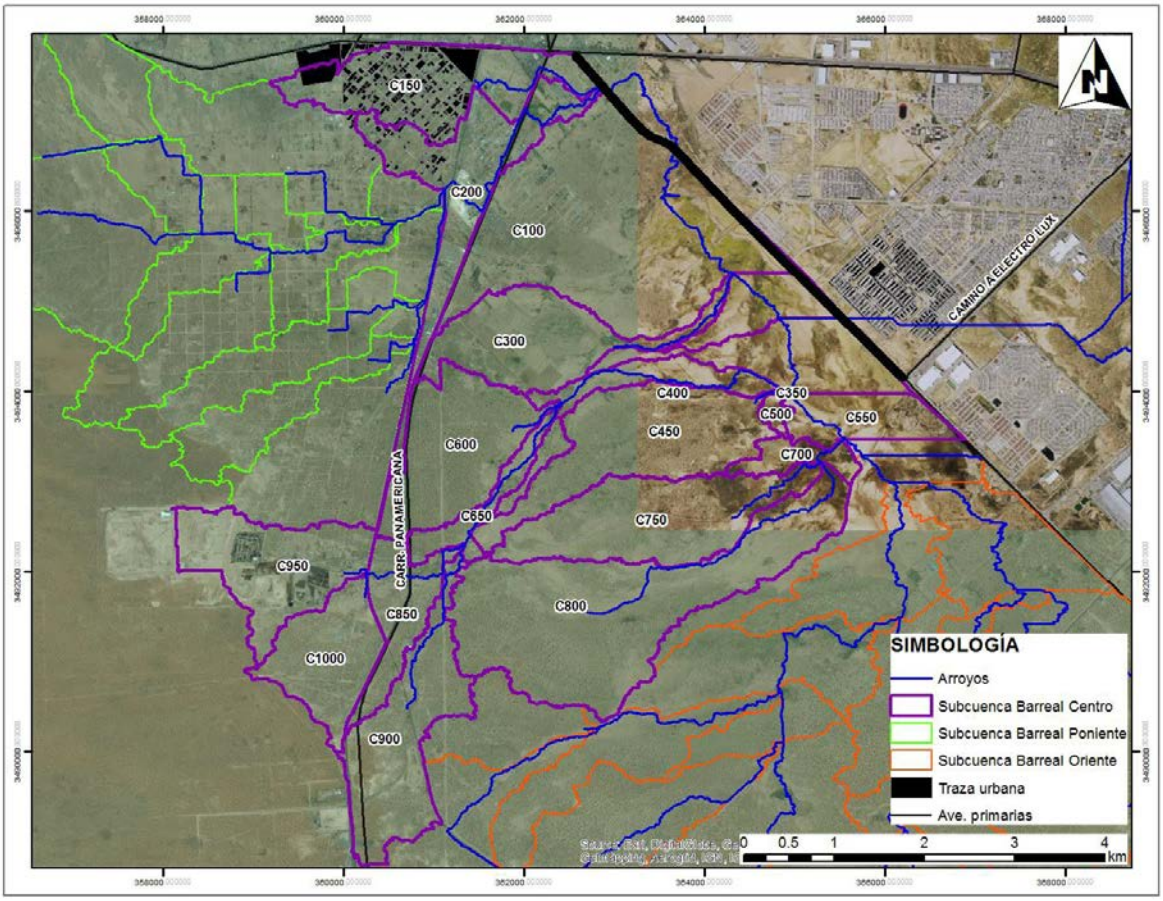


Figura IX.2.2.1. Subcuenca y escurrimientos principales Barreal Sur-Centro.

IX.2.3. Microcuenca Barreal Sur-Oriente

En la microcuenca Barreal Sur-Oriente, la cual tiene una superficie de 45.907 km^2, se observan tres arroyos principales y solo presenta una aglomeración de casas en la parte sureste, y hacia el este, naves industriales localizadas sobre la calle Camino a Electrolux (Figura IX.2.3.1).

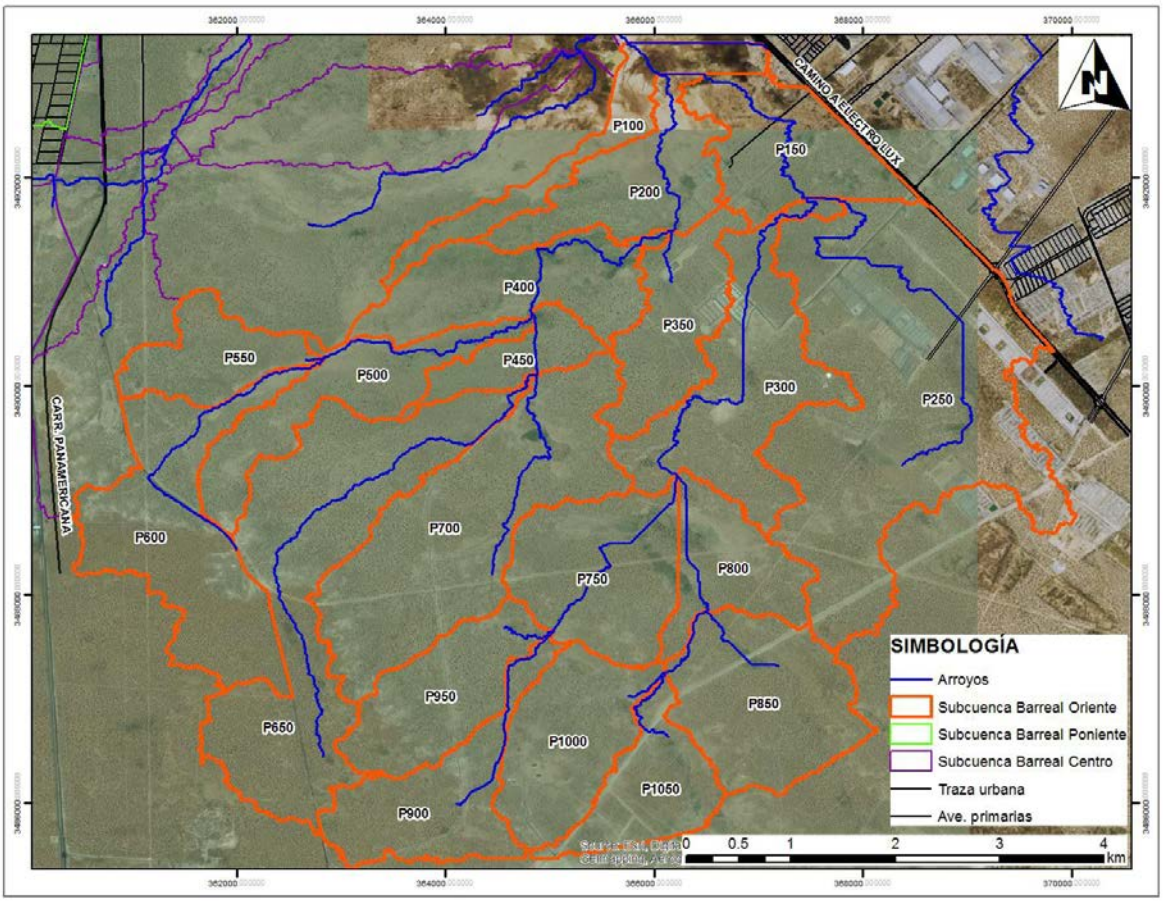


Figura IX.2.3.1. Subcuenca y escurrimientos principales Barreal Sur-Oriente.

IX.3. ZONA CENTRO

La subcuenca definida por el triángulo MMH-TC-BI presenta un área total de 12.47 km^2 con un total de 75 microcuencas y 65 vasos de captación e infiltración de escurrimientos (Figura IX.3.1). Los escurrimientos fluyen a través del bombeo de las calles en dirección a los vasos de captación principalmente, aunque en algunos casos, una microcuenca determinada drena sus excedentes de volumen a las cuencas que le circundan.

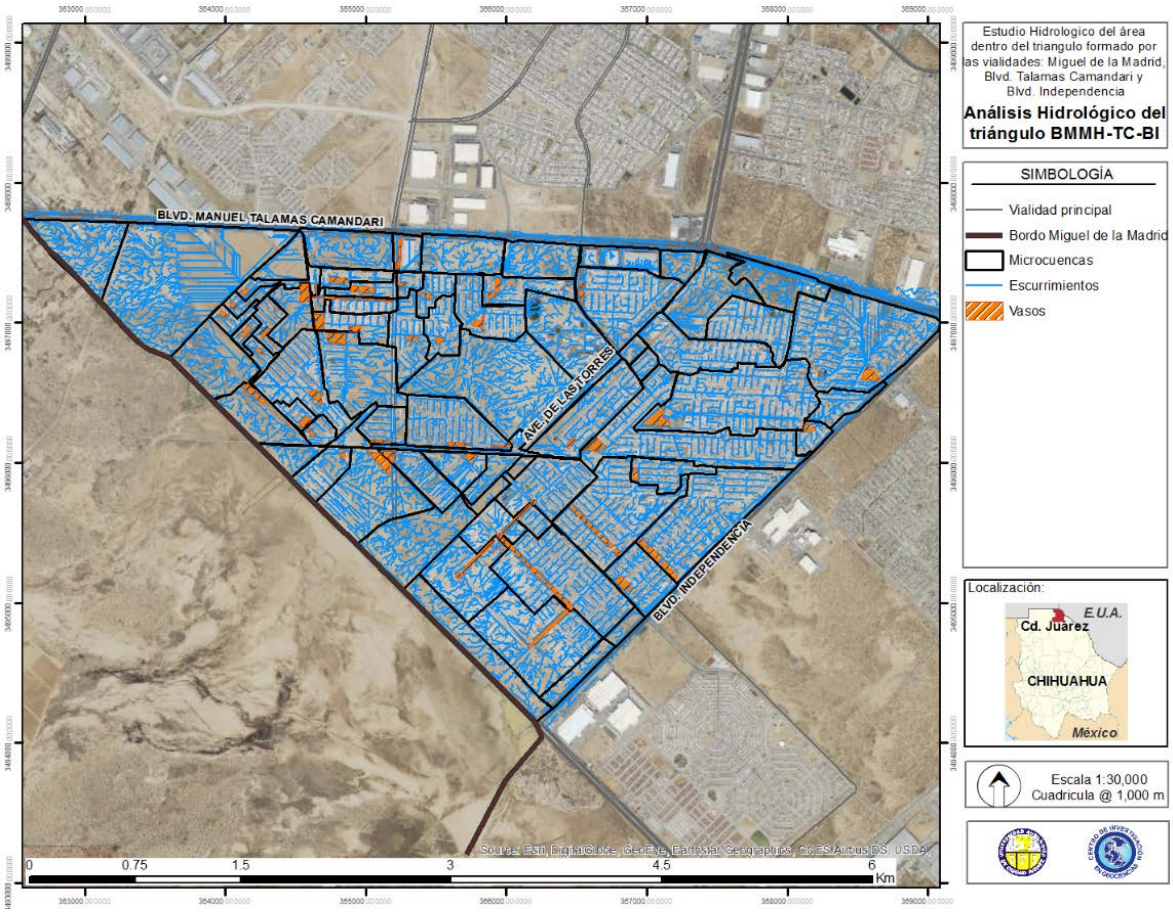


Figura IX.3.1. Subcuenca Triangulo MMH-TC-BI con elementos hidrológicos y escurrimientos.

IX.4. ZONA SUR

Respecto del modelo de la cuenca Barreal Sur, la información o resultados presentados por el IMIP en s Altas de Riesgo, deben ser interpretados con extrema prudencia, dado que el modelo presentado asume que existe un bordo longitudinal desde la Avenida Talamas Camandari hasta el sur de la Planta Electrolux, por lo que no se observa afectación hidrológica en esta subcuenca. Sin embargo, dado que el bordo solo existe hasta la Avenida Boulevard Independencia, debe considerarse que esta zona sur sí presenta problemas importantes de inundación, requiriéndose una actualización de la plantilla topográfica de la zona (Figura IX.4.1).

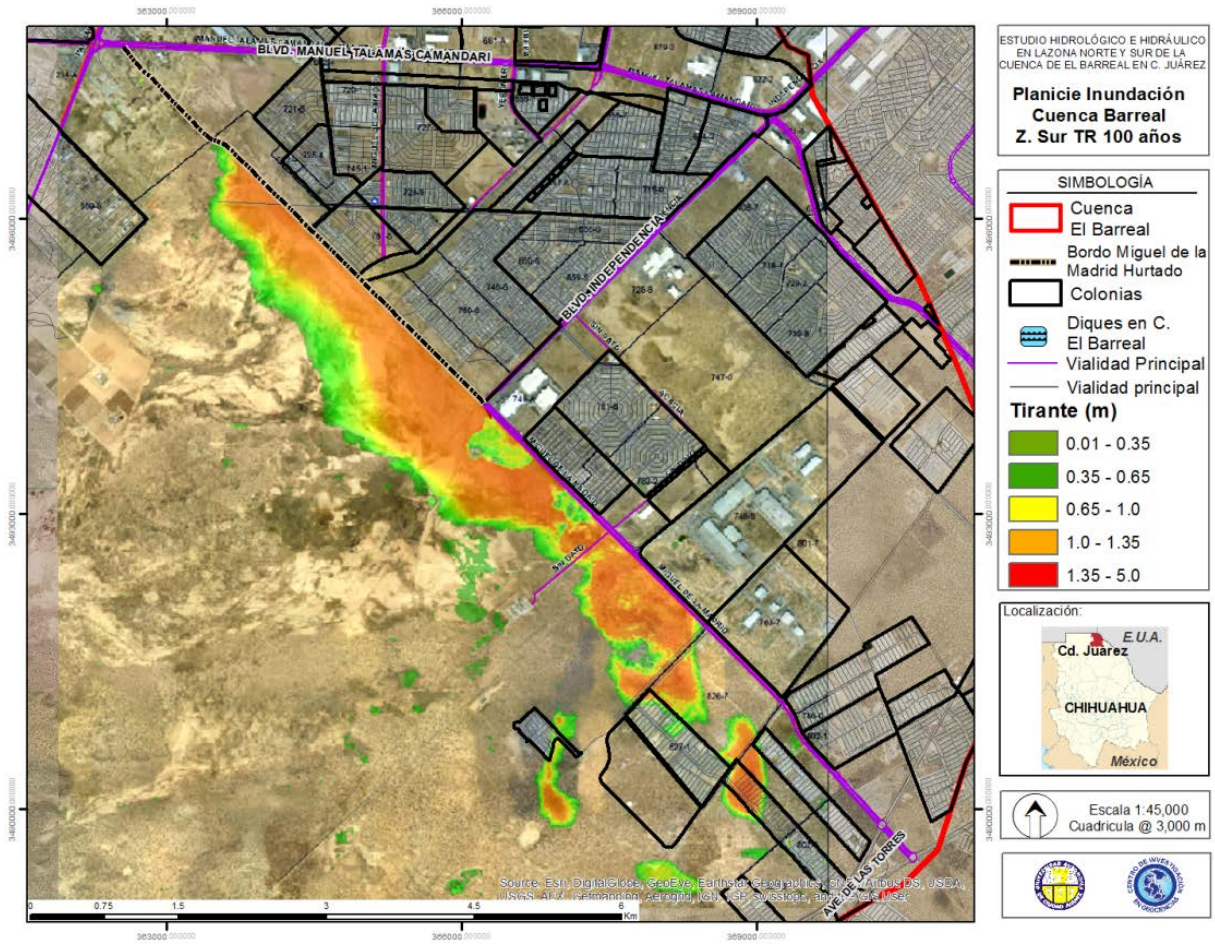


Figura IX.4.1. Subcuenca y escurrimientos principales Zona Sur.

X. FUNCION DE RIESGO PRELIMINAR DE ACUERDO A LAS CONDICIONES ACTUALES DE LA CUENCA

CENAPRED (2016) reporta en su informe "Análisis Técnico del Barreal" del 31 de Mayo del 2016, que Protección Civil Chihuahua reporta 4 decesos en el Barreal durante los eventos de lluvia extrema. No precisa si es solo 2006 o hasta el 2010.

a. En reportes de prensa se reporta que dos niños se meten a nadar a un dique entre las calles Desierto de Siria y Custodia de la Republica en el fraccionamiento Parajes de Oriente (*laredNoticias.com, 29 Julio 2013*), precisando que uno de ellos murió ahogado.

b. El 2013 no corresponde a ninguna declaratoria de emergencia por lluvia extrema o inundación en el Barreal.

c. Una mujer también es reportada de haber perdido la vida al caer, después de ser impactado su vehículo, a el interior de un vaso de captación en fraccionamiento Praderas del Sol en la zona del Barreal. Sus hijos si fueron rescatados, pero ella murió ahogada *(Diario de Juárez digital, 19 setiembre 2014)*

d. Un hombre murió ahogado en el dique de Parajes del sur después de que su cunado lo lanzó al dique por una disputa familiar (*Diario Digital, 2017*).

e. Las declaratorias de emergencia en el Barreal son: 2006 (2), 2008, 2014.

f. De estas declaratorias se asocian con fallecimientos, solo la del 2014.

g. Sin embargo en ningún caso se reporta que los fallecidos hayan sido sorprendidos por un evento de inundación repentina con tirantes elevados de agua y velocidades de flujo turbulentas.

h. Los decesos obedecen más bien a eventos accidentales u homicidio.

i. Esto es consistente con el resultado del modelo actual de la simulación hidráulica bidimensional de los desarrollos localizados dentro del Triangulo MMH-TC-BI donde las velocidades de flujo son muy bajas.

j. El modelo hidráulico de la UACJ es consistente con los Tiempos de Concentración y gastos hidráulicos del CENAPRED que establecen un máximo de7 m^3/s para el desarrollo Gómez Morín, el cual está también considerado como con problemática de seguridad hidrológica por la UACJ.

k. El informe de UACJ establece zonas especificas como con problemática de seguridad hidrológica por cuenca propia en algunos desarrollos específicos a nivel de calle, los cuales requieren de un proyecto ejecutivo de manejo pluvial que evite los tirantes mayores a 40 cm a nivel de calle.

l. En términos de Riesgo, la función de riesgo puede ser especificada en términos de pérdidas humanas o materiales (o ambas) para un periodo de retorno de 25 años.

m. Con tal función de riesgo, la Probabilidad de Excedencia (PE) para un TR 25 es de 1/25, o equivalente a un 4%. Considerando que este evento ya ocurrió en el 2006, el porcentaje subiría a 1/13, equivalente a un 8 %. Este es el termino estocástico o de probabilidad de ocurrencia de tal evento.

n. Si se considera además que los decesos asociados con lluvias en el Barreal han obedecido a circunstancias no asociadas propiamente con el evento de lluvia como accidentes u homicidios, y que la velocidad de flujo por cuenca propia dentro del triangulo es muy baja para contemplar un escenario de inundación repentina, entonces no se dispone de valor de umbral de ocurrencia y el Riesgo por pérdida de vidas sería muy bajo, considerando que el blindaje hidrológico del Bordo MMH esté garantizado.

o. En cuanto a pérdidas materiales, el IMIP, en su mapa de Riesgo por vulnerabilidad por tipo de vivienda ubica la zona del Barreal como de riesgo Bajo.

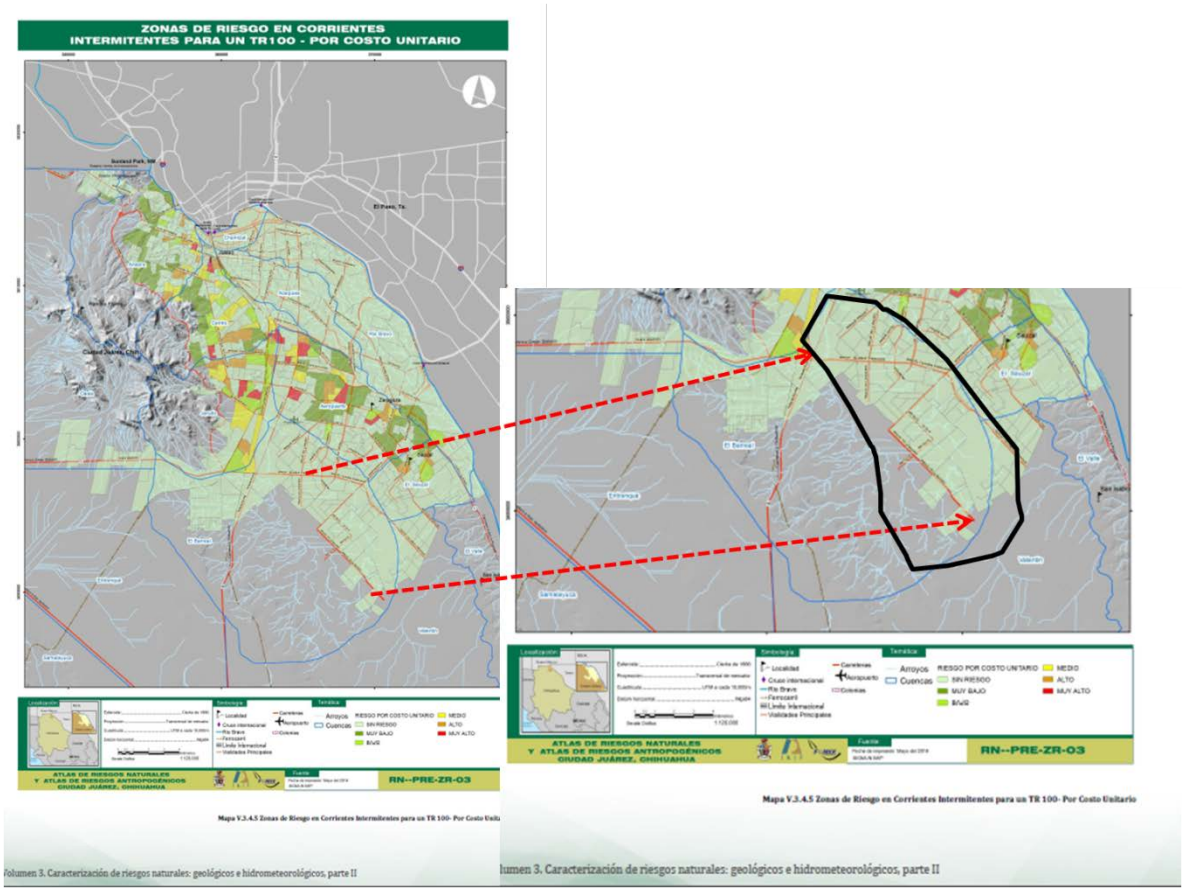


Figura X.1. Función de Riesgo por pérdidas materiales. (IMIP, 2016).

XI. CONCLUSIONES DE LA CUENCA EN CONDICIONES ACTUALES

Para el diagnostico de las condiciones actuales de la zona ya urbanizada del Barreal y su vulnerabilidad hidrológica se consideró como eje toral las recomendaciones emitidas por el esquema de solución planteado por la Estrategia planteada por Gobierno del Estado en 2009 y las observaciones emitidas por el CENAPRED en su memo *H00-DG/1792/2016*, los cuales de manera conjunta pueden resumirse en los siguientes puntos:

1) Todos los escurrimientos deberán contenerse por cuenca propia (*Estrategia*).
2) La cantidad de lluvia total será considerada como transformada a escurrimiento asumiendo que en condiciones futuras la cuenca será totalmente urbanizada (Estrategia).
3) La zona desarrollada actualmente debe ser protegida por un bordo de protección capaz de contener los escurrimientos de 100 años en condiciones totalmente urbanizadas (Estrategia).
4) El bordo Miguel de la Madrid Hurtado deberá ser capaz de contener los escurrimientos correspondientes a un evento hidrometeorológico extremo asociado a una tormenta de diseño de 100 años con bordo libre a 500 en condiciones actuales. (CENAPRED).
5) Los desarrollos existentes en la zona lagunar deberán ser capaces de contener los escurrimientos correspondientes a 25 años en las condiciones actuales de urbanización (CENAPRED).

En cuanto a pérdidas humanas por eventos hidrometeorológicos:

6) CENAPRED (2016) reporta en su informe "Análisis Técnico del Barreal" del 31 de Mayo del 2016, que Protección Civil Chihuahua reporta 4 decesos en el Barreal durante los eventos de lluvia extrema. No precisa si es solo 2006 o hasta el 2010.

7) En reportes de prensa se reporta que dos niños se meten a nadar a un dique entre las calles Desierto de Siria y Custodia de la Republica en el fraccionamiento Parajes de Oriente (*larednoticias.com 29 Julio 2013*), precisando que uno de ellos murió ahogado.

8) El 2013 no corresponde a ninguna declaratoria de emergencia por lluvia extrema o inundación en el Barreal.

9) Una mujer también es reportada de haber perdido la vida al caer, después de ser impactado su vehículo, a el interior de un vaso de captación en fraccionamiento Praderas del Sol en la zona del Barreal. Sus hijos si fueron rescatados, pero ella murió ahogada. (*Diario de Juárez digital, 19 septiembre 2014*).

10) Un hombre murió ahogado en el dique de Parajes del sur después de que su cuñado lo lanzó al dique por una disputa familiar *(Diario Digital, 2017*).

11) Las declaratorias de emergencia en el Barreal son: 2006 (2), 2008, 2014.

12) De estas declaratorias se asocian con fallecimientos, solo la del 2014.

13) Sin embargo en ningún caso se reporta que los fallecidos hayan sido sorprendidos por un evento de inundación repentina con tirantes elevados de agua y velocidades de flujo turbulentas.

14) Los decesos obedecen más bien a eventos accidentales u homicidio.

XII. RECOMENDACIONES

1. Generar un modelo hidráulico bidimensional con una plantilla topográfica actualizada con tamaño de celda de 5x5 m en la zona urbanizada y 10x10 en la zona no urbanizada.

2. Para la tormenta de diseño correspondiente, deberá utilizarse no solo la distribución normal del Plan Sectorial de Manejo de Agua Pluvial, la cual distribuye la lluvia de manera más extrema respecto de la distribución de eventos extremos de Gumbel. Sino que, y esto es de suma importancia, la tormenta deberá ser distribuida a 24 horas con balance de masa efectivo. Es decir, en esta lluvia se asume que toda el agua de precipitación es efectivamente captada por la cuenca, y que hay un balance efectivo de masas donde toda el agua que cae debe ser igual al agua que escurre más las retenciones y perdidas por condición hidrológica del terreno. En este escenario critico de lluvia, al no haber ponderación por tamaño de área de tormenta, el volumen escurrido aumenta notablemente, reflejando un escenario de tormenta aún más extremo. Este método es el propuso la GASIR de CONAGUA para las cuencas de Ciudad Juárez en el 2014.

3. Elevar el Bordo MMH a una cota mínima de 1,187 m.s.n.m.m. para un TR de 500 años hasta la vialidad San Isidro o entrada a ElectroLux.

4. En los tramos en que el bordo MMH registre elevaciones mayores a 1,187 m (1,190 m en la parte noreste), dejarlo en su cota natural.

5. Evaluar por métodos indirectos y de exploración directa la integridad estructural del bordo Miguel de La Madrid Hurtado.

MEMORIA TÉCNICA SOBRE LA GENERACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN PARA LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA IBER

INTRODUCCIÓN

Para la fase de modelado de proyectos hidrológicos e hidráulicos se requiere, entre otras cosas, de realizar estudios básicos que permitan alimentar los parámetros de las corridas hidrológicas e hidráulicas. Los estudios básicos se conforman por estudios topográficos, fisiográficos, geológicos y geotécnicos. Aun y cuando todos estos estudios son extremadamente importantes, el desarrollo de los modelos hidrológicos e hidráulicos, debe ser generado a partir de una plantilla topográfica resolución suficiente conforme a los objetivos globales del estudio. Los estudios topográficos pueden ser generados a partir de datos de topografía terrestre, aérea, suborbital o satelital incluso. En esta investigación, la plantilla topográfica de alta resolución fue generada a partir de la integración de datos de elevación con provenientes de diferentes plataformas de adquisición, tales como topografía terrestre de alta resolución mediante sistema de navegación satelital de doble frecuencia, conocido con sistema de navegación cinemática en tiempo real (RTK por sus siglas en ingles), datos LiDAR aéreos, y restitución fotogramétrica. El resultado final consiste entonces de un Modelo Digital de Elevación con una cobertura de 200 km^2, con una resolución espacial de 1 m en X y Y y de 20 cm en Z.

OBJETIVO

La generación de un Modelo Digital de Elevación tiene como objetivo el análisis del peligro hidrológico por inundación mediante el desarrollo de los modelos hidrológicos e hidráulicos.

GENERACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

La generación del Modelo Digital de Elevación (MDE) del presente estudio se generó a partir de los siguientes insumos:

1.- Vuelo Fotogramétrico: En noviembre del 2017 se realizó un vuelo no tripulado con DRONES para generar una nube de puntos para generar un MDE con tamaño de celda de 20cm x 20cm capaz de restituir alturas no mayores a 20 cm. Una vez que se generaron los mosaicos de 1 km^2 con resolución espacial en el terreno de 1m x 1m se procedió a realizar una validación de la resolución vertical del modelo, es decir, se verificó que las secciones del DEM fueran consistentes con lo observado con las secciones topográficas levantadas con GPS doble frecuencia utilizando las mismas estaciones de referencia o puntos de control.

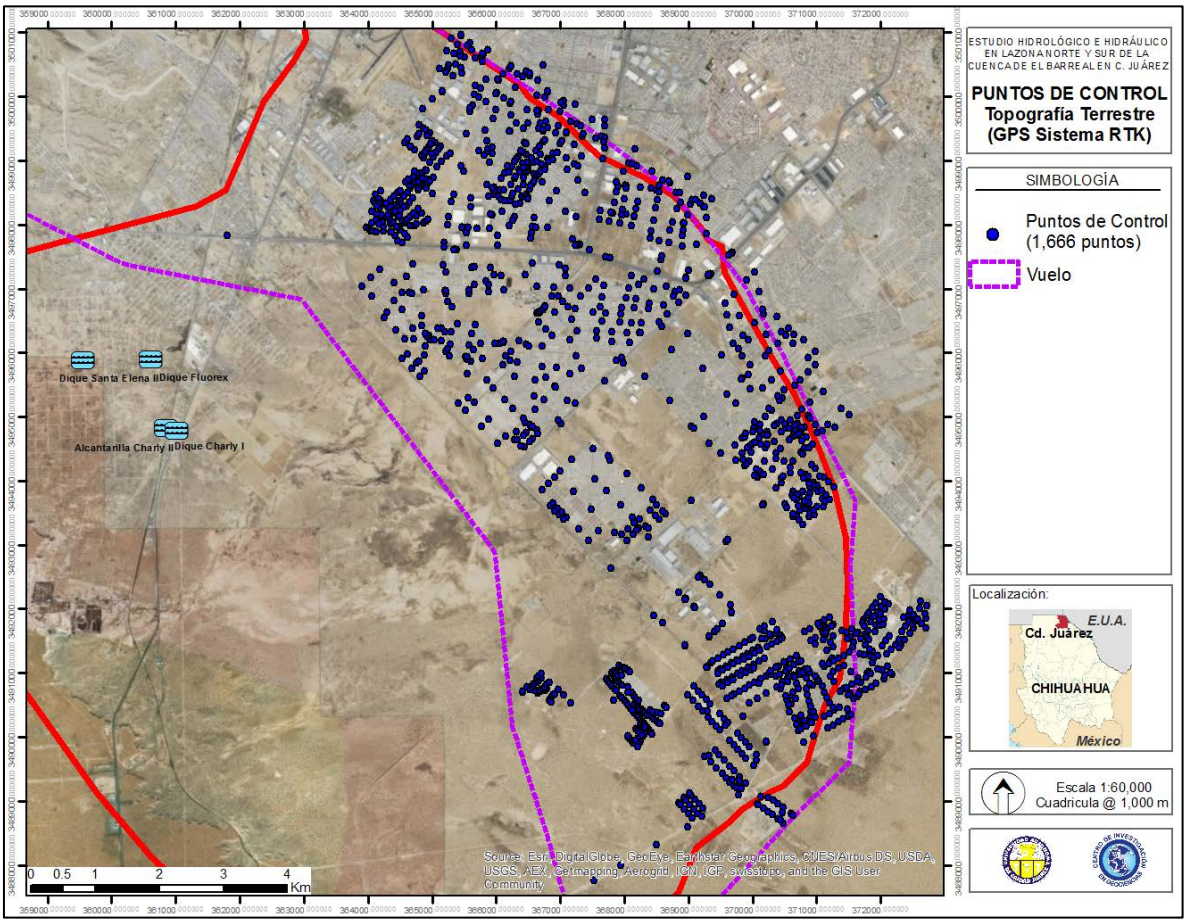


Figura 1. Puntos de control realizados para la generación del DEM.

2.- Vuelo LiDAR: Modelo digital de elevación generado a partir del procesamiento del doble tiempo de arribo de pulsos LASER emitido por un sensor LIDAR montado en una avioneta que sobrevoló completamente Ciudad Juárez en el 2008. A partir de la nube de puntos se generó un modelo digital de terreno con resolución de 1 m x 1 m en X y Y, y de 20 cm en Z.

3.- Sistema de navegación inercial de doble frecuencia (RTK): Dado que la tecnología de fotogrametría no pudo ser implementada en la zona noroeste, dada la presencia del Aeropuerto Internacional Abraham González, cuya administración no

autorizó el vuelo de aeronaves no tripuladas en las zonas de aproximación de la aviación comercial en Ciudad Juárez. Sin embargo, la zona fue actualizada con topografía de alta resolución con sistema RTK de doble frecuencia para generar una superficie con tamaño de celda o pixel de 1mx1m y alturas no mayores a 20 cm, conforme al proceso de verificación por topografía terrestre que a la par se realizó con el levantamiento del nuevo DEM y el vuelo con Drones, tanto en la zona del Aeropuerto como en nuevos desarrollos de fraccionamiento, teniendo un total aproximado de 1,666 puntos de control (Figura 1).

Finalmente, se dispone de un MDT hibrido con cobertura de 200 km^2 para la simulación numérica hidrológica e hidráulica, actualizado al 2017 por restitución fotogramétrica en la zona urbanizada con tamaño de celda de 20cm por 20cm en X y Y, capaz de restituir alturas no mayores a 20 cm en Z. Mediante topografía con sistema GPS (RTK) se cuenta con tamaño de celda o pixel de 1m por 1m en X y Y, y alturas no mayores a 20 cm en Z, en las zona aledaña al Aeropuerto. Finalmente, mediante LiDAR en las zonas identificadas sin cambio un tamaño de celda de 1 m por 1 m en X y Y, y de 20 cm en Z (Figura 2). Además se entregará el MDE de 20cmx20cmx20cm del área del vuelo fotogramétrico durante el 2017 en formato ASCII al INFONAVIT.

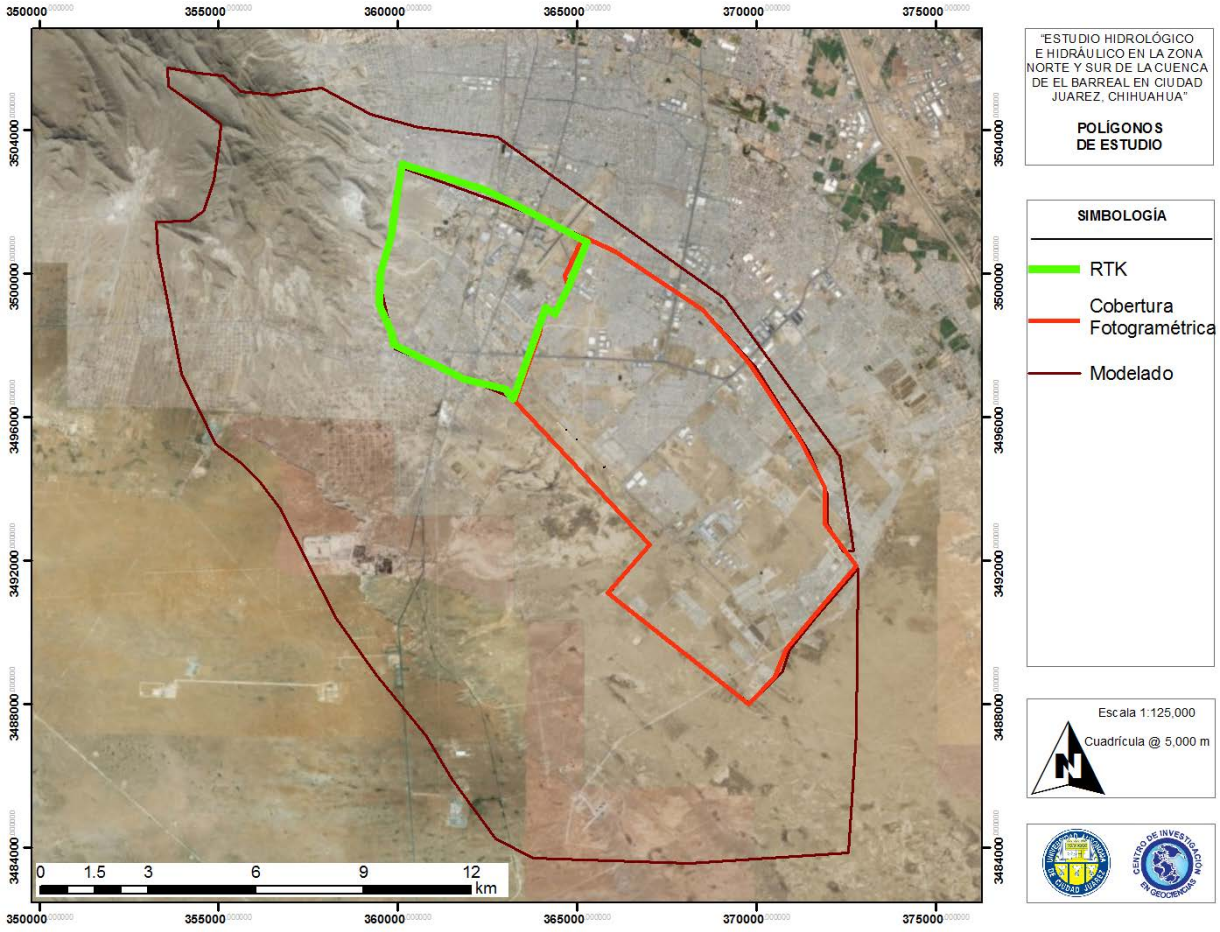


Figura 2. El polígono sombreado marrón representa el área cubierta con LiDAR 2008, en verde al área actualizada con topografía con GPS doble frecuencia (RTK) y el polígono rojo el área con fotogrametría.

Los detalles de insumos, fuentes de dato, metodologías y resolución de cada Modelo Digital de Elevación (ya sea de terreno o superficie) se resumen en la siguiente tabla (Tabla 1):

Tabla 1. Resumen de fuentes y sus metodologías aplicadas a a realización del MDE.

FUENTES	FECHA	INSUMOS	METODOLOGIA	TIPO DE MODELO DE ELEVACION	MAXIMA RESOLUCION HORIZONTAL	MAXIMA RESOLUCION VERTICAL
1.- FOTOGRAMETRIA	DICIEMBRE DEL 2017	VUELO CON DRONES NO TRIPULADOS	RESTITUCION FOTOGRAMETRICA	MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE Y MODELO DIGITAL DE TERRENO	20 cm	20 cm
2.- LIDAR	JULIO DEL 2008	VUELO LIDAR DE TODO CIUDAD JUAREZ	PROCESAMIENTO DEL DOBLE TIEMPO DE ARRIBO DEL PULSO LASER.	MODELO DIGITAL DE TERRENO	20 cm	20 cm
3.- MODELO ELEVACION HIBRIDO ACEPTADO	FEBRERO DEL 2018	MDT FOTOGRAMETRIA Y MDT LIDAR	SUTURA CON CONTROL POR METODO DE DECOMPOSICION DE LA FUNCION DE DIFERENCIAS Y FILTRO LAPLACIANO DE 9X9 POR CONVOLUCION EN EL DOMINIO DEL TIEMPO.	MODELO DIGITAL DE TERRENO	1.0 m	20 cm

A partir de la topografía aérea de alta resolución vertical se procedió a generar el modelo digital de elevación de terreno dentro del área de estudio. Con información topográfica de alta precisión se desarrollaron los modelos digitales de elevación (DEM) requeridos, que, conforme a los Términos de Referencia, son de 10 x 10 m en la zona no urbanizada, 5mx 5m en la zona urbanizada y 1 m en la zona del bordo. Con los modelos de elevación se obtuvieron los diferentes parámetros físicos de la cuenca bajo estudio, mismos que serán aplicados durante el desarrollo de los modelos hidrológicos y simulaciones hidráulicas. Esto tipo de datos topográficos de alta precisión identifican depresiones en el terreno generando los modelos con gran apego a la realidad por su alta precisión.

METODOLOGÍA DE SUTURA DE LOS DEM's LiDAR Y FOTOGRAMETRÍA

El modelo de elevación actualizado de la parte urbanizada del Barreal se unió al modelo digital de elevación LIDAR del 2008 actualizado con estructuras recientes en la parte que corresponde a la definición de la cuenca hidrológica del barreal.

El proceso de unión se llevó a cabo a través del método de ***Descomposición de la Función de diferencias*** entre los modelos a ser suturados. El proceso consiste en descomponer a través de análisis de Fourier la función de diferencias en una serie de funciones sinusoidales con diferentes amplitudes, frecuencias y fases. Las correcciones son entonces aplicadas en base a la longitud de onda de cada función sinusoidal específica, a lo largo de una línea de unión o sutura no mayor a un cuarto de la longitud de onda para garantizar una unión suavizada.

PRE-PROCESO:

Primeramente, se revisó que la proyección geográfica de ambos modelos fuera la misma y con el mismo Datum: WGS 84 UTM Z 13 N

DEM LiDAR

El DTM LiDAR se generó a partir de archivos LAS (*.las)* clasificados en base al tiempo doble de arribo. Con la nube *.las* se generaron polígonos de 5kmx5km para posteriormente generar un mosaico con a partir de los polígonos individuales.

DEM FOTOGRAMETRÍA

En el caso del modelo digital de terreno generado con técnicas fotogramétricas, el proveedor del servicio entregó un modelo con una cobertura de 70 km^2, orotorectificado a partir de los puntos de control. Las líneas de vuelo de la fotogrametría se realizaron con una orientación Suroeste-Noreste extendiéndose al menos 200 m de la zona del parteaguas de la cuenca El Barreal en la parte Norte, Noreste y Sur de la cobertura del vuelo. En tanto que, en la dirección Oeste y Suroeste, el vuelo se extendió hasta casi 500 m aguas arriba del Bordo Miguel de la Madrid, ya que este es el parteaguas de la zona urbanizada actualmente. En la parte Noroeste, no se sobre extendió el área de cobertura ya que el Aeropuerto no permitió volar en sus inmediaciones. La zona con una alta densidad de control topográfico esta entonces localizada en la zona urbanizada de El Barreal.

PROCESO DE UNION DE DEM's

El proceso de unión aplicando el método de Análisis Espectral de Funciones de diferencias se llevó a cabo, primeramente, utilizando toda la cobertura de la fotogrametría como control de la zona de sutura, sin embargo, esto introdujo artefactos en los extremos, como consecuencia de efectos de borde del DEM fotogramétrico. Por ello se procedió a asignar áreas de empalme de manera manual de la siguiente manera (Figura 3):

Zona Norte, Este y Sur: La zona de empalme entre LIDAR y Fotogrametría está fuera del área de definición de vertiente dada por el IMIP para la cuenca el Barreal. Es decir, la distancia mínima entre la sutura y el parteaguas es de al menos 150 m, alcanzando en algunos casos hasta los 800 m. En este mismo tenor, referimos que la hidrología regional revela que el parteaguas está incluso a distancias mayores a las mencionadas.

Ya que la nueva definición de vertiente para el Barreal en esa zona, se localiza a al menos 600 m aguas arriba de la zona de sutura de LIDAR con la fotogrametría. En esta zona solo se debe solo considerar el modelo fotogramétrico y no el empalme o sutura con LIDAR. El hecho de modelarlo obedece a que de esta manera no es necesario precisar condiciones de salida en el borde de la malla, ya que está localizada a una distancia considerable de la frontera del área de estudio.

Zonas Suroeste y Oeste: En esta zona, dado que es encuentra en la frontera del vuelo fotogramétrico, se observaron nuevamente efectos de borde en el DEM generado por restitución. Por lo que se procedió a definir la trayectoria de sutura de forma manual hasta una distancia de aproximadamente 250 m del borde de la cobertura de fotogramétrica en dirección al Bordo MMH. De esta manera se garantizó una mayor área de empalme entre LIDAR y la fotogrametría. Este enfoque resulto favorable dado que hay concordancia entre las secciones del DEM y las secciones de topografía terrestre (ver memoria EXCEL anexa). Cabe puntualizar, que esta zona fue la observada por CENAPRED el día viernes 23.

Zona Noroeste: Esta zona muestra suturas con diferencias de +/- 20 cm en la zona de contacto entre LIDAR y Fotogrametría.

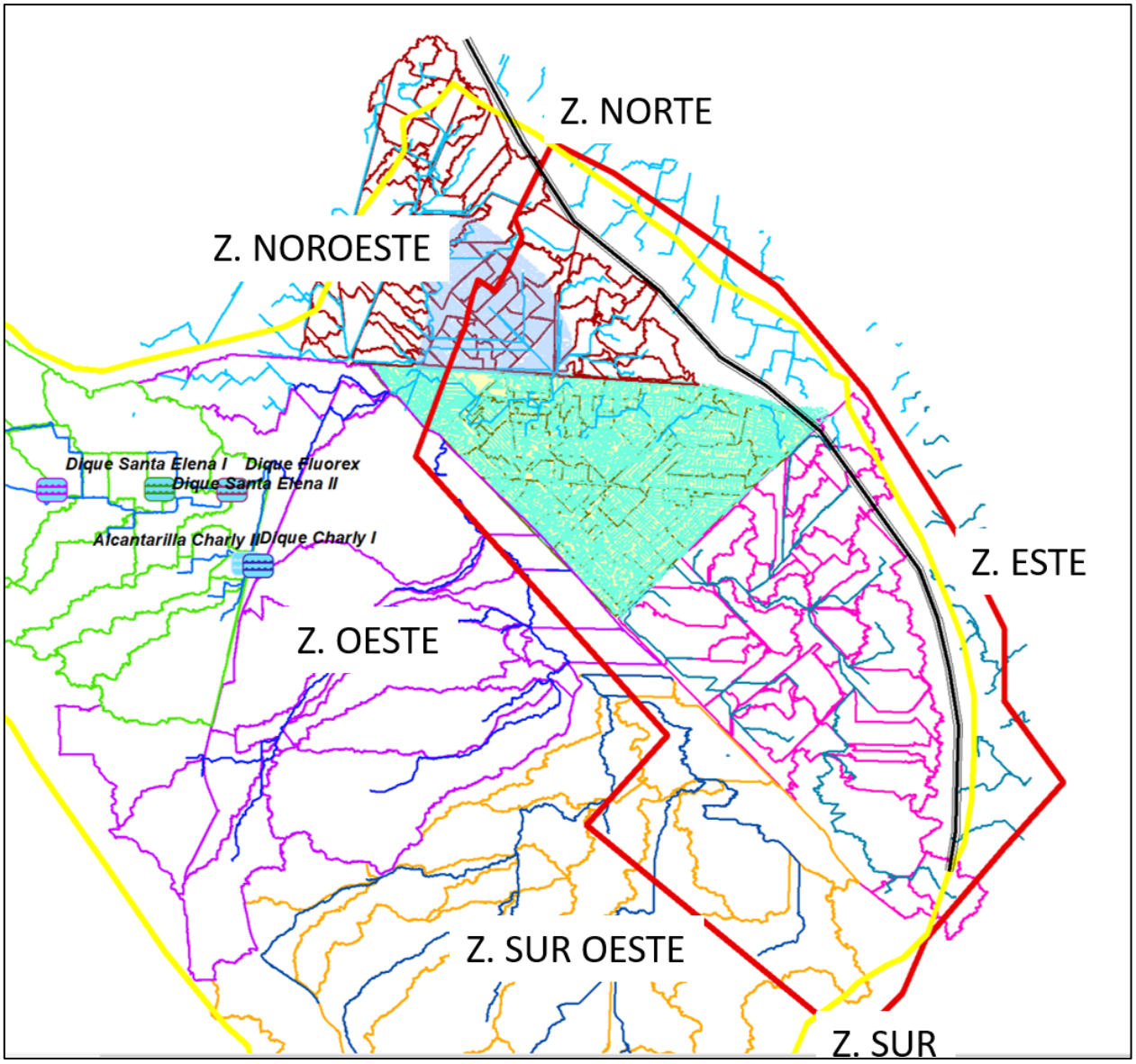


Figura 3. Hidrología superficial regional y áreas de sutura.

NOTA PRECAUTORIA:

El resultado del modelo híbrido es una modelo con extensión superficial de 200 km^2 con tamaño de celda o pixel de 1.0 m en X por 1.0 m en Y y 20.0 cm en Z.

INSTITUTO DEL FONDO NACIONAL DE LA VIVIENDA PAR LOS TRABAJADORES

I N F O N A V I T

“ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO EN LA ZONA NORTE Y SUR DE LA CUENCA DE EL BARREAL EN CIUDAD JUAREZ, CHIHUAHUA”

REPORTE

ESTUDIO GEOTÉCNICO, GEOFÍSICO Y ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUD DEL BORDO MIGUEL DE LA MADRID HURTADO

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN 3
II. OBJETIVO 3
IV. Ubicación de la zona del proyecto 4
V. JUSTIFICACION 5
VI. ESTUDIOS GEOFÍSICOS 7
VI.1. Tomografías Eléctricas Resistivas (TER's) 8
VI.2. Resistividad 11
VI.3. Metodología de Adquisición de Datos 12
VI.4. Procesamiento 13
VII. TRABAJO DE CAMPO 14
VII.2. Acervo Fotográfico ..... **Error! Bookmark not defined.**
VIII. RESULTADOS DE TER´s 49
VIII.1. Anomalías a partir de Líneas de TER´s 49
IX. INTERPRETACIÓN DE PERFILES 76
X. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 80
ESTUDIOS DE SÍSMICA 81
XI. ESTUDIOS DE SÍSMICA 82
XI.1. ONDA DE CORTE (S) 85
XI.2. TRABAJO DE CAMPO 87
XI.3. PROCESAMIENTO DE LA ONDA DE CORTE (S) 93
XI.4. RESULTADO DE LA ONDA DE CORTE (S) 101
XI.5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 110
ESTUDIOS DE GEORADAR 111
XII. ESTUDIOS DE GEORADAR 112
XII.1. INTRODUCCIÓN 112
XII.1. METODOLOGÍA 113
XII.1.1. Georadar o Ground Penetrating Radar (GPR) 113
XII.2. TRABAJOS DE CAMPO 115

XII.3. PROCESAMIENTO 116

XII.4. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN 116

XII.5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... **Error! Bookmark not defined.**

ESTUDIOS DE GEOTECNIA EN EL BORDO MIGUEL D ELA MADRID HURTADO ... 129

XIII. ESTUDIOS DE GEOTECNIA EN EL BORDO MIGUEL D ELA MADRID HURTADO 130

ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE TALUD EN EL BORDO MIGUEL DE LA MADRID HURTADO 149

XIV. ESTUDIOS DE GEOTECNIA EN EL BORDO MIGUEL D ELA MADRID HURTADO 150

XIV.1. ESTUDIOS DE GEOTECNIA EN EL BORDO MIGUEL D ELA MADRID HURTADO 150

I. BIBLIOGRAFÍA 168

I. INTRODUCCIÓN

En Ciudad Juárez, en el estado de Chihuahua, durante la temporada de lluvias se presentan situaciones de riesgo a causa de la intensidad con que se presenta la precipitación. El problema se genera aguas abajo de los principales arroyos y diques que desembocan hacia asentamientos urbanos, incrementando con esto los daños a la población y a la infraestructura urbana en general. Ante esta situación es imperativo llevar a cabo la actualización de los estudios hidrológicos requeridos para los diferentes periodos de retorno en las zonas con un marcado crecimiento urbano, de tal forma que podamos conocer a detalle las modificaciones que se han presentado en las cuencas, con el fin de diseñar las obras de control hidráulico requeridas para salvaguardar tanto la vida como de la propiedad en un ambiente de convivencia armónico y sustentable con el medio ambiente.

II. OBJETIVO

Analizar por medio de la aplicación de métodos indirectos (geofísica) y directos (geotecnia) de exploración, los parámetros físicos y condiciones estructurales actuales del bordo Miguel de la Madrid Hurtado.

III. ALCANCES

Generar un documento que englobe los principales hallazgos de los estudios de geofísica, Tomografías Eléctricas Resistivas, Sísmica, Georadar; y de los

estudios de geotecnia en campo y de gabinete, para inferir las condiciones de integridad estructural del Bordo MMH.

IV. Ubicación de la zona del proyecto

Actualmente, la antigua zona lagunar, o parte más baja de este sistema endorreico, está protegida por un bordo con capacidad de contención de eventos hidrometeorológicos extremos de periodo de retorno de 100 años con bordo libre a 500 años. Esta zona está definida por el polígono (casi un triángulo) delimitado por la vialidad Miguel de la Madrid Hurtado (MMH) al oeste que constituye el bordo en sí, por la vialidad Manuel Talamás Camandarí (TC) al norte, y por el Boulevard Independencia (BI) al Este (Figura V.1.4).

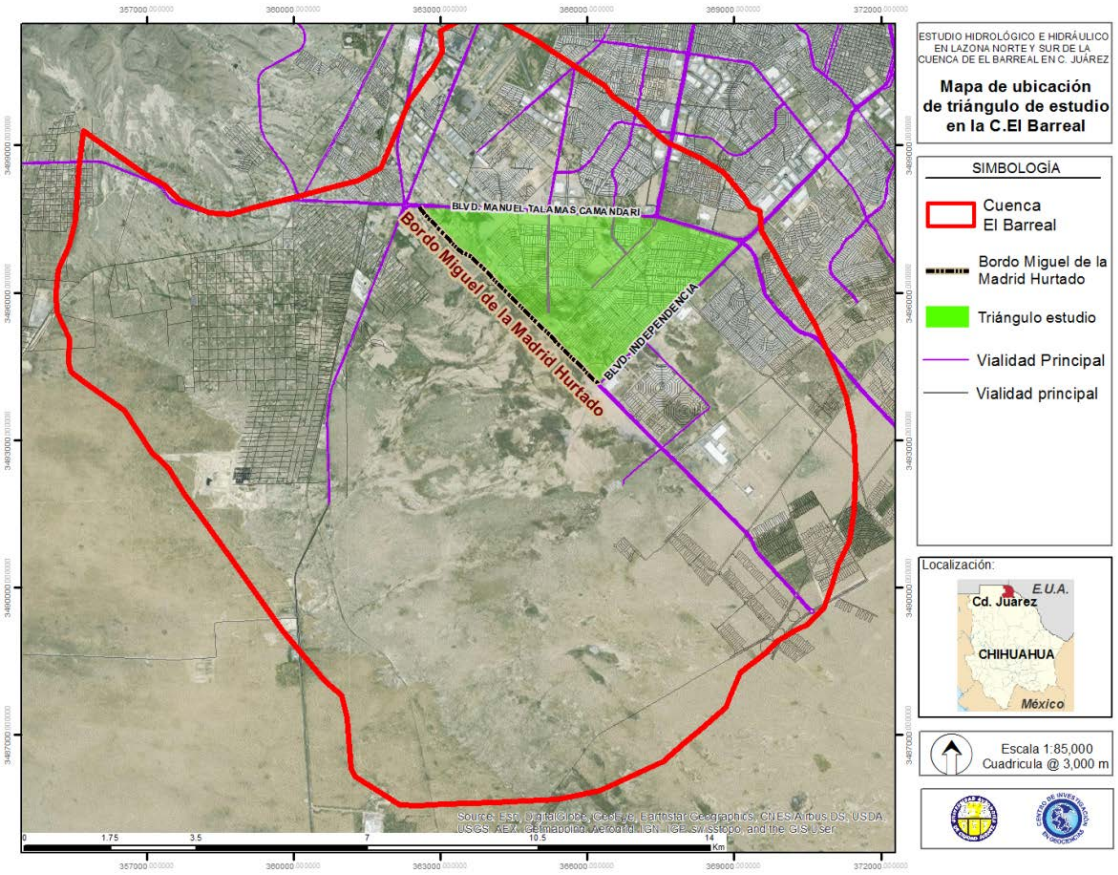


Figura IV.1.1. Localización general de la cuenca El Barreal en Cd. Juárez.

V. JUSTIFICACION

La seguridad hidráulica de los desarrollos habitacionales ubicados dentro de la poligonal que circunscriben las vialidades Miguel de la Madrid Hurtado, Talamas Camandari y Boulevard Independencia depende de la presencia e integridad estructural del Bordo MMH. De manera, los desarrollos urbanos dentro de este polígono deberán ser capaces de disponer de capacidad de manejo de escurrimientos por condiciones de lluvia por cuenca propia.

La altura o elevación del Bordo MMH esta actualmente, bajo las condiciones resultantes del estudio COESVI en el que se precisa las elevaciones de proyecto de este bordo.

En esta etapa de este estudio, se analizaron las condiciones internas y de esta obra de mitigación hidráulica para establecer si este bordo presenta condiciones de integridad estructural.

VI. ESTUDIOS GEOFÍSICOS

Descripción de los Estudios Geofísicos realizados

Los métodos geofísicos de exploración o Ingeniería Geofísica, están constituidos por una serie de técnicas que permiten medir las variaciones de diversas propiedades físicas en los materiales que forman la corteza terrestre tales como: densidad, susceptibilidad magnética, velocidad de propagación de ondas sísmicas, resistividad eléctrica o la radioactividad natural de las rocas, entre otras. La medición y distribución de estas variaciones, permite inferir algunas condiciones litológicas y estructurales del subsuelo, correlacionando los valores medidos o zonas anómalas, con los efectos calculados de los modelos de laboratorio, en los que se conocen las relaciones causa-efecto en términos de una función matemática.

En los métodos eléctricos la circulación de la corriente en el terreno, ocasiona diferencias de potencial, cuya magnitud, depende de la distribución de las resistividades en el subsuelo respecto a los diferentes tipos de materiales que lo constituyen. Las diferencias de tensión o de potencial se miden entre dos puntos del terreno, mediante el uso de un voltímetro de alta precisión integrado al sistema y con electrodos de inyección de corriente que se colocan en la superficie del terreno.

En el caso de los métodos sísmico se determinan las condiciones elásticas del subsuelo a través de mediciones de velocidad sísmica; parámetro que a su vez depende funcionalmente de la densidad. Este enfoque es considerado el más

certero en prospección geotécnica, ya que permite el perfilado continuo de las propiedades elásticas (mecánicas) del subsuelo.

Es importante aclarar que los métodos geofísicos son una herramienta de prospección, cuyo alcance es el inferir de forma indirecta las propiedades físicas del subsuelo, y que, aunque reduzca notablemente los gastos de sondeos exploratorios directos, no excluye estos últimos. Por lo que el modelo geológico debe ser calibrado mediante extracción de muestras *in-situ*, para finalmente ser extrapolado a un volumen continuo a través de los perfiles geofísicos.

VI.1. Tomografías Eléctricas Resistivas (TER's)

La Tomografía Eléctrica Resistiva es una técnica geofísica que genera secciones o perfiles del subsuelo en base a mediciones de caída de potencial eléctrico. Éste método consiste en inyectar una corriente al interior del suelo, la cual, regresa al voltímetro en forma de una diferencia de potencial (ΔV) producto de las variaciones en resistencias que resultan de cada tipo de material o estrato del suelo (Figura IV.1.1). Sabiendo de antemano que cada tipo de material tiene diferente manera de "resistir" una corriente eléctrica, los buenos conductores presentan una resistencia baja a la inyección de corriente, mientras que materiales aislantes presentan resistencias eléctricas mayores. Lo anterior, es relativo a diversos parámetros geológicos como el contenido mineralógico, porosidad y grado de saturación de agua. Durante décadas, los Estudio de Resistividad Eléctrica han sido utilizados en investigación sobre hidrogeología, geotecnia y también actualmente en estudios ambientales (Loke 2004).

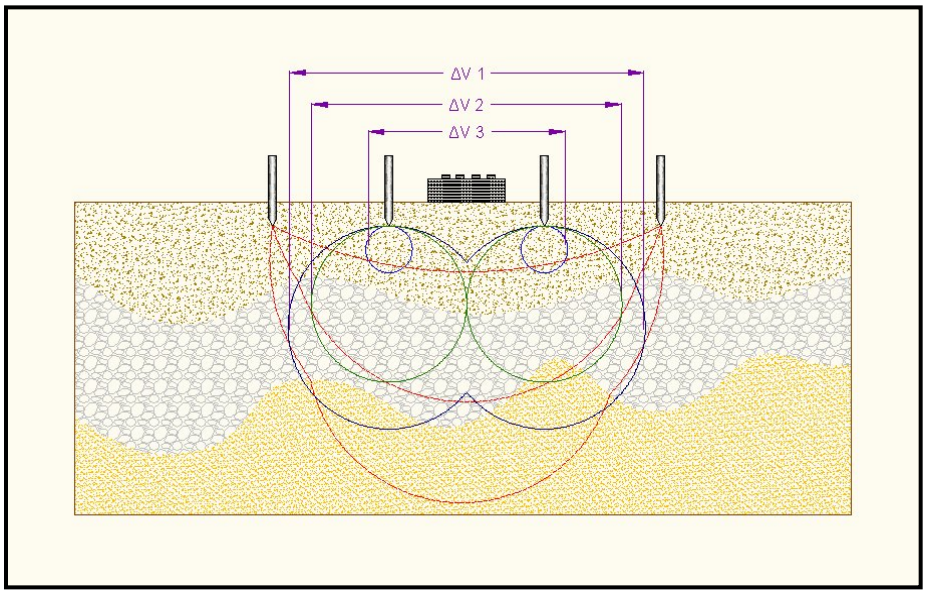


Figura IV.1.1. Método de inyección de corriente y variación de potencial eléctrico.

Existen diversos arreglos electródicos para determinar la resistividad del subsuelo (Figura IV.1.2), dependiendo de la configuración geométrica de electrodos (espaciamiento y colocación de electrodos de corriente y potencial) varía la profundidad y resolución de exploración.

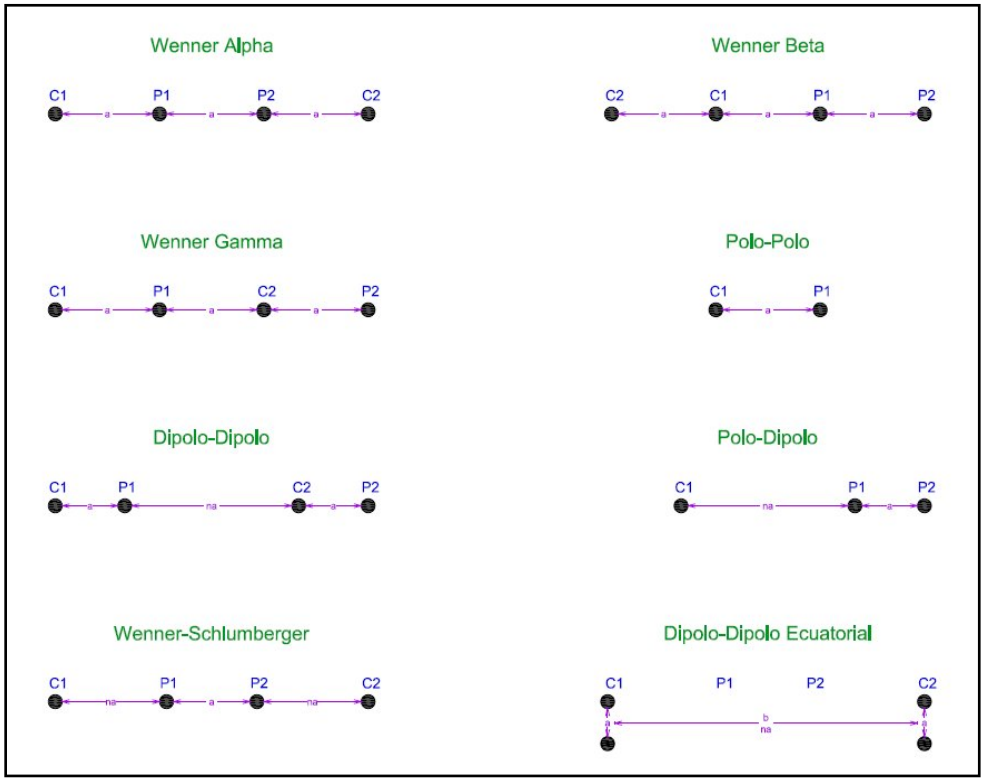
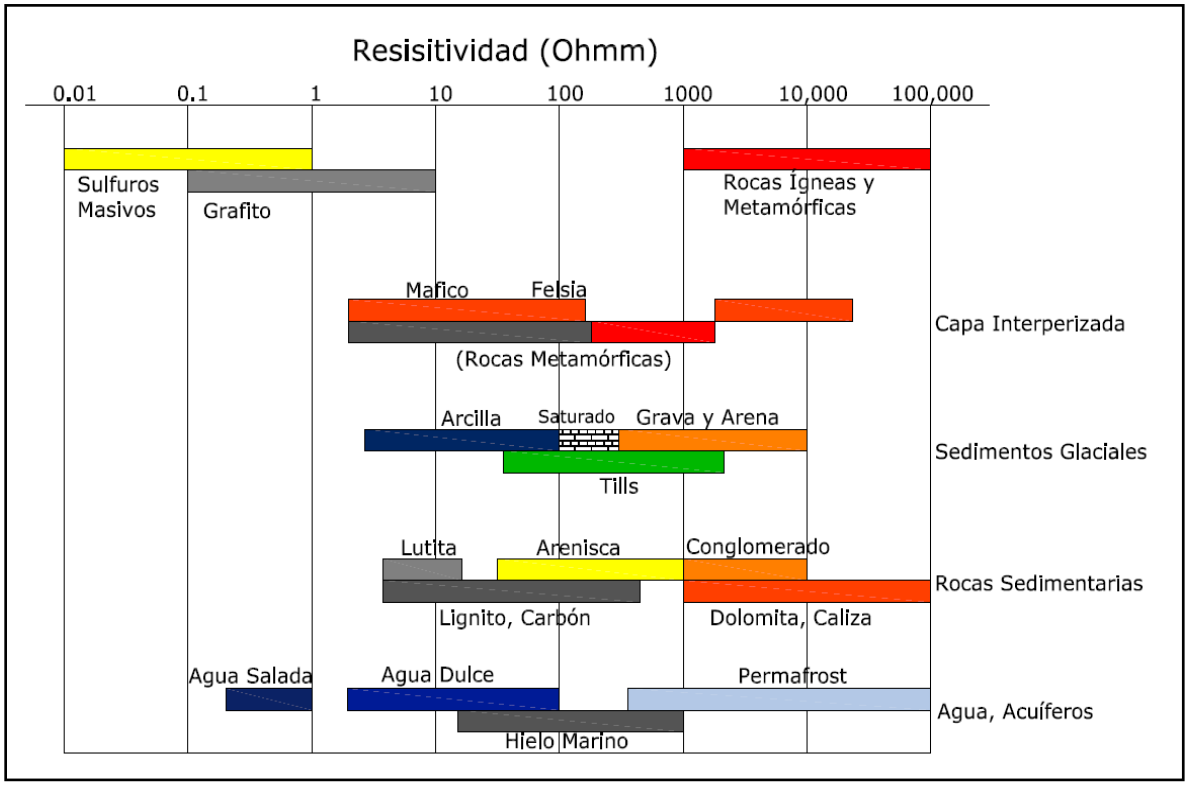


Figura IV.1.2 Arreglos electródicos en resistividad. C1, C2 y P1, P2 denotan la posición de los electrodos de corriente y potencial respectivamente.

VI.2. Resistividad

La resistividad eléctrica es una propiedad física de todos los materiales, no siendo la excepción los materiales geológicos que conforman la matriz del subsuelo. En general, los materiales de tamaño de grano grande, como arenas y gravas (no saturados), son más resistivos que los de granulometría fina como limos y arcilla (Doser et al., 2004).

Tabla I. Valores de resistividades comunes de las rocas y minerales (Palacky, 1987).



VI.3. Metodología de Adquisición de Datos

Para obtener la estratigrafía resistiva del subsuelo, se procedió utilizar el arreglo *Wenner alpha*, el cual fue pre-programado en el equipo multielectrodo inteligente ABEM Terrameter SAS-4000, generando la inyección de corriente y registrando el diferencial de potencial. La forma conceptual de la colocación de electrodos en el arreglo consiste en dos electrodos de acero (C1 y C2) para la inyección de corriente y dos electrodos de cobre (P1 y P2) para capturar la diferencia de potencial (Figura IV.3.1); los electrodos de corriente se colocan a una distancia mayor del centro del arreglo en comparación de los de potencial.

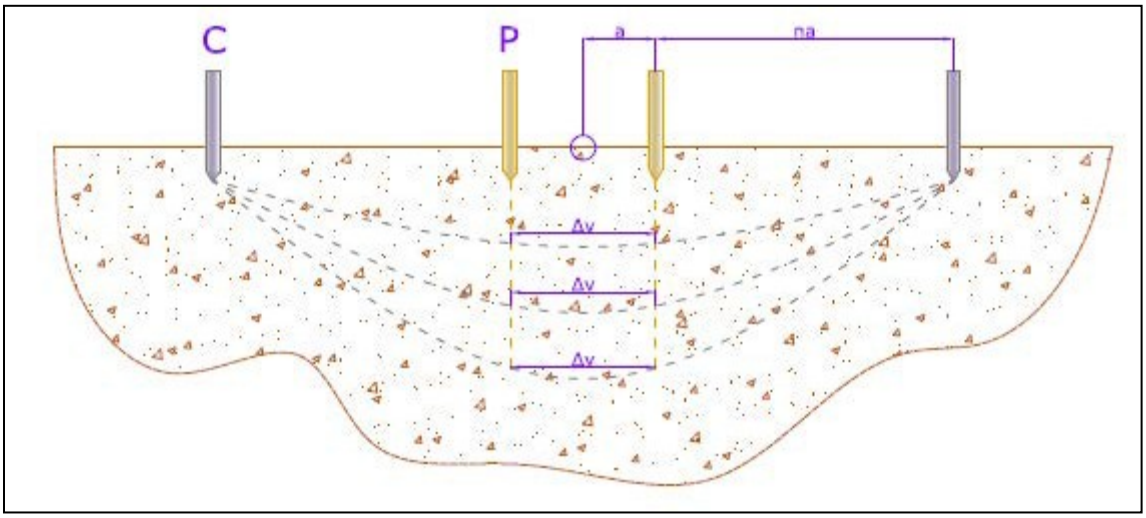


Figura IV.3.1 Fundamento básico de la Tomografía Eléctrica Resistiva.

VI.4. Procesamiento

Para el procesamiento de los datos de campo se utilizó el software RES2DINV, programa utilizado para interpolar a interpretar datos de resistividad. La inversión de los datos es elaborada por el método de mínimos cuadrados que envuelve métodos de elementos y diferencias finitas. El software acepta los distintos arreglos de tomografía (Wenner, Polo-Dipolo, Dipolo-Dipolo, Schlumberger, etc.) y como resultado mapea secciones transversales donde las resistividades quedan escaladas por contrastes de color, facilitando la interpretación de la TER (Figura VI.4.1).

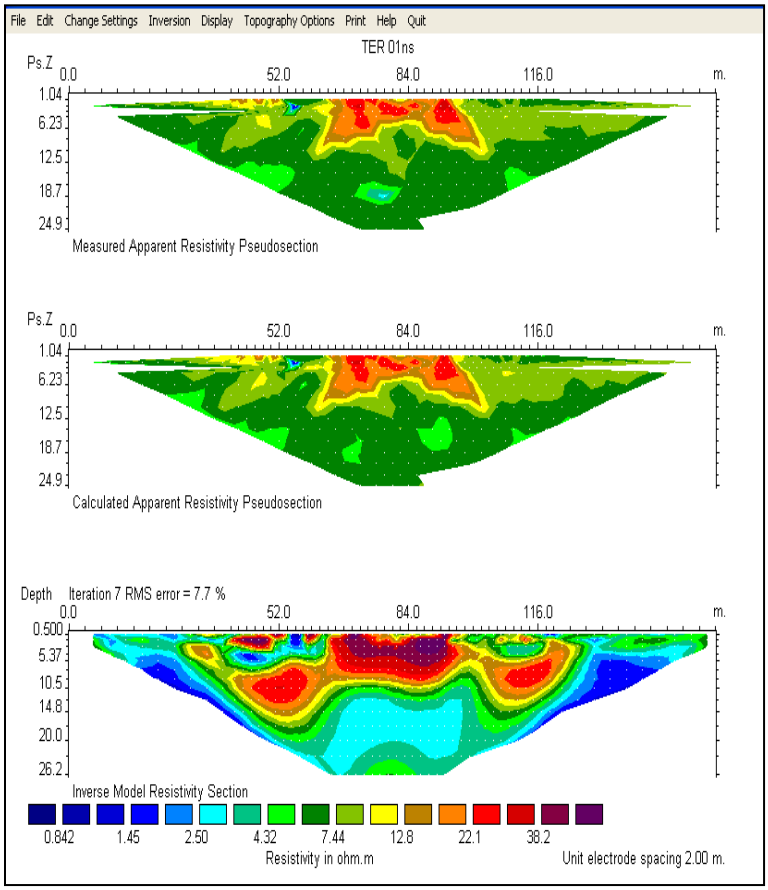


Figura VI.4.1 Sección invertida desplegada en el programa RES2DINV.

VII. TRABAJO DE CAMPO

Se realizaron cincuenta y dos (52) tendidos eléctricos resistivos de 40 m cada uno con una orientación Noroeste-Sureste, a lo largo del Bordo Miguel de la Madrid Hurtado (Figura VII.1). Las 52 secciones correspondientes a la adquisición en campo, se muestran a partir de las Figuras VII.2 a la VII.53.

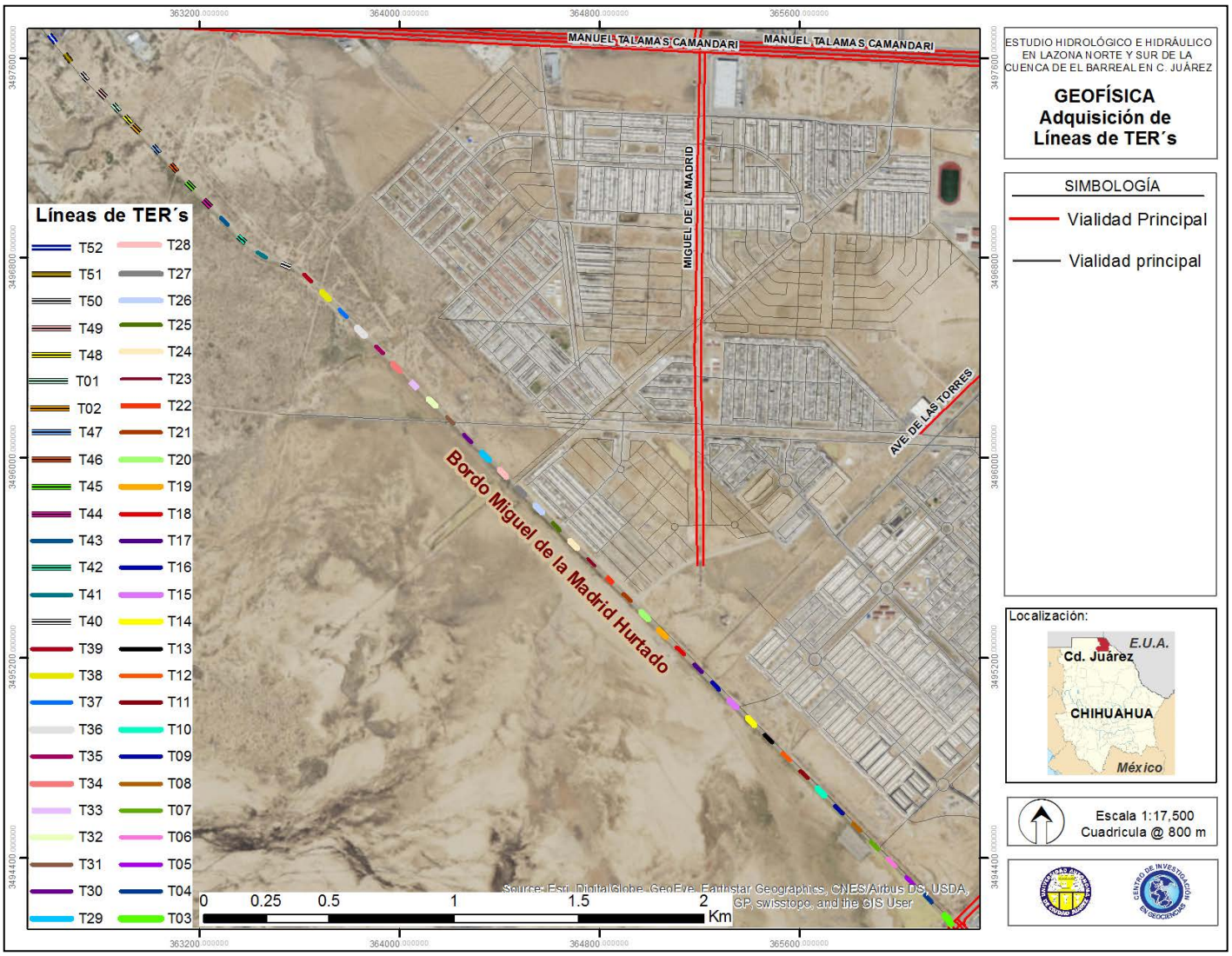


Figura VII.1 Localización de las 52 líneas de TER´s en el BMMH.

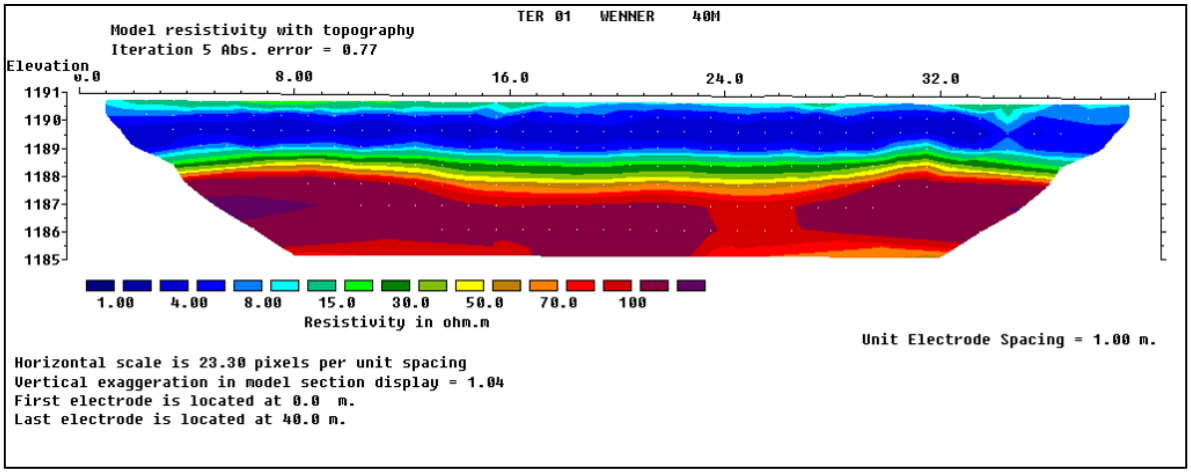


Figura VII.2. Sección TER 01, con orientación Noroeste-Sureste.

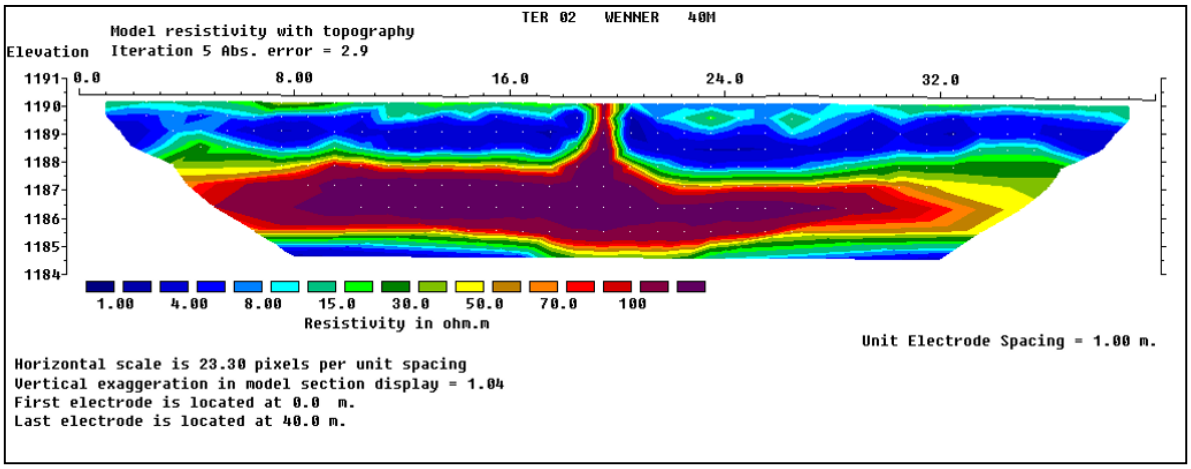


Figura VII.3. Sección TER 02, con orientación Noroeste-Sureste.

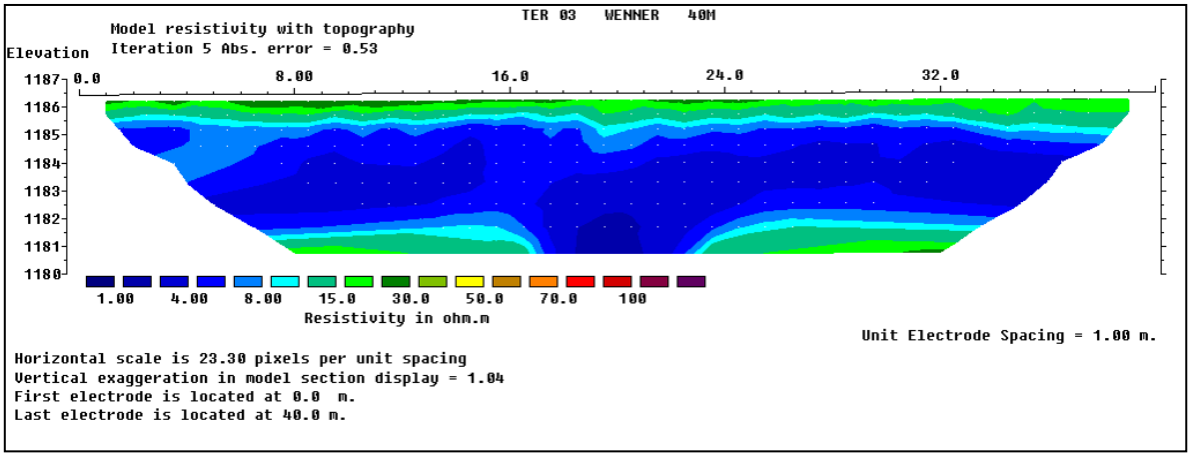


Figura VII.4. Sección TER 03, con orientación Noroeste-Sureste.

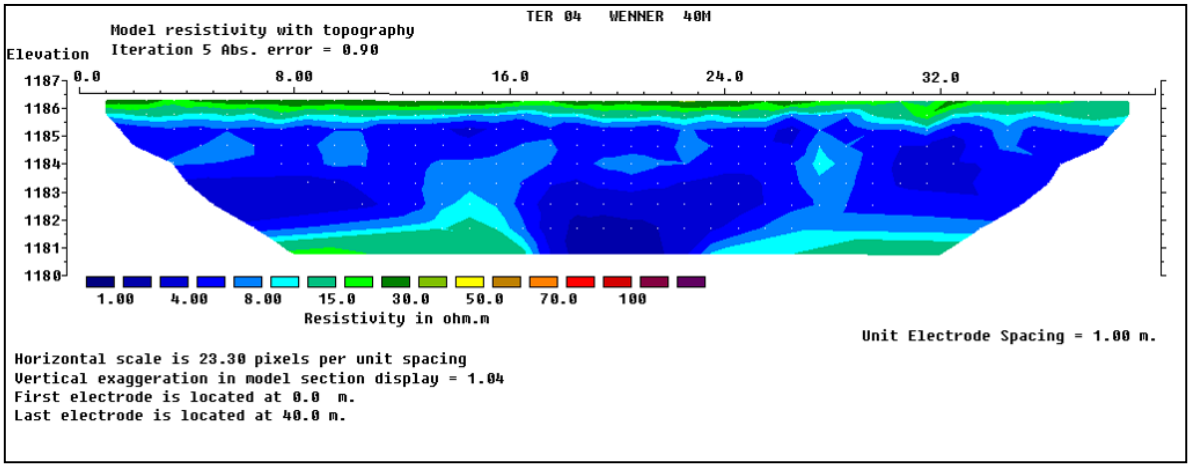


Figura VII.5. Sección TER 04, con orientación Noroeste-Sureste.

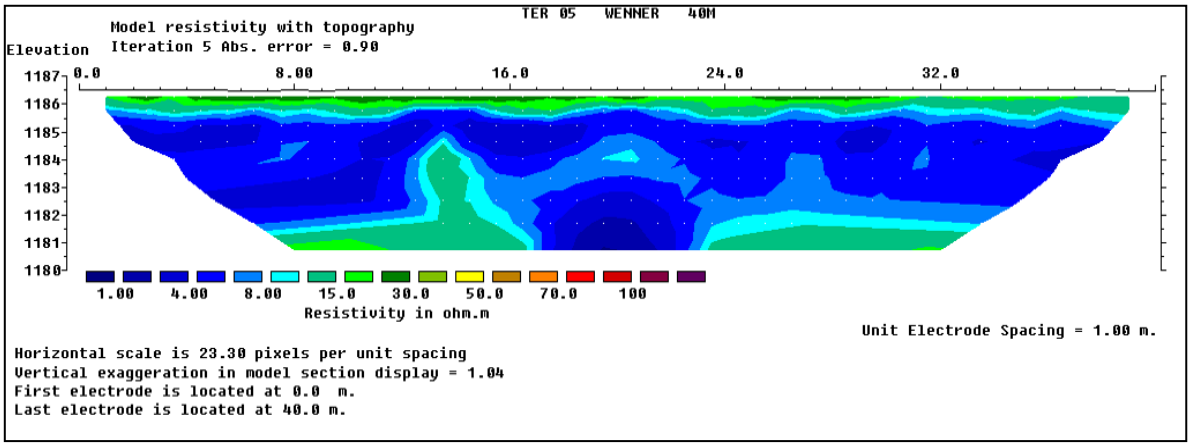


Figura VII.6. Sección TER 05, con orientación Noroeste-Sureste.

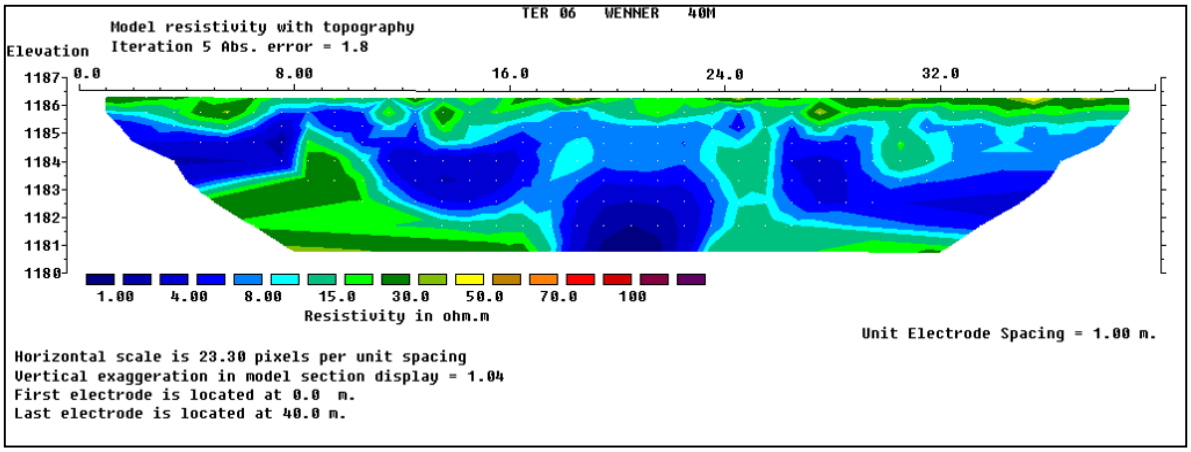


Figura VII.7. Sección TER 06, con orientación Noroeste-Sureste.

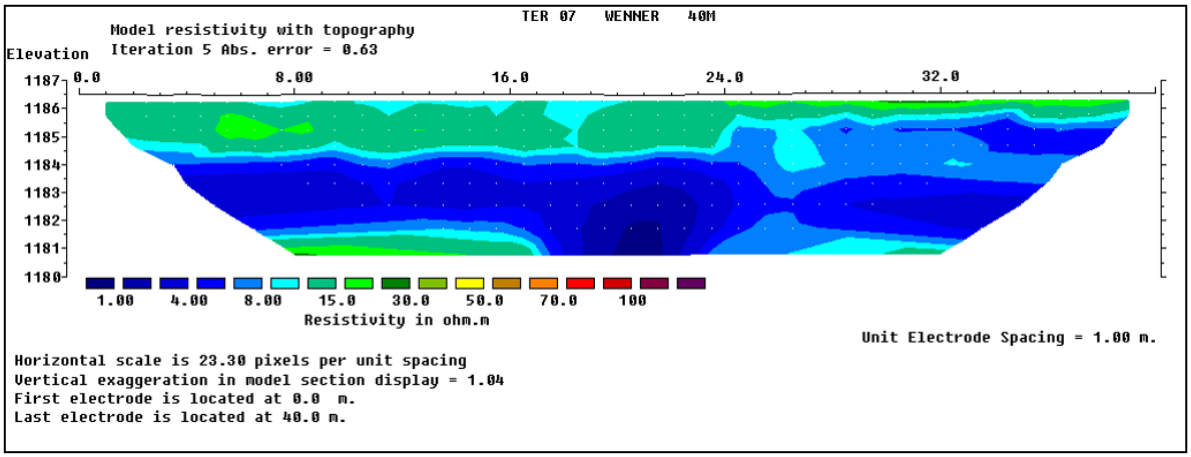


Figura VII.8. Sección TER 07, con orientación Noroeste-Sureste.

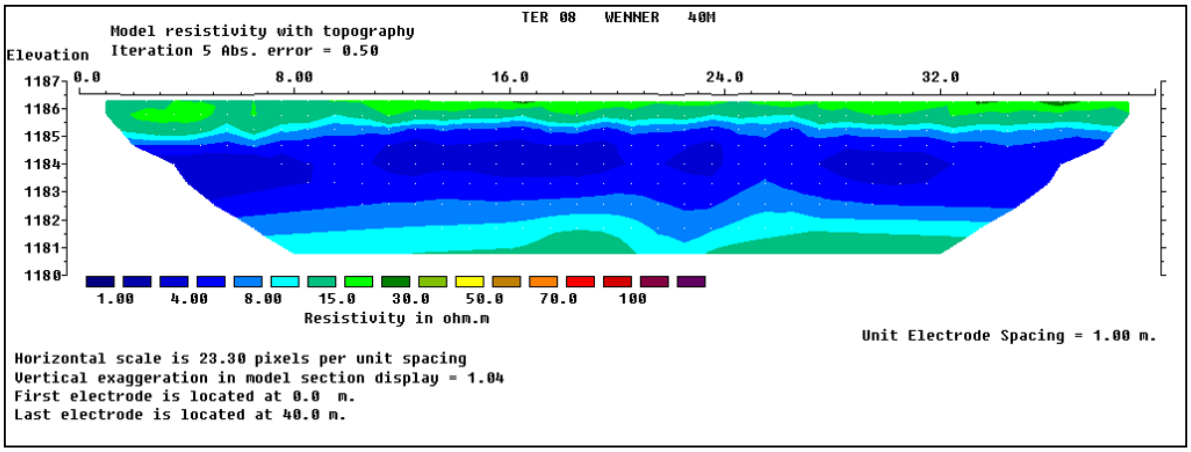


Figura VII.9. Sección TER 08, con orientación Noroeste-Sureste.

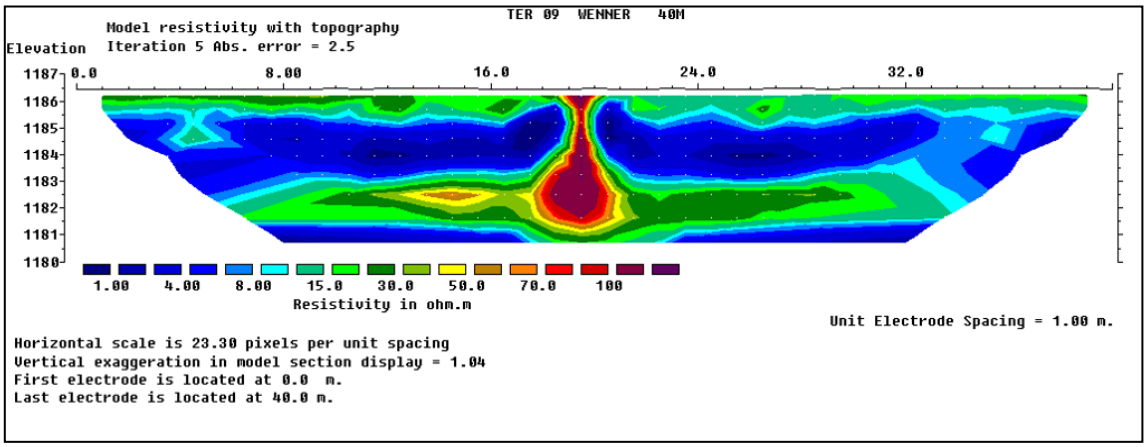


Figura VII.10. Sección TER 09, con orientación Noroeste-Sureste.

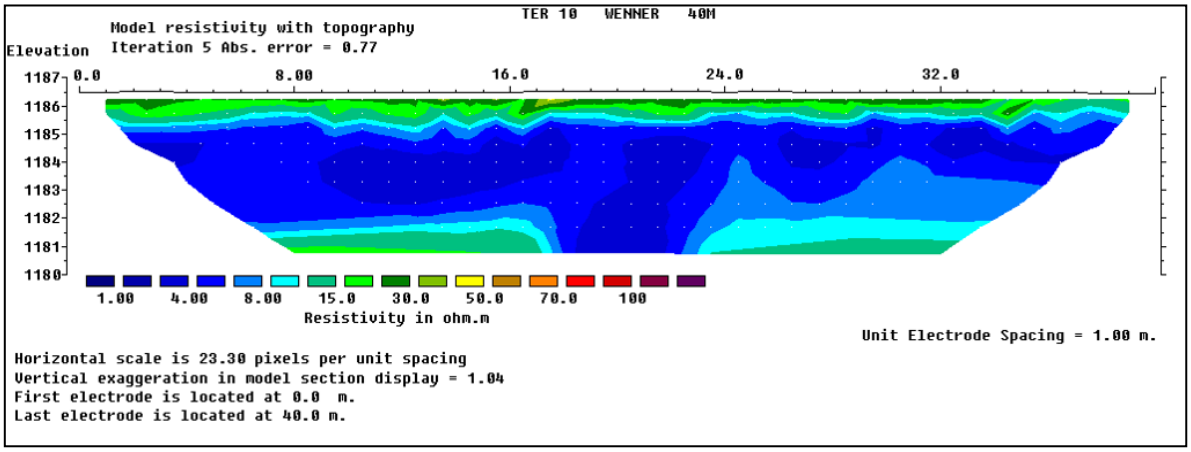


Figura VII.11. Sección TER 10, con orientación Noroeste-Sureste.

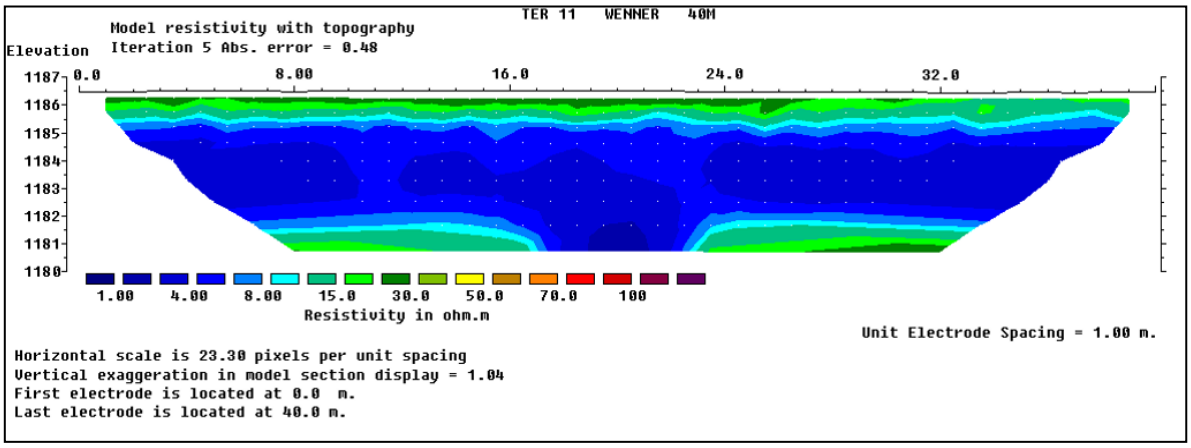


Figura VII.12. Sección TER 11, con orientación Noroeste-Sureste.

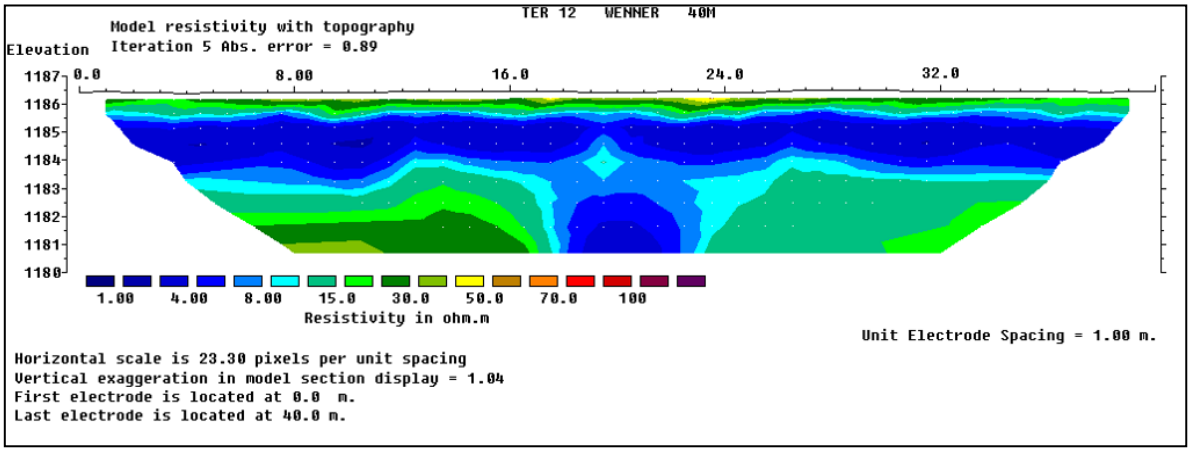


Figura VII.13. Sección TER 12, con orientación Noroeste-Sureste.

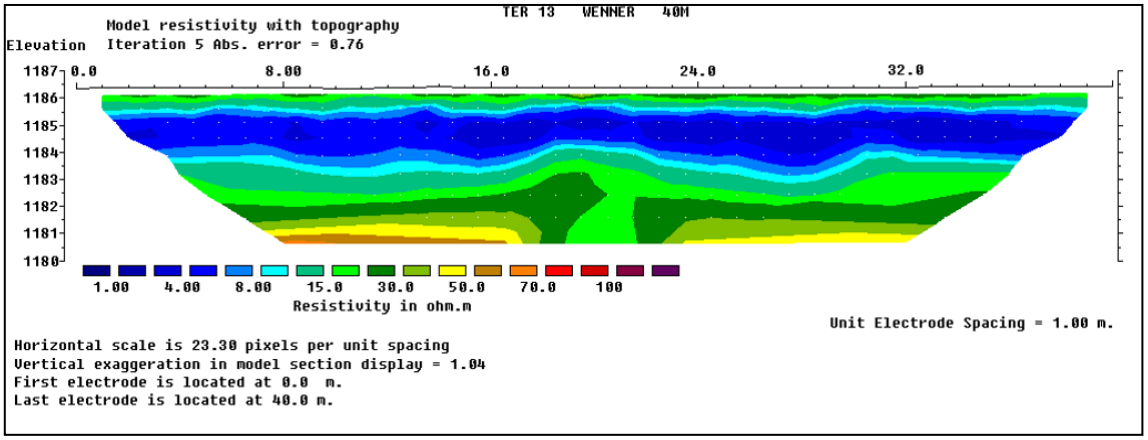


Figura VII.14. Sección TER 13, con orientación Noroeste-Sureste.

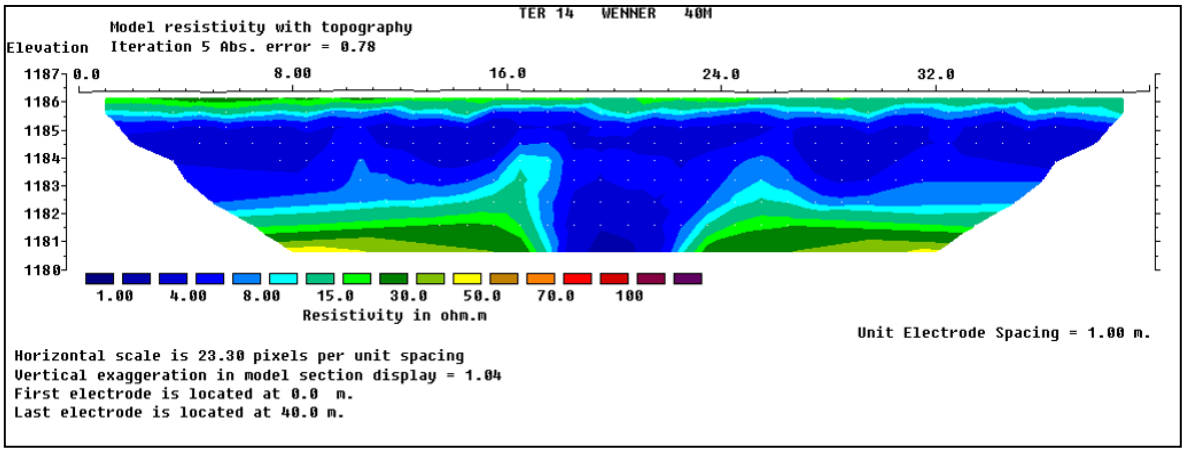


Figura VII.15. Sección TER 14, con orientación Noroeste-Sureste.

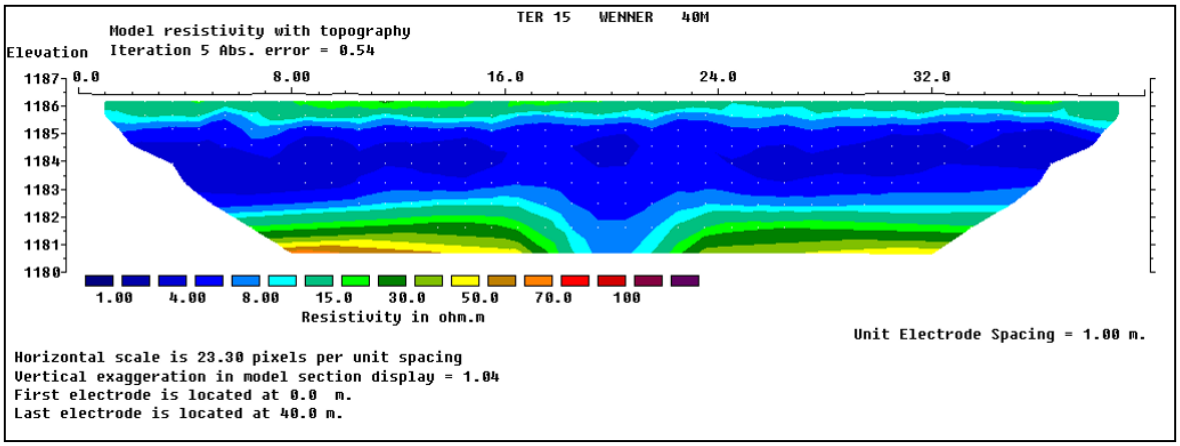


Figura VII.16. Sección TER 15, con orientación Noroeste-Sureste.

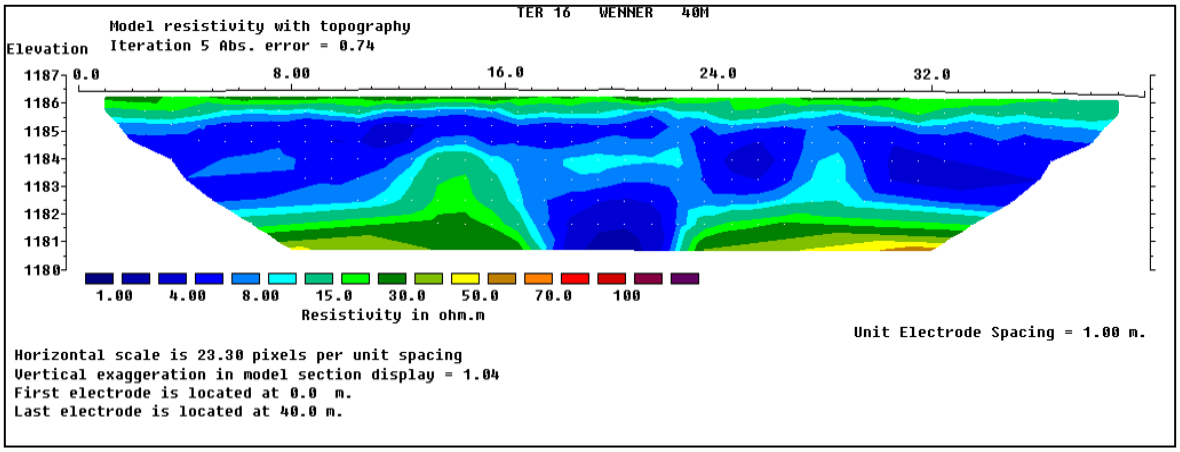


Figura VII.17. Sección TER 16, con orientación Noroeste-Sureste.

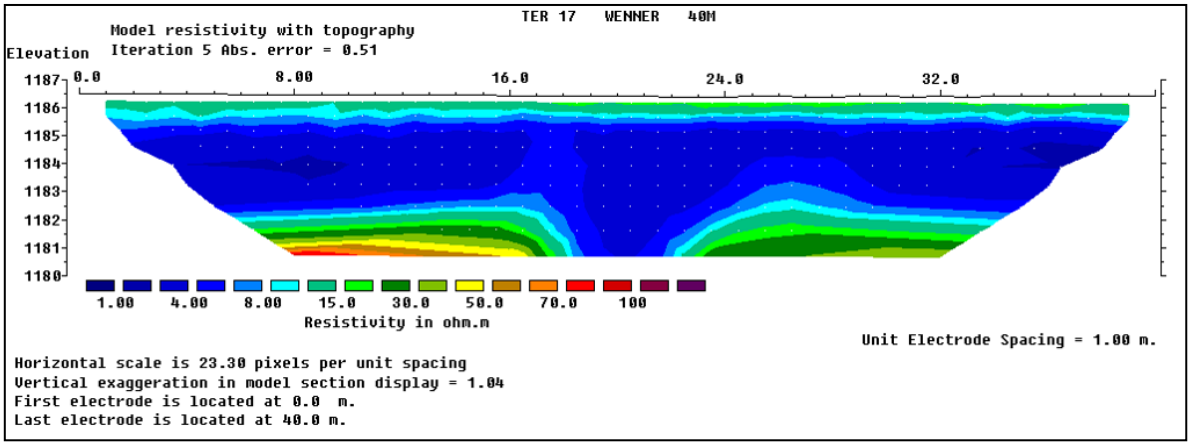


Figura VII.18. Sección TER 17, con orientación Noroeste-Sureste.

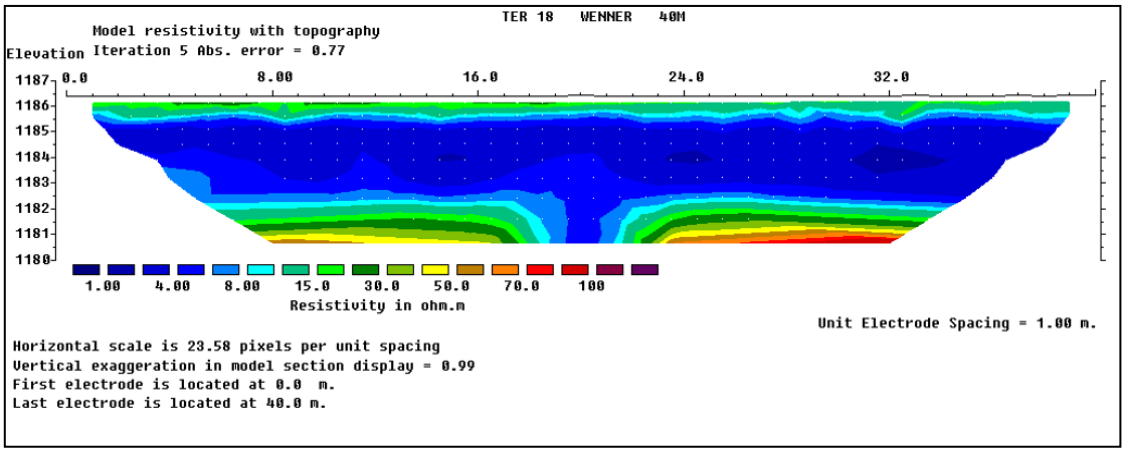


Figura VII.19. Sección TER 18, con orientación Noroeste-Sureste.

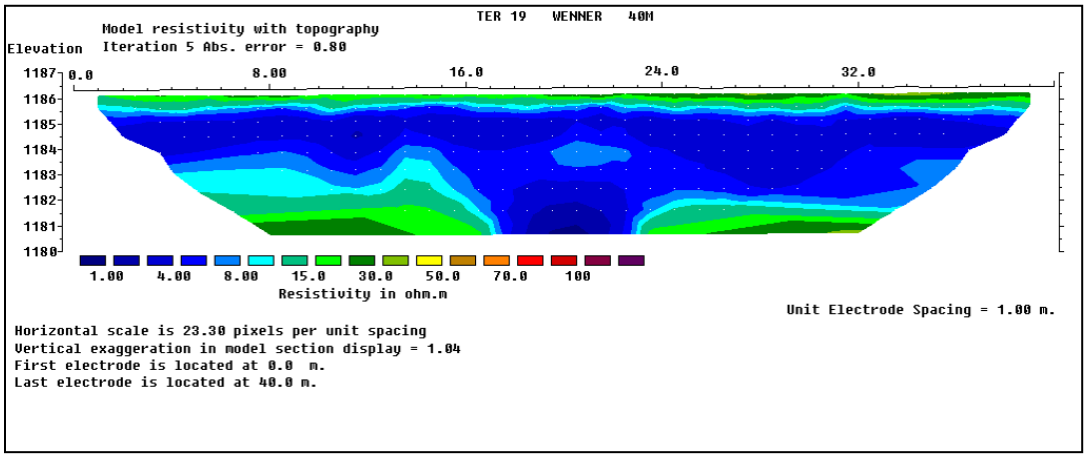


Figura VII.20. Sección TER 19, con orientación Noroeste-Sureste.

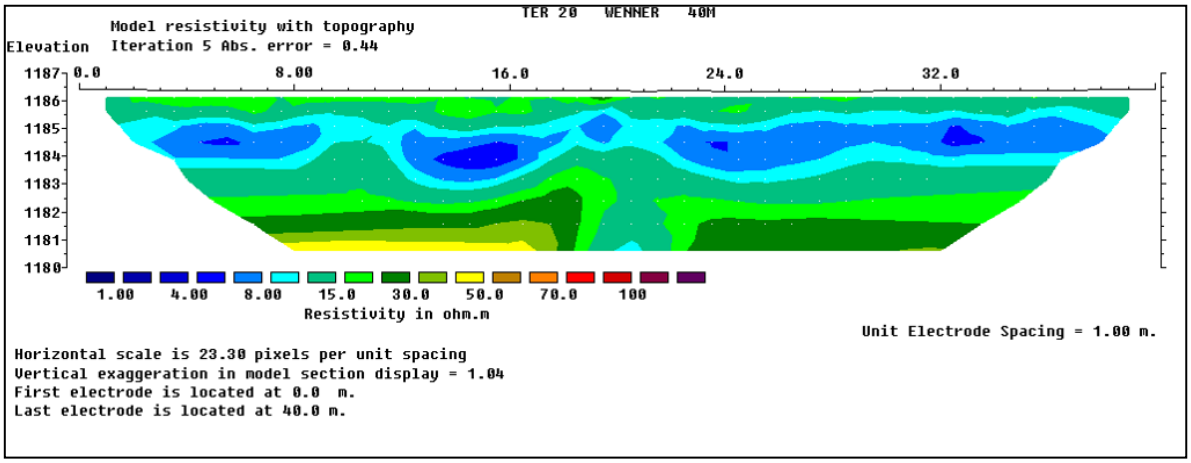


Figura VII.21. Sección TER 20, con orientación Noroeste-Sureste.

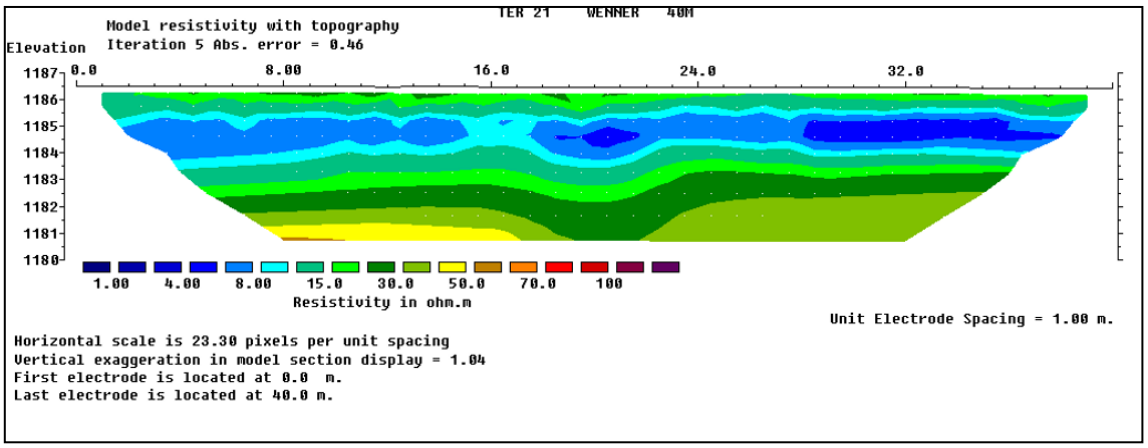


Figura VII.22. Sección TER 21, con orientación Noroeste-Sureste.

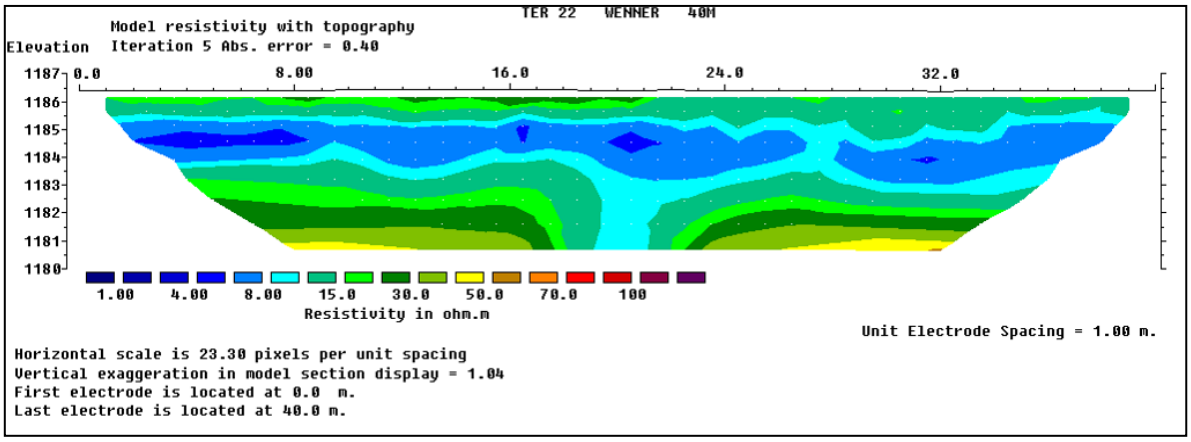


Figura VII.23. Sección TER 22, con orientación Noroeste-Sureste.

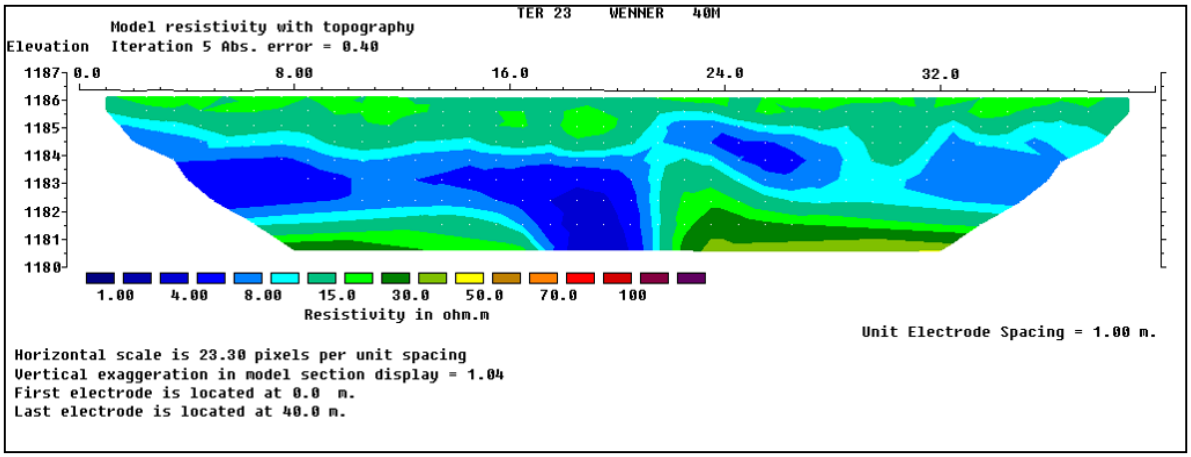


Figura VII.24. Sección TER 23, con orientación Noroeste-Sureste.

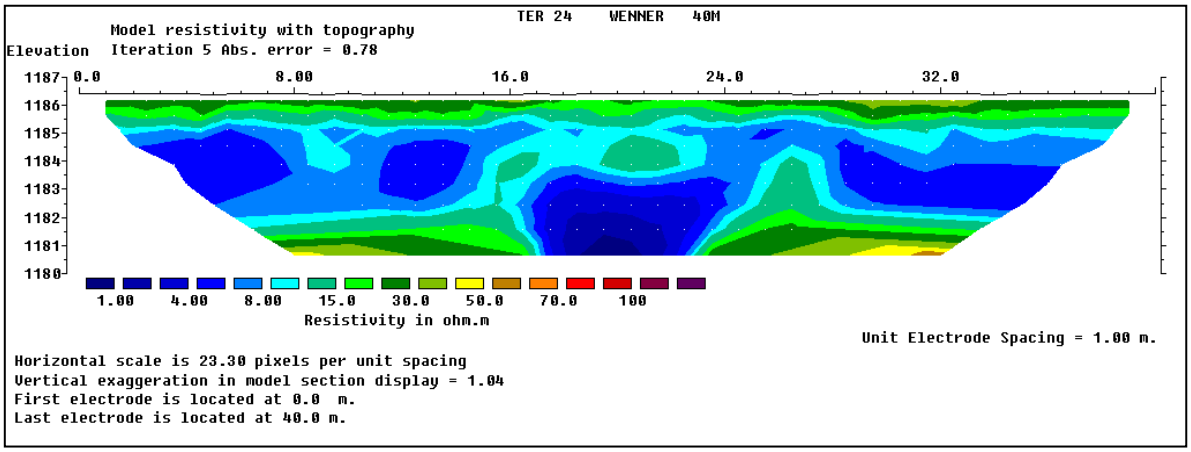


Figura VII.25. Sección TER 24, con orientación Noroeste-Sureste.

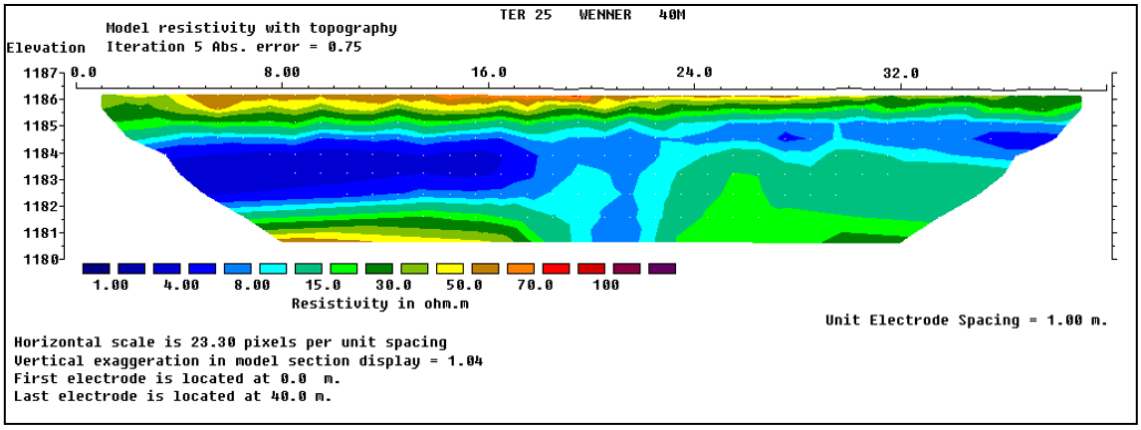


Figura VII.26. Sección TER 25, con orientación Noroeste-Sureste.

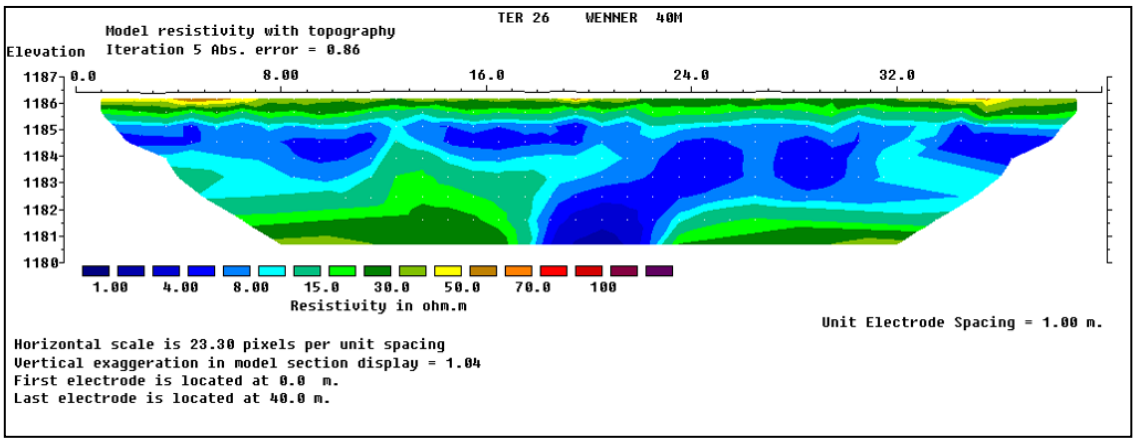


Figura VII.27. Sección TER 26, con orientación Noroeste-Sureste.

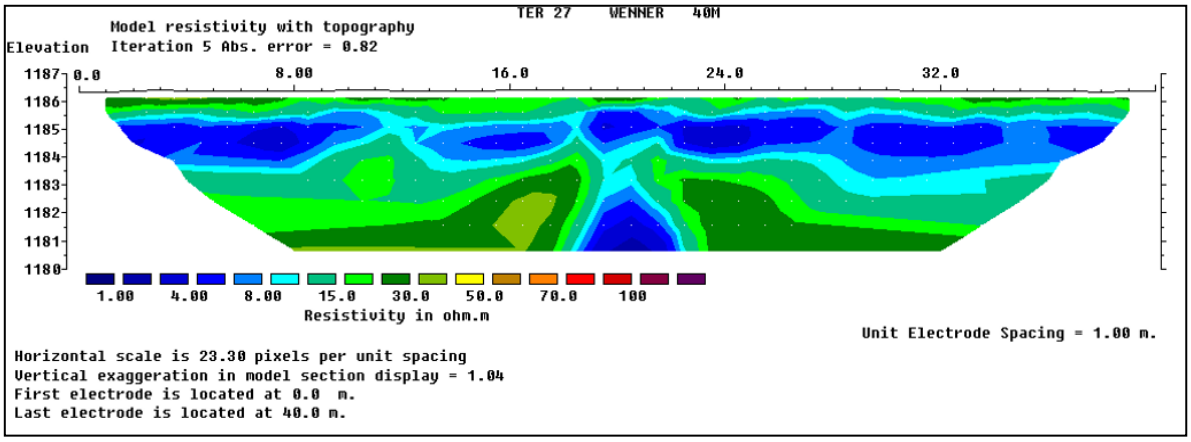


Figura VII.28. Sección TER 27, con orientación Noroeste-Sureste.

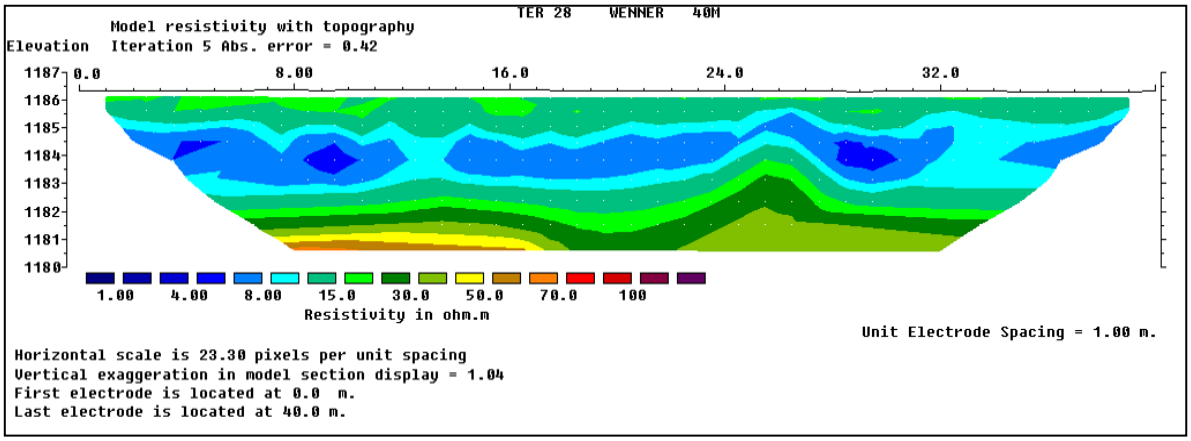


Figura VII.29. Sección TER 28, con orientación Noroeste-Sureste.

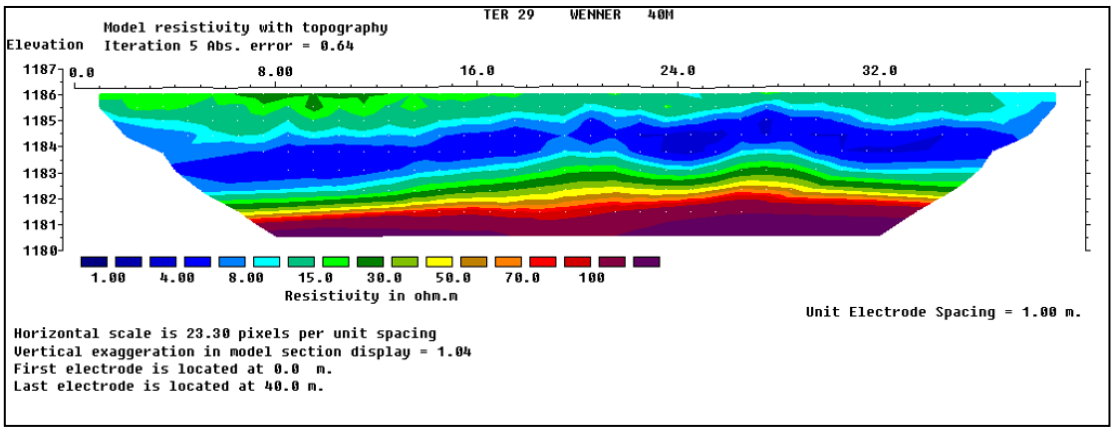


Figura VII.30. Sección TER 29, con orientación Noroeste-Sureste.

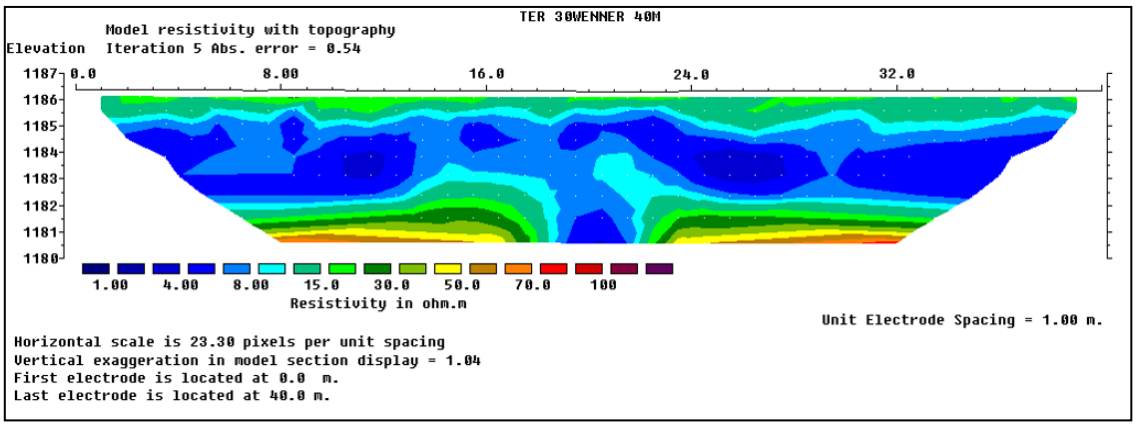


Figura VII.31. Sección TER 30, con orientación Noroeste-Sureste.

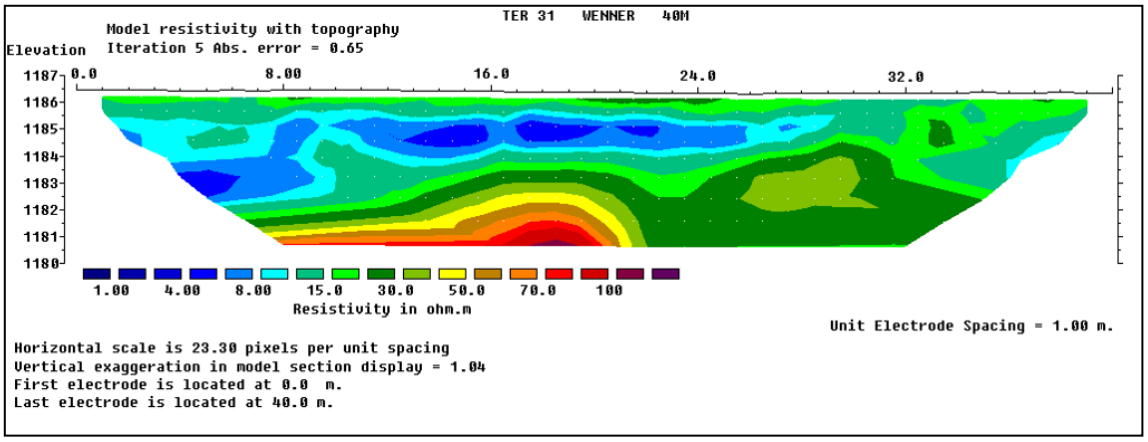


Figura VII.32. Sección TER 31, con orientación Noroeste-Sureste.

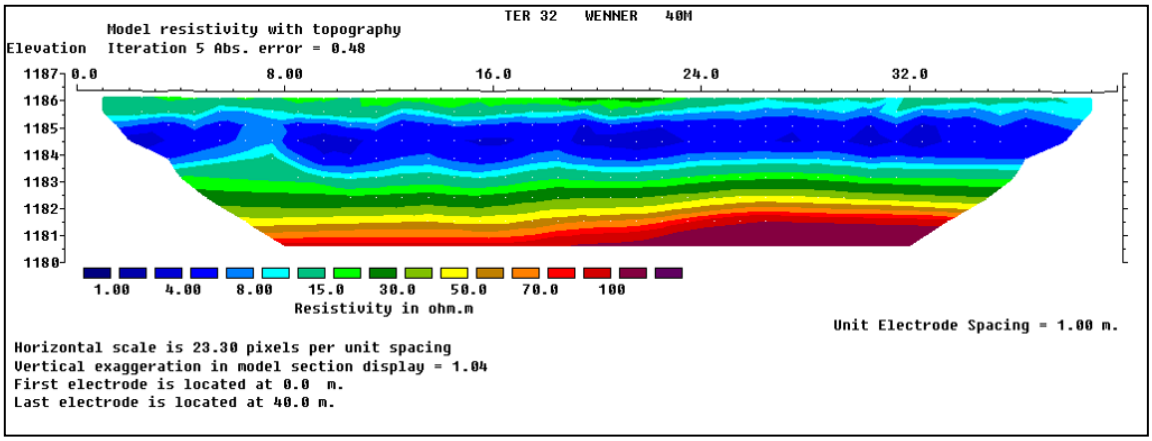


Figura VII.33. Sección TER 32, con orientación Noroeste-Sureste.

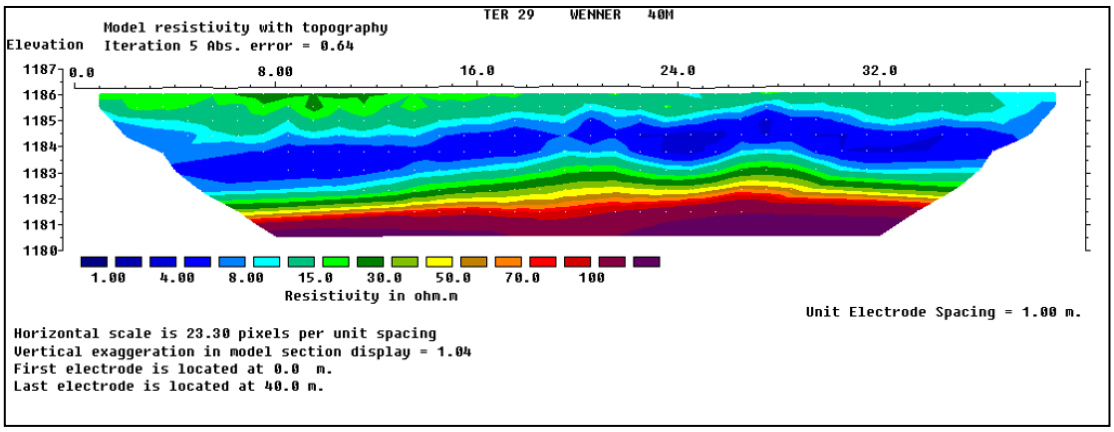


Figura VII.30. Sección TER 29, con orientación Noroeste-Sureste.

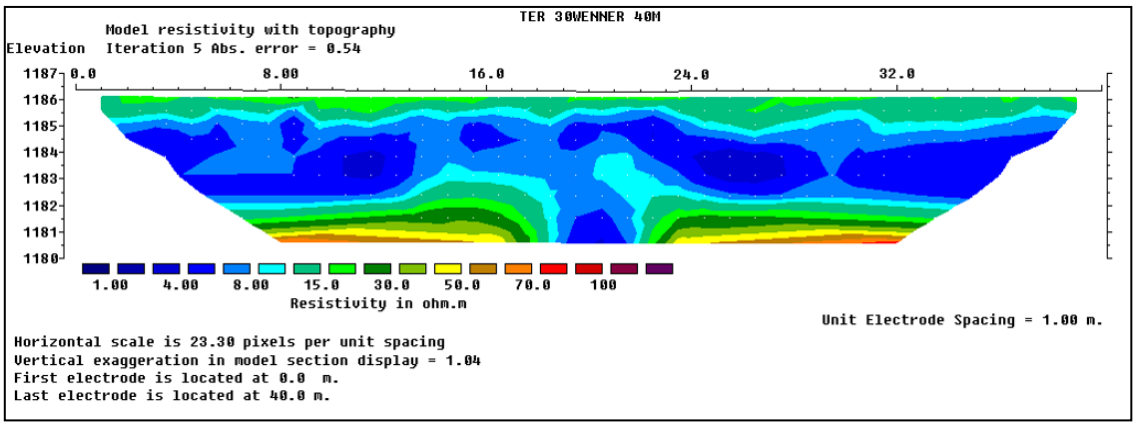


Figura VII.31. Sección TER 30, con orientación Noroeste-Sureste.

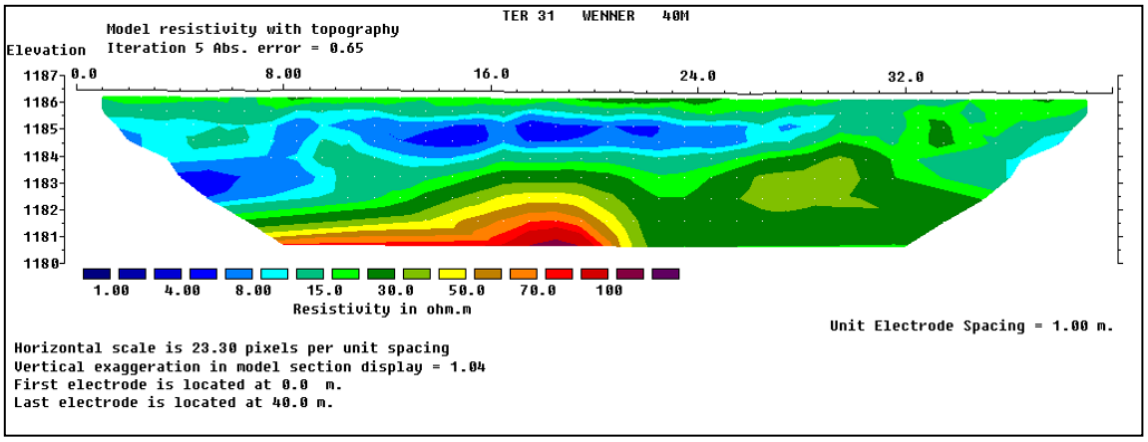


Figura VII.32. Sección TER 31, con orientación Noroeste-Sureste.

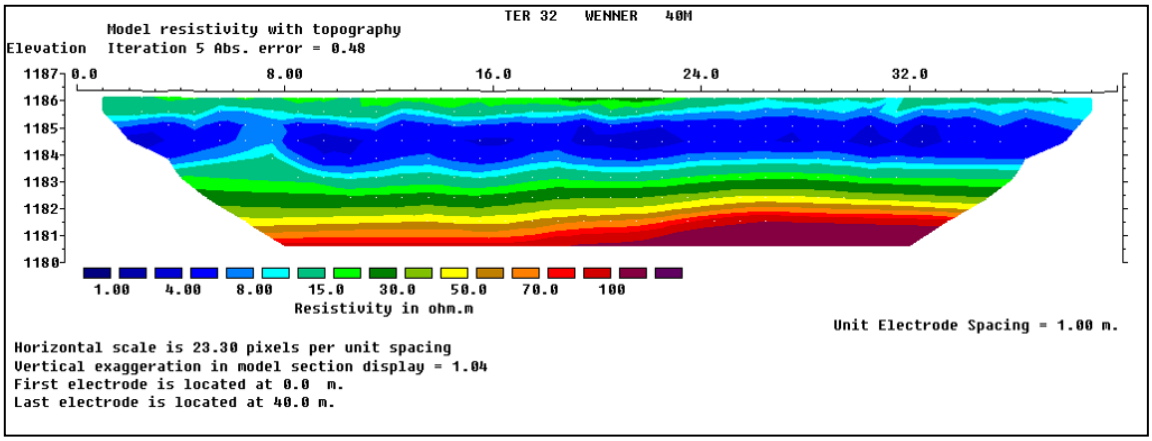


Figura VII.33. Sección TER 32, con orientación Noroeste-Sureste.

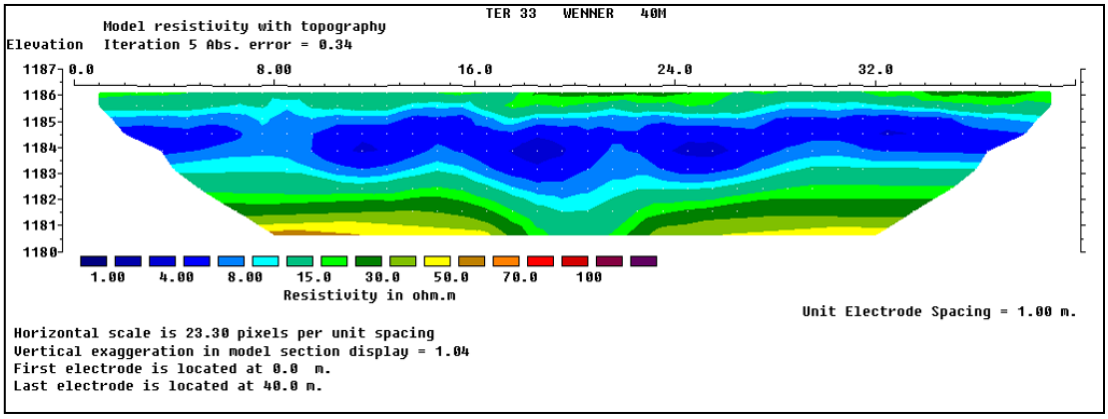


Figura VII.34. Sección TER 33, con orientación Noroeste-Sureste.

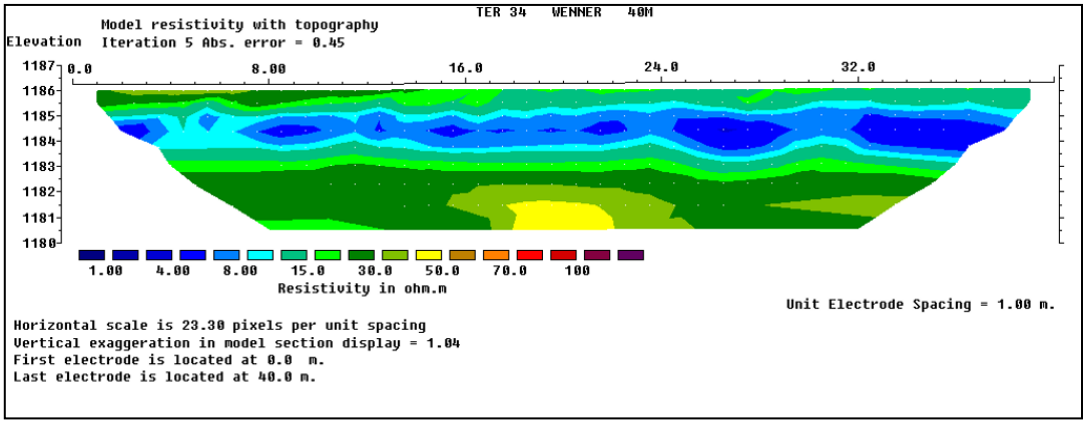


Figura VII.35. Sección TER 34, con orientación Noroeste-Sureste.

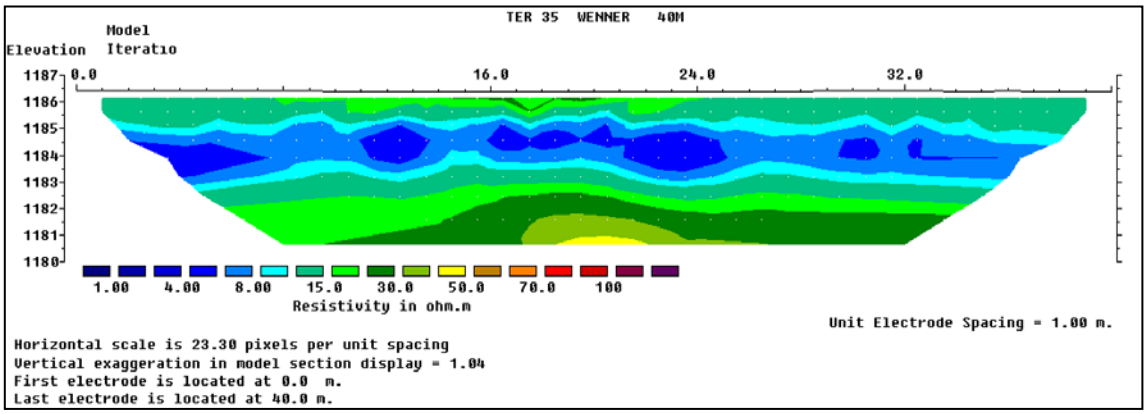


Figura VII.36. Sección TER 35, con orientación Noroeste-Sureste.

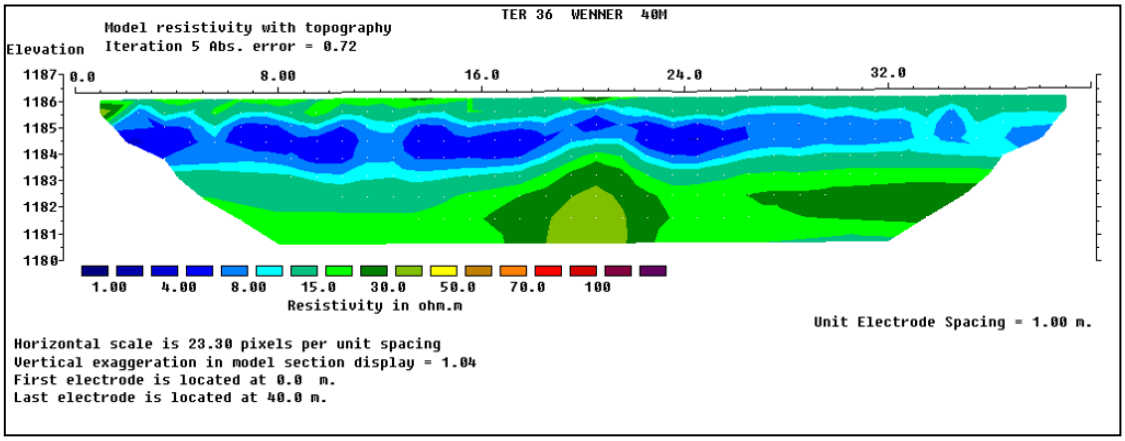


Figura VII.37. Sección TER 36, con orientación Noroeste-Sureste.

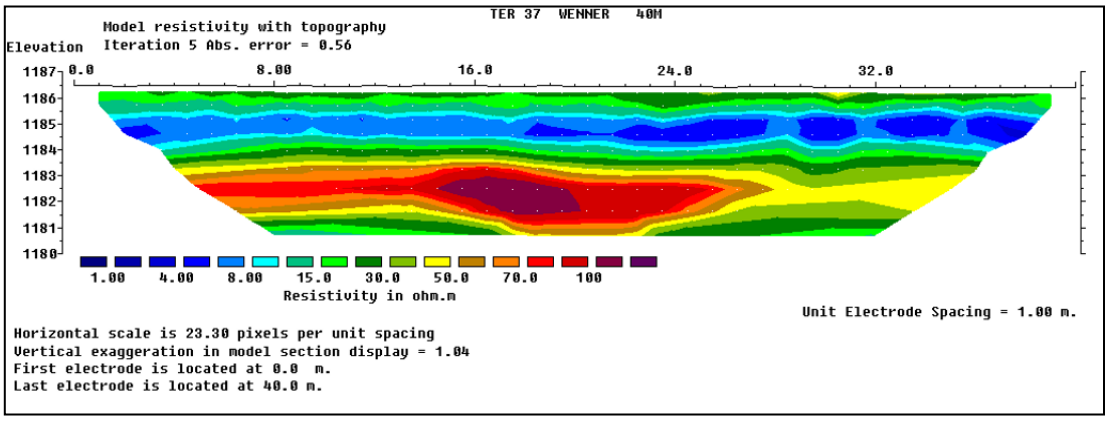


Figura VII.38. Sección TER 37, con orientación Noroeste-Sureste.

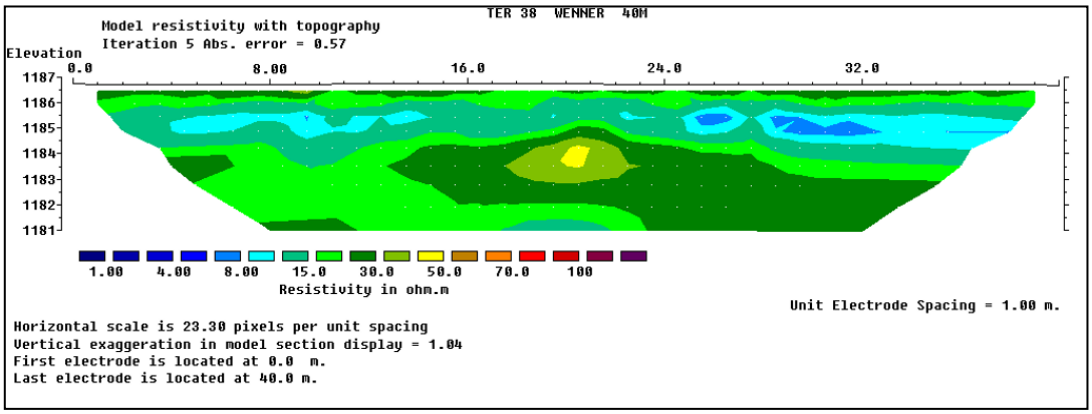


Figura VII.39. Sección TER 38, con orientación Noroeste-Sureste.

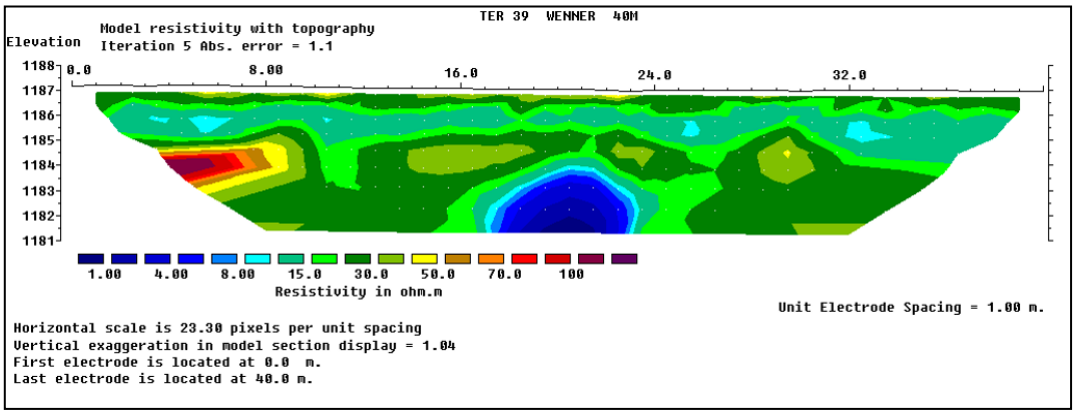


Figura VII.40. Sección TER 39, con orientación Noroeste-Sureste.

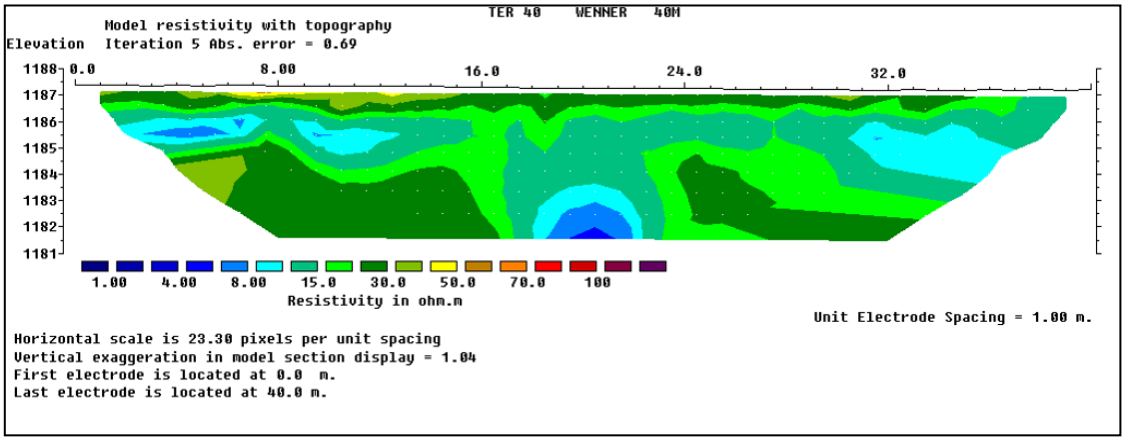


Figura VII.41. Sección TER 40, con orientación Noroeste-Sureste.

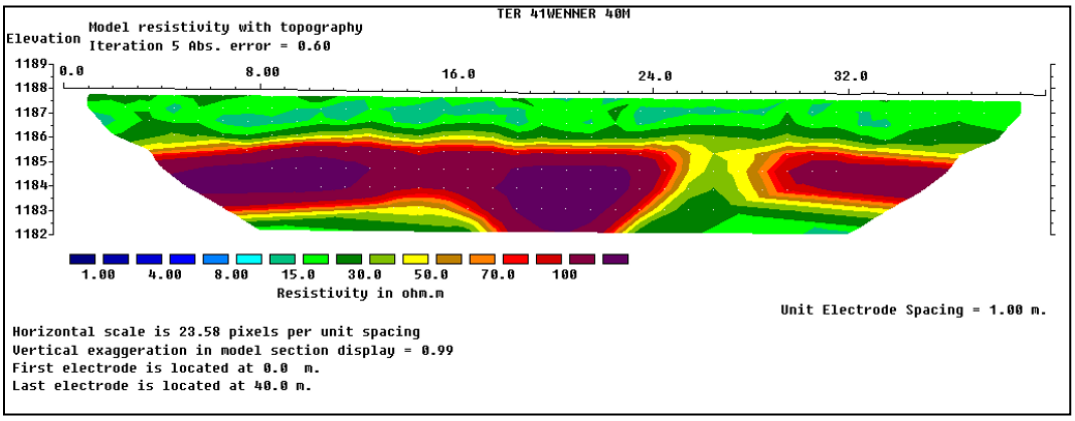


Figura VII.42. Sección TER 41, con orientación Noroeste-Sureste.

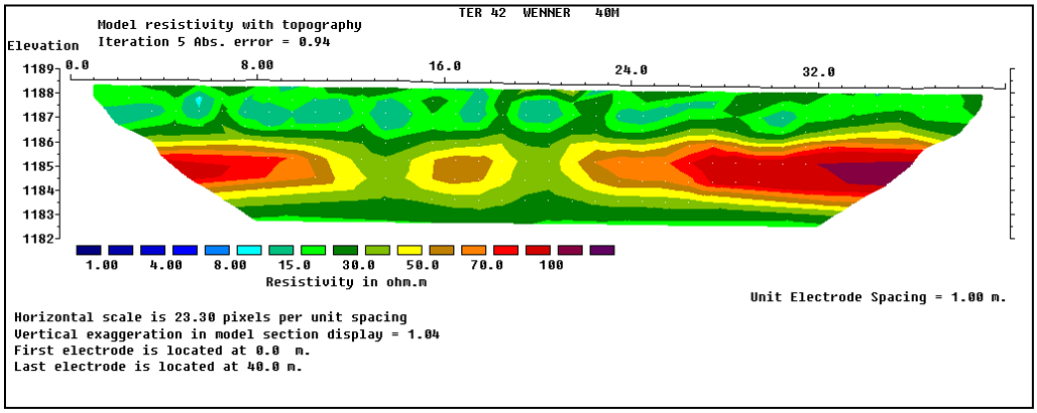


Figura VII.43. Sección TER 42, con orientación Noroeste-Sureste.

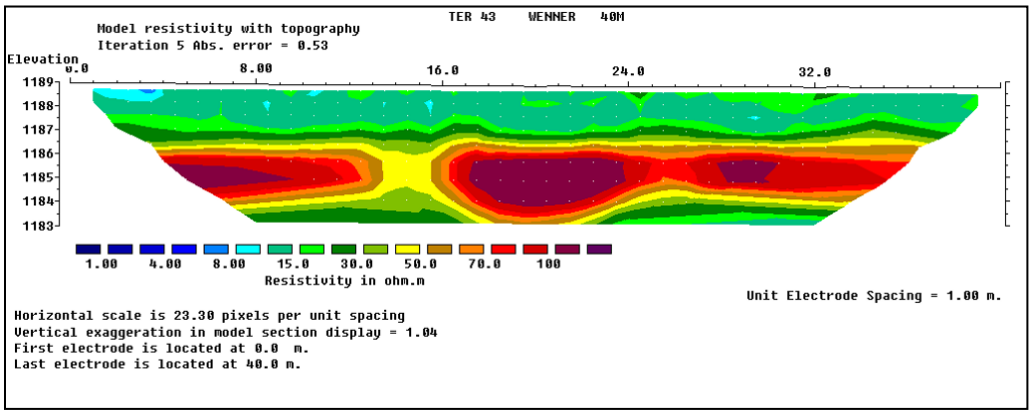


Figura VII.44. Sección TER 43, con orientación Noroeste-Sureste.

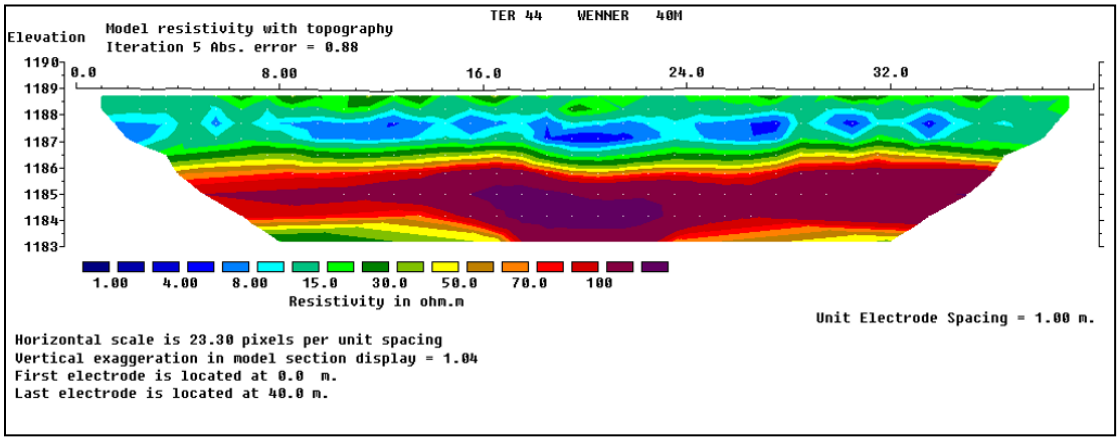


Figura VII.45. Sección TER 44, con orientación Noroeste-Sureste.

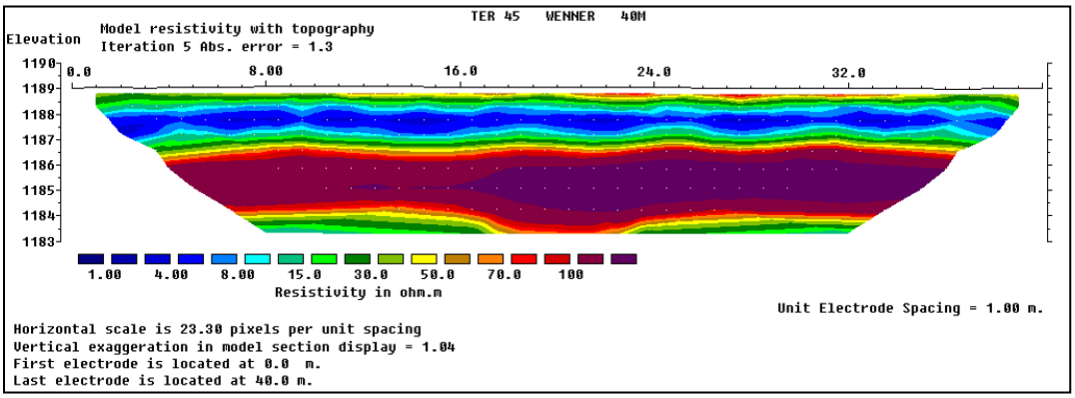


Figura VII.46. Sección TER 45, con orientación Noroeste-Sureste.

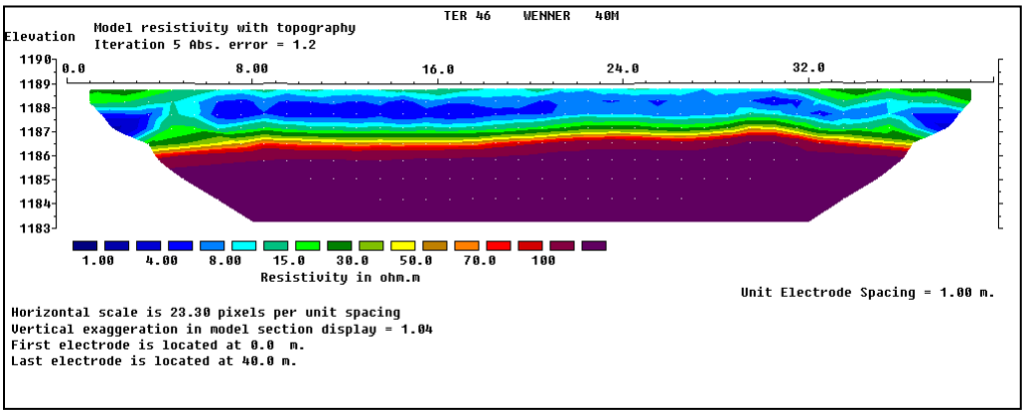


Figura VII.47. Sección TER 46, con orientación Noroeste-Sureste.

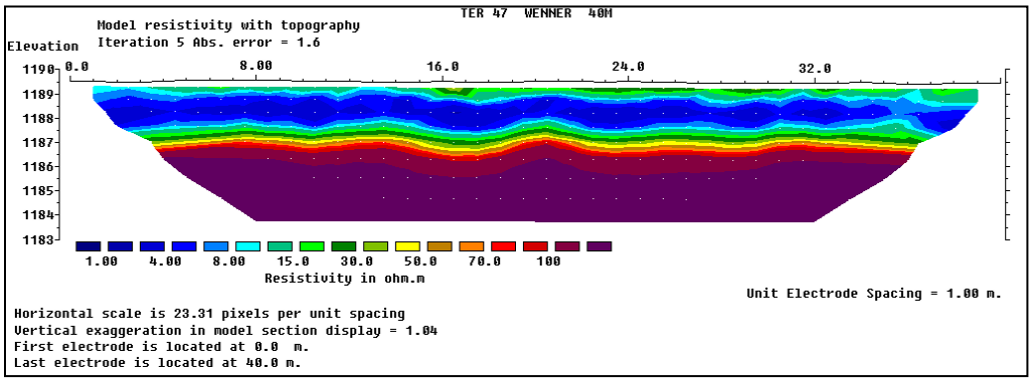


Figura VII.48. Sección TER 47, con orientación Noroeste-Sureste.

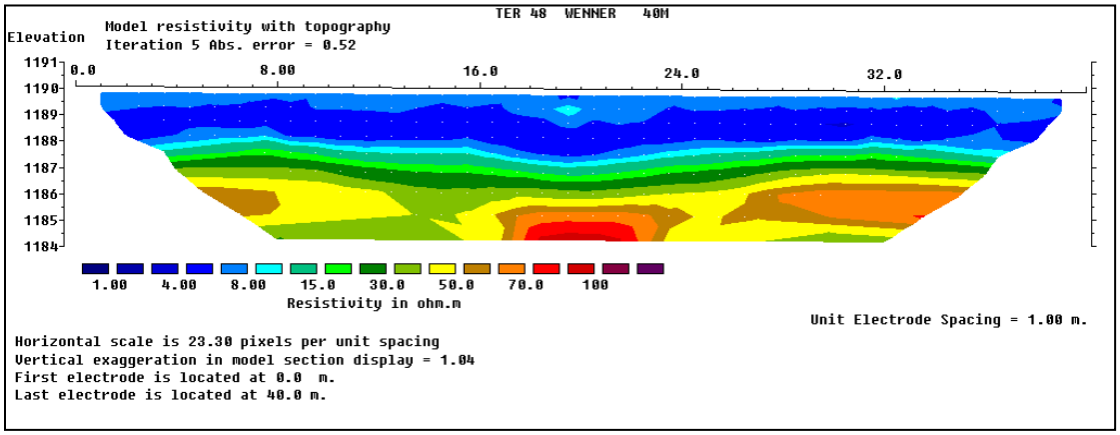


Figura VII.49. Sección TER 48, con orientación Noroeste-Sureste.

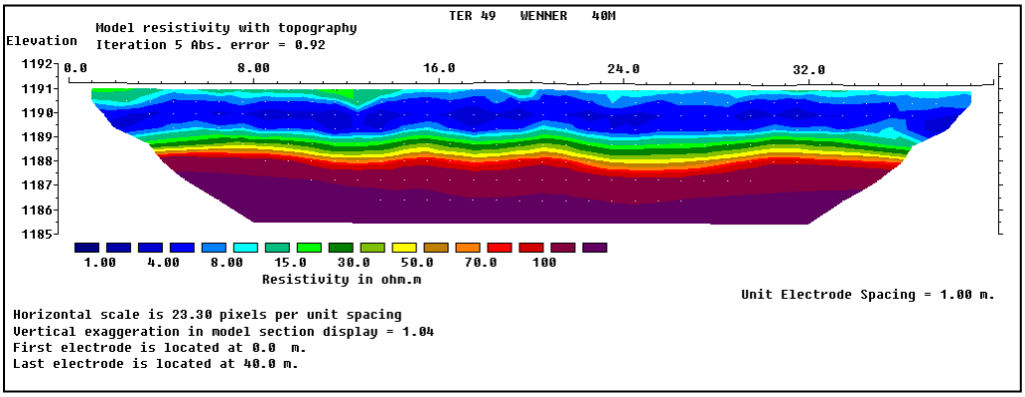


Figura VII.50. Sección TER 49, con orientación Noroeste-Sureste.

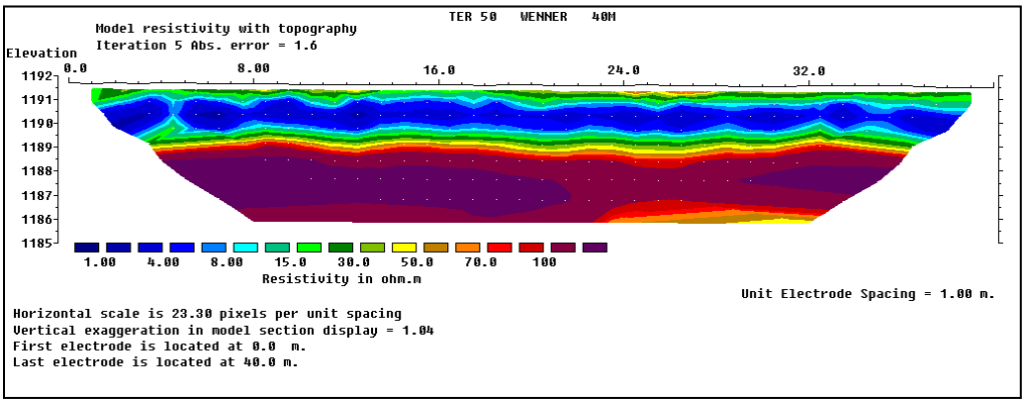


Figura VII.51. Sección TER 50, con orientación Noroeste-Sureste.

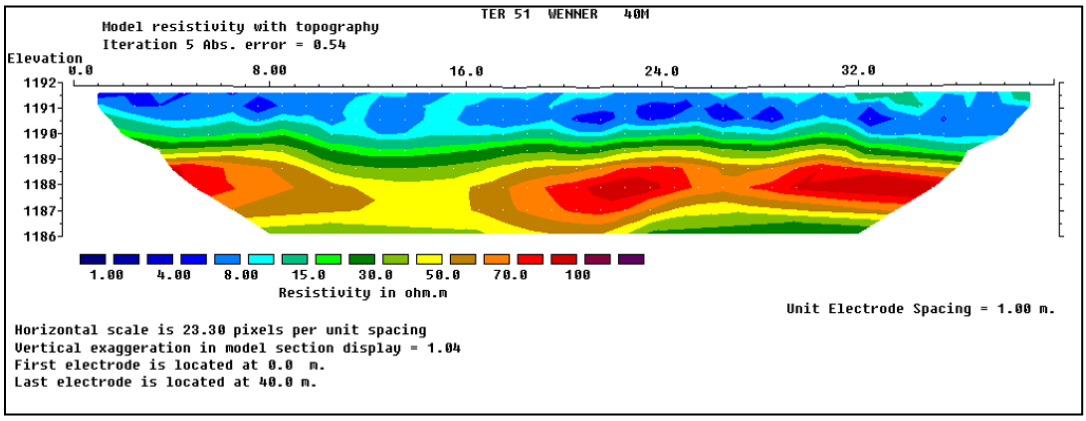


Figura VII.52. Sección TER 51, con orientación Noroeste-Sureste.

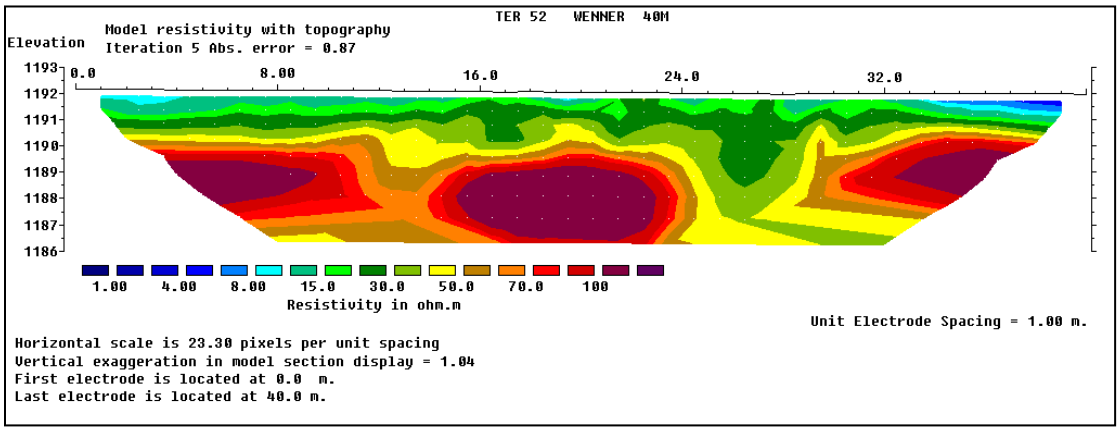


Figura VII.53. Sección TER 52, con orientación Noroeste-Sureste.

UACJ
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

VIII. RESULTADOS DE TER´s

VIII.1. Anomalías a partir de Líneas de TER´s

A continuación, se muestran los Perfiles Eléctricos Resistivos correspondientes a las líneas de TER 01 a la TER 52 (Figuras VIII.1.1 a la VIII.1.52), mostrando zonas anómalas (círculos en color rojo) en los perfiles y la cota de desplante (línea punteada roja) del Bordo Miguel de la Madrid Hurtado.

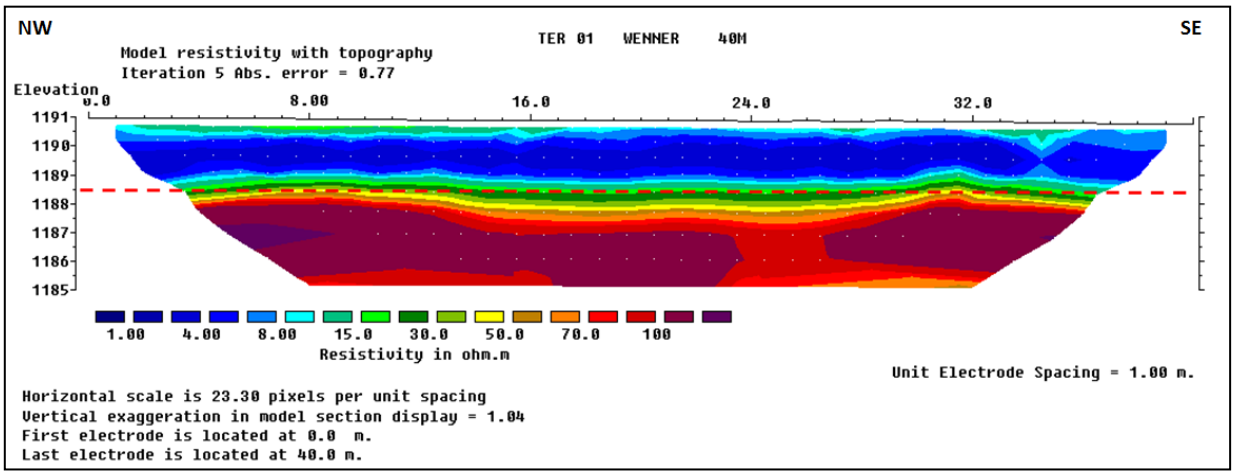


Figura VIII.1.1. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 01.

El Perfil 01 (Figura VIII.1.1) se localiza hacia el Noroeste del BMMH, entre las líneas de TER 48 y 49. Muestra continuidad estratigráfica y todo el cuerpo del bordo está compuesto por material asociado a arcilla.

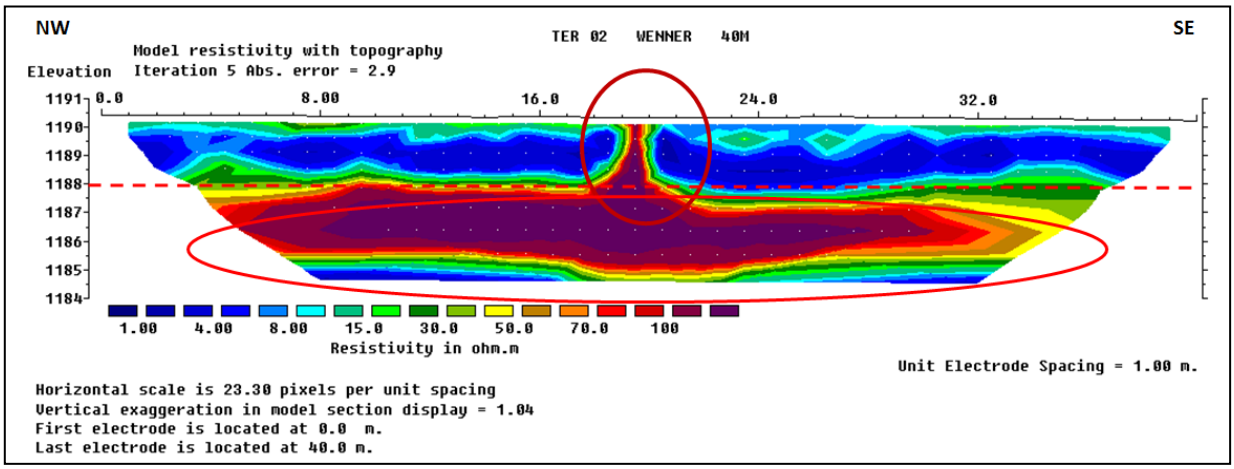


Figura VIII.1.2. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 02.

El Perfil 02 (Figura VIII.1.2) se localiza hacia el Noroeste del BMMH, entre las líneas de TER 47 y 48. Se observa que el cuerpo del bordo está compuesto por material limo-arcilloso y esta desplantado sobre arenas. Cabe mencionar que es en este punto donde se realizó un corte con maquinaria, por parte del dueño del predio, por lo que se observa una anomalía muy marcada en el centro del perfil entre las C.M. (coordenadas de modelo) 19 y 20 m.

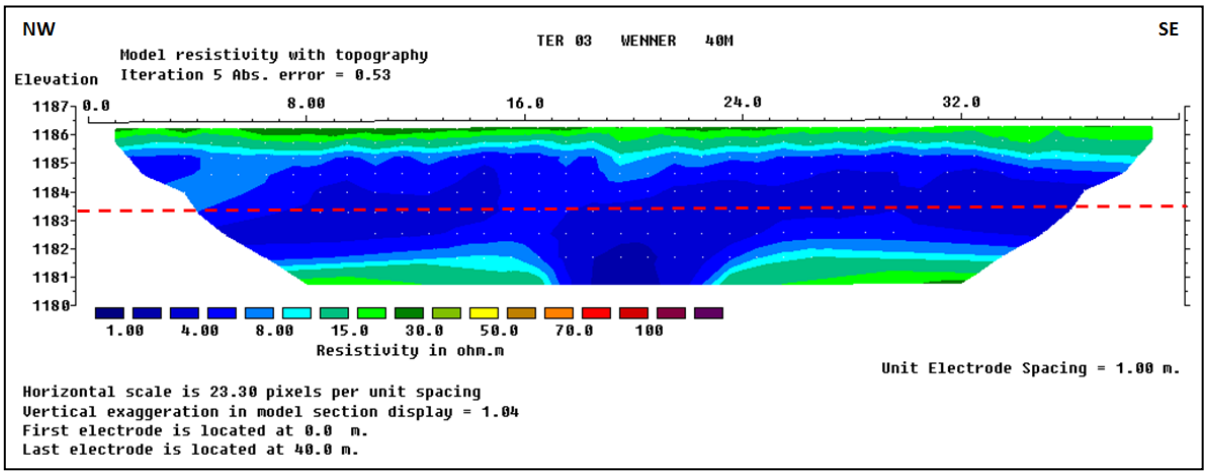


Figura VIII.1.3. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 03.

El Perfil 01 (Figura VIII.1.1) muestra continuidad estratigráfica, presenta 1.0 m de limos en la corona y esta desplantado en arcilla.

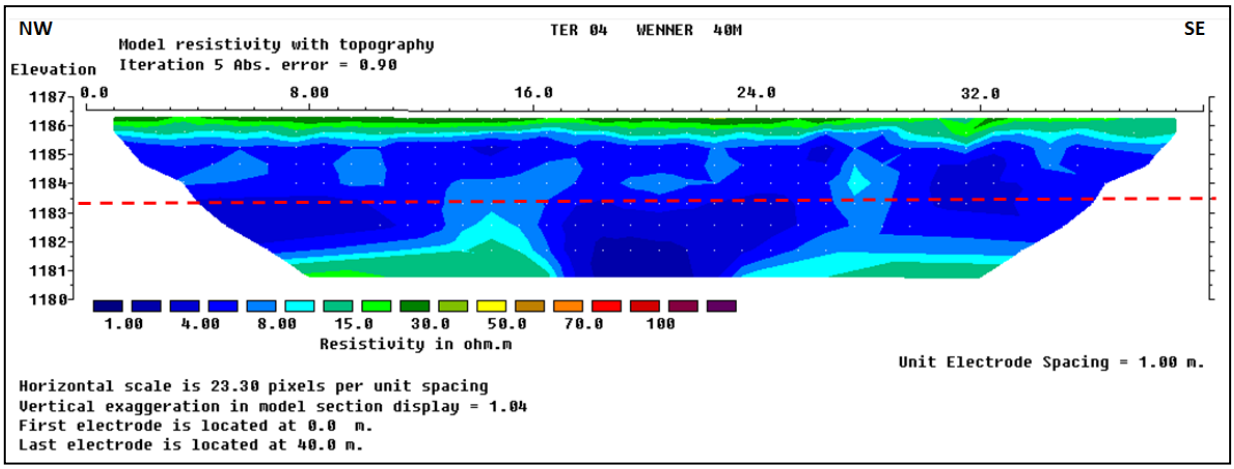


Figura VIII.1.4. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 04.

El Perfil 04 (Figura VIII.1.4) muestra continuidad estratigráfica, presenta 1.0 m de limos en la corona y esta desplantado en arcilla.

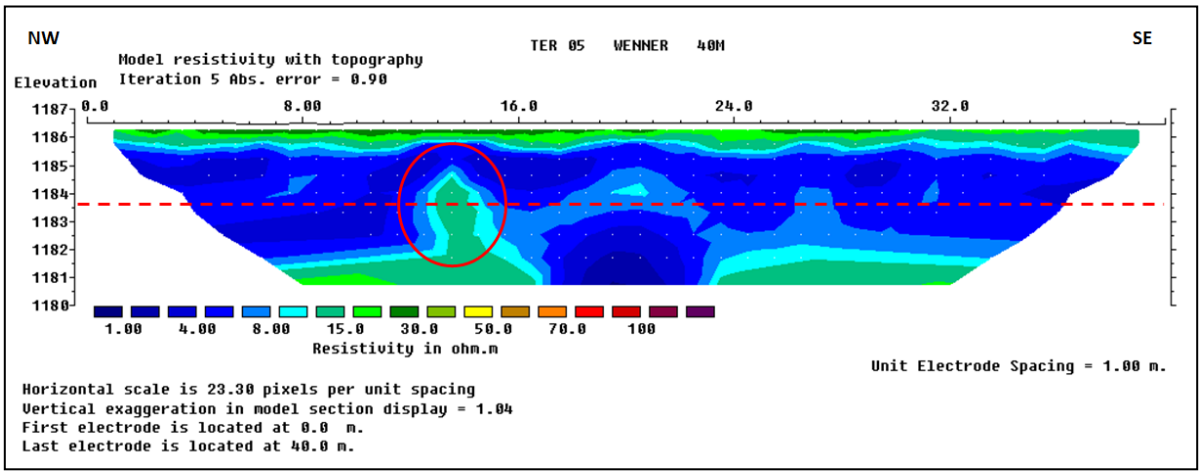


Figura VIII.1.5. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 05.

El Perfil 05 (Figura VIII.1.5) no presenta continuidad estratigráfica teniendo una anomalía entre los 12 m hasta los 15 m a una profundidad de 1.5 m, presenta 1.0 m de limos en la corona y esta desplantado en arcilla.

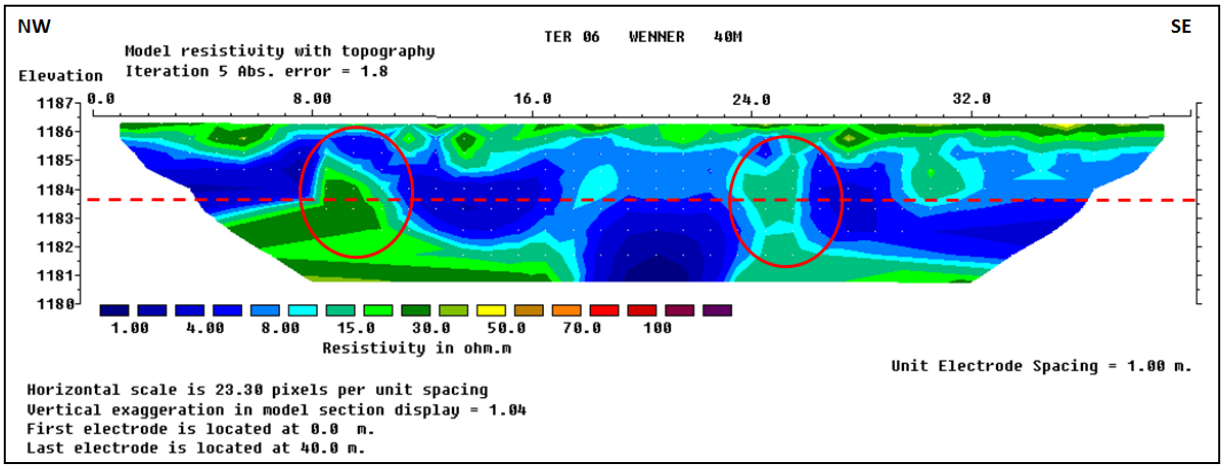


Figura VIII.1.6. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 06.

El Perfil 06 (Figura VIII.1.6) no presenta continuidad estratigráfica teniendo una anomalía entre los 8 m hasta los 12 m y otra de los 23 m hasta los 2 6m ambas con una profundidad de 1.5 m, presenta 1.0 m de limos en la corona y en su mayor parte esta desplantado en arcilla.

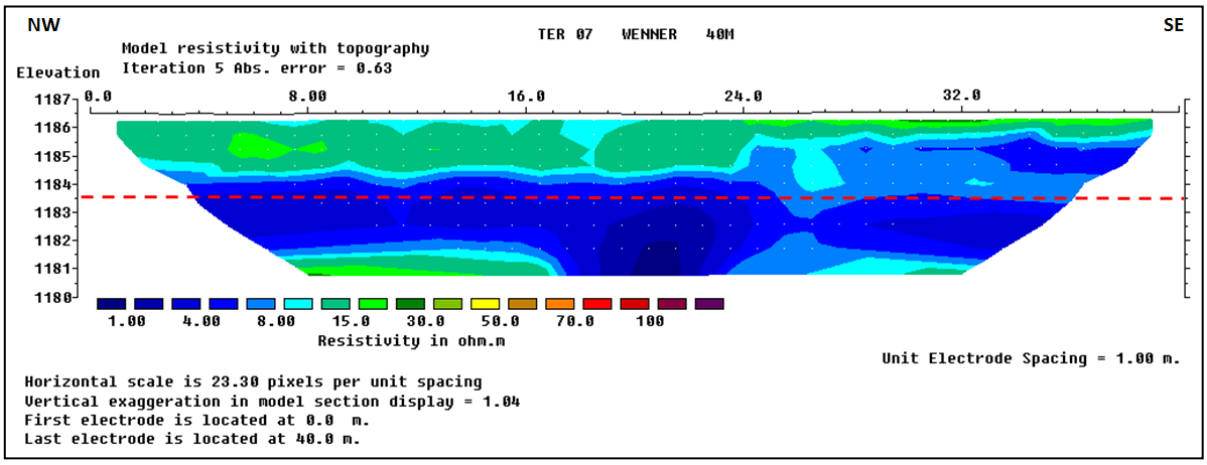


Figura VIII.1.7. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 07.

El Perfil 07 (Figura VIII.1.7) presenta continuidad estratigráfica, tiene un adelgazamiento de 1.0 m en la corona a partir de los 24 m y esta desplantado en arcilla.

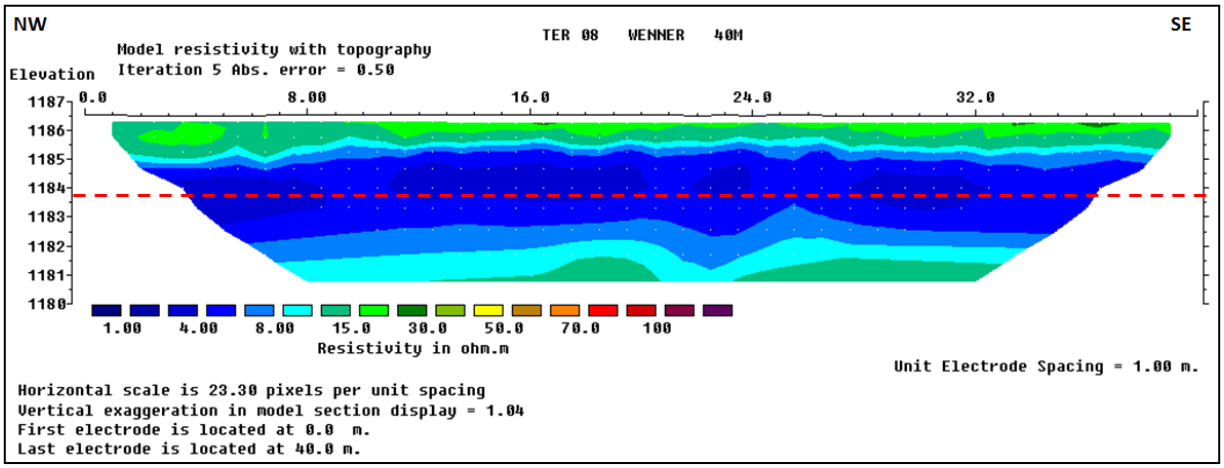


Figura VIII.1.8. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 08.

El Perfil 08 (Figura VIII.1.8) muestra continuidad estratigráfica, presenta 1.0 m de limos en la corona y esta desplantado en arcilla.

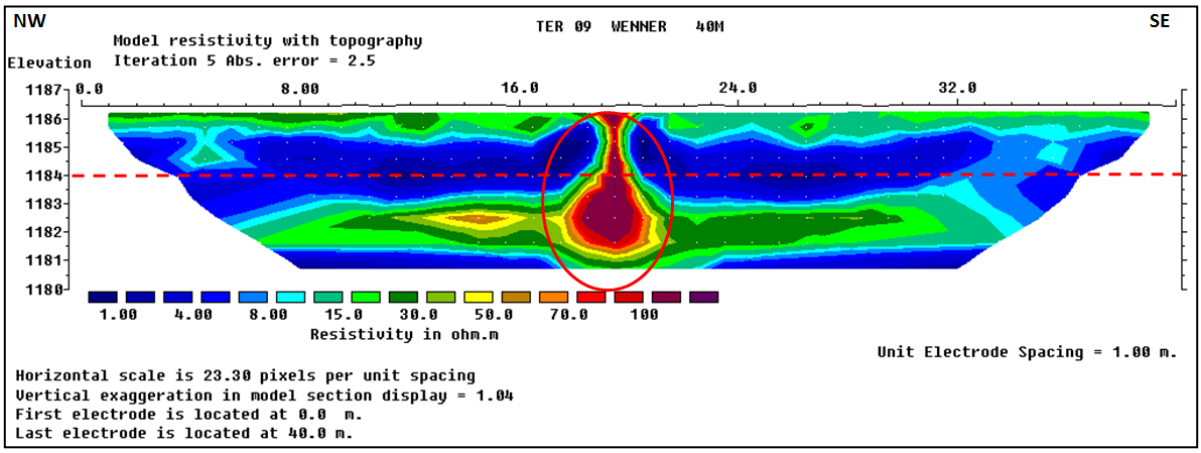


Figura VIII.1.9. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 09.

El Perfil 09 (Figura VIII.1.9) presenta una anomalía que se hace superficial a los 19 m hasta los 21 m y en su mayor parte esta desplantado en arcilla.

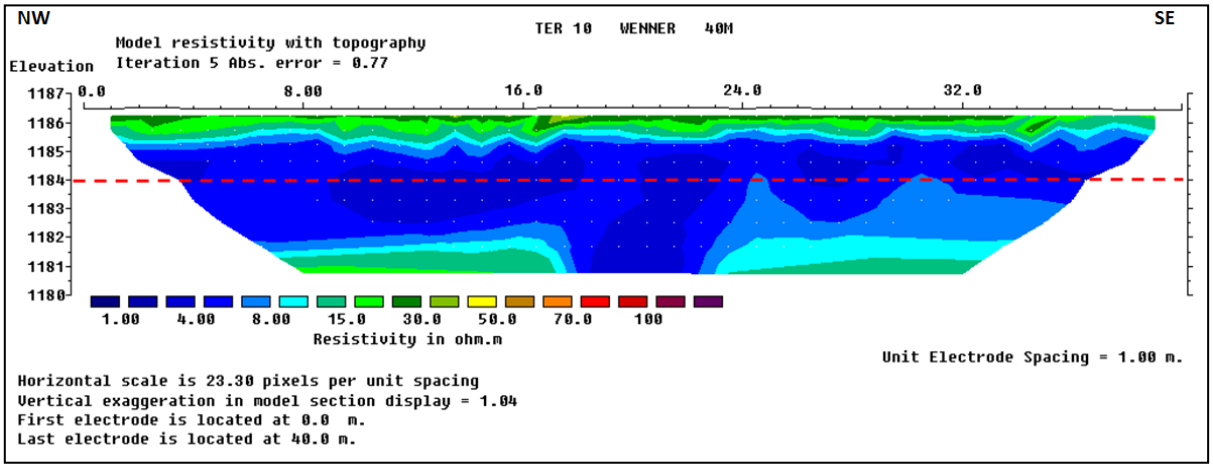


Figura VIII.1.10. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 10.

El Perfil 10 (Figura VIII.1.10) muestra continuidad estratigráfica, presenta 1.0 m de limos en la corona y esta desplantado en arcilla.

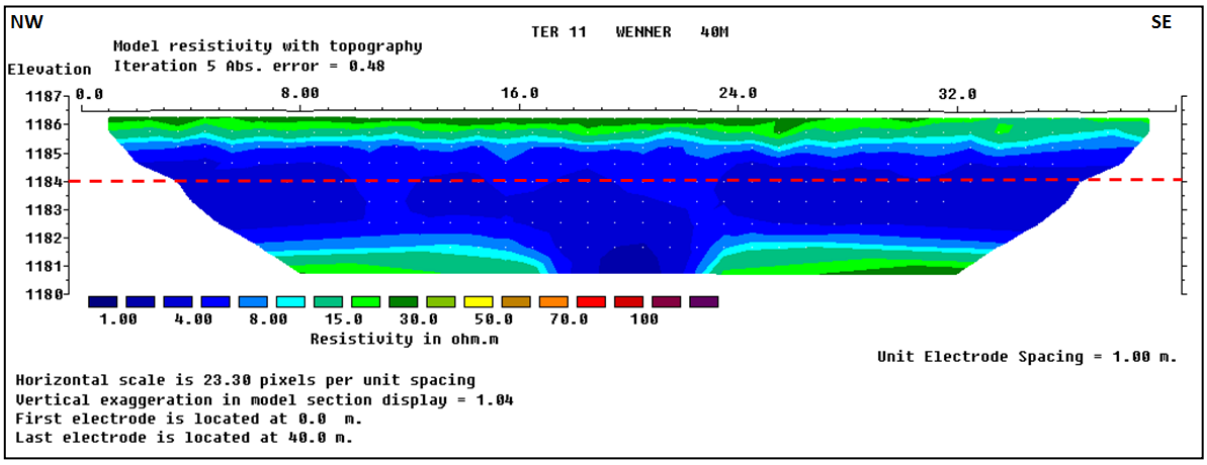


Figura VIII.1.11. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 11.

El Perfil 11 (Figura VIII.1.11) muestra continuidad estratigráfica, presenta 1.0 m de limos en la corona y esta desplantado en arcilla.

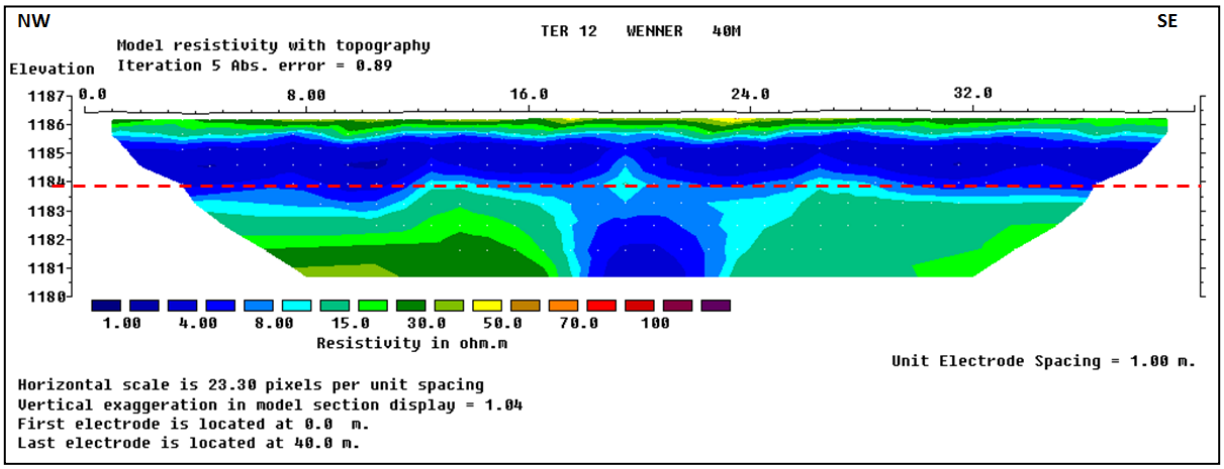


Figura VIII.1.12. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 12.

El Perfil 12 (Figura VIII.1.12) muestra continuidad estratigráfica, presenta 0.5 m de limos en la corona y esta desplantado en arcilla.

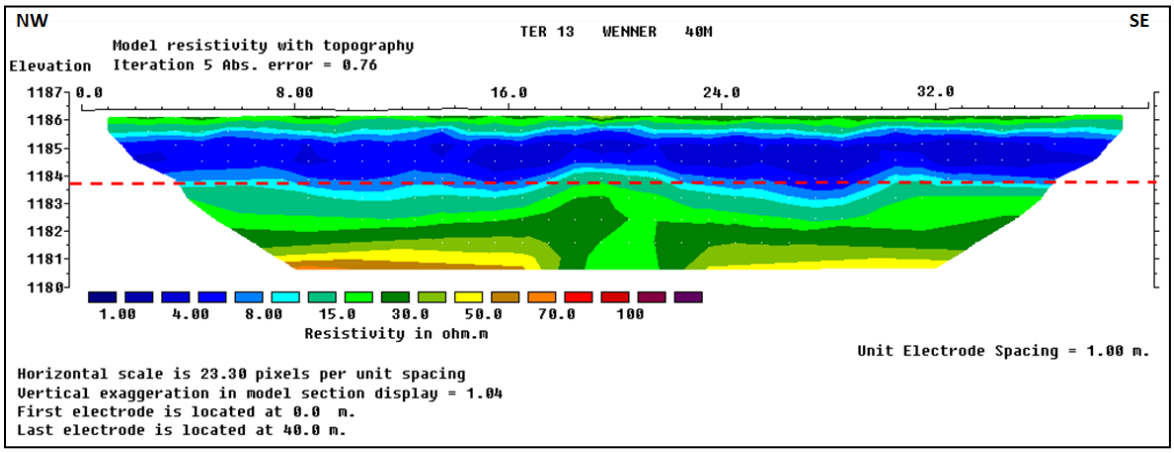


Figura VIII.1.13. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 13.

El Perfil 13 (Figura VIII.1.13) muestra continuidad estratigráfica, presenta 0.5 m de limos en la corona y esta desplantado en arcilla.

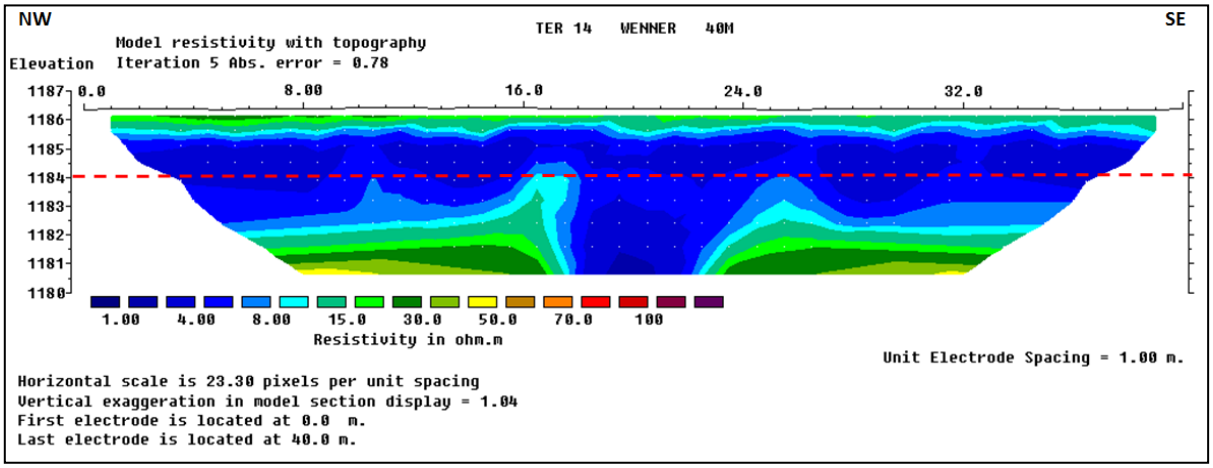


Figura VIII.1.14. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 14.

El Perfil 14 (Figura VIII.1.14) muestra continuidad estratigráfica, presenta 0.5 m de limos en la corona y esta desplantado en arcilla.

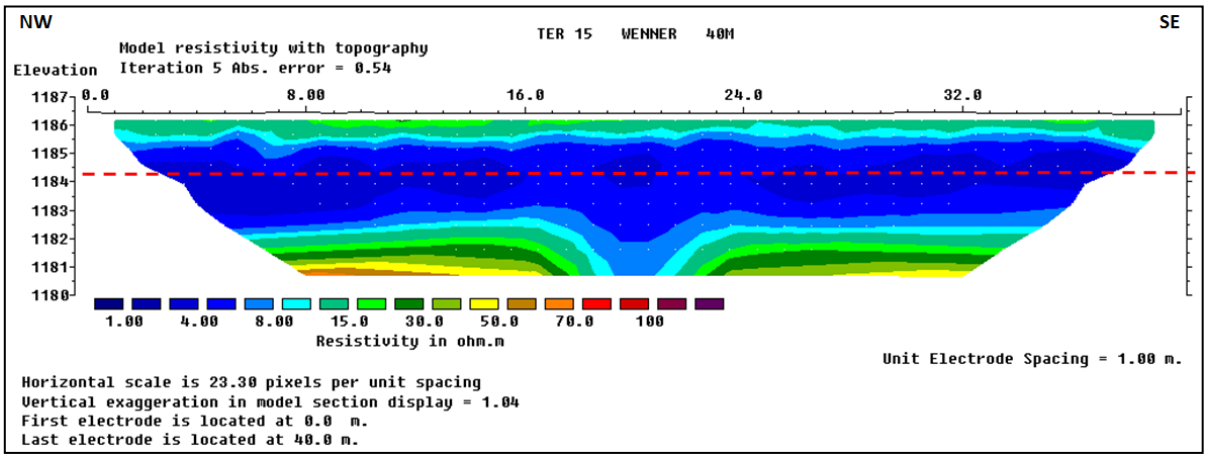


Figura VIII.1.15. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 15.

El Perfil 15 (Figura VIII.1.15) muestra continuidad estratigráfica, presenta 0.5 m de limos en la corona y esta desplantado en arcilla.

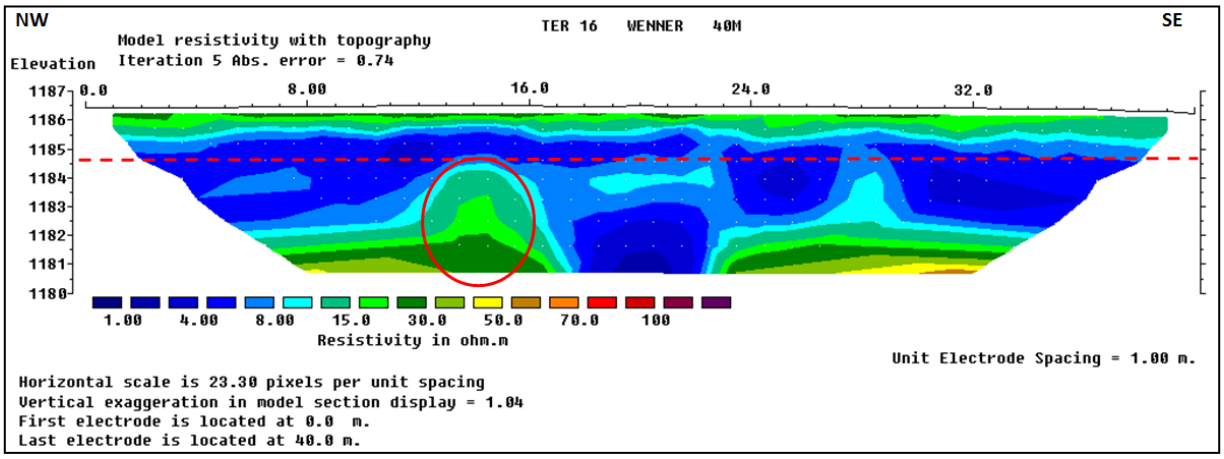


Figura VIII.1.16. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 16.

El Perfil 16 (Figura VIII.1.16) muestra continuidad estratigráfica solo se observa una anomalía a los 2 m de profundidad en los 13 m y 16 m, presenta 0.5 de limos en la corona y está en su mayoría desplantado en arcilla.

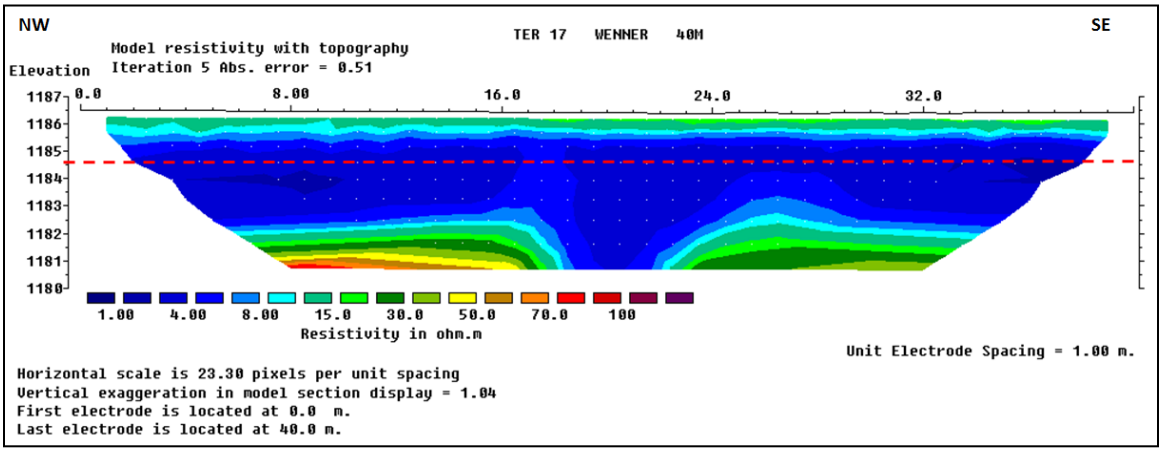


Figura VIII.1.17. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 17.

El Perfil 17 (Figura VIII.1.17) muestra continuidad estratigráfica, presenta 0.5 m de limos en la corona y esta desplantado en arcilla.

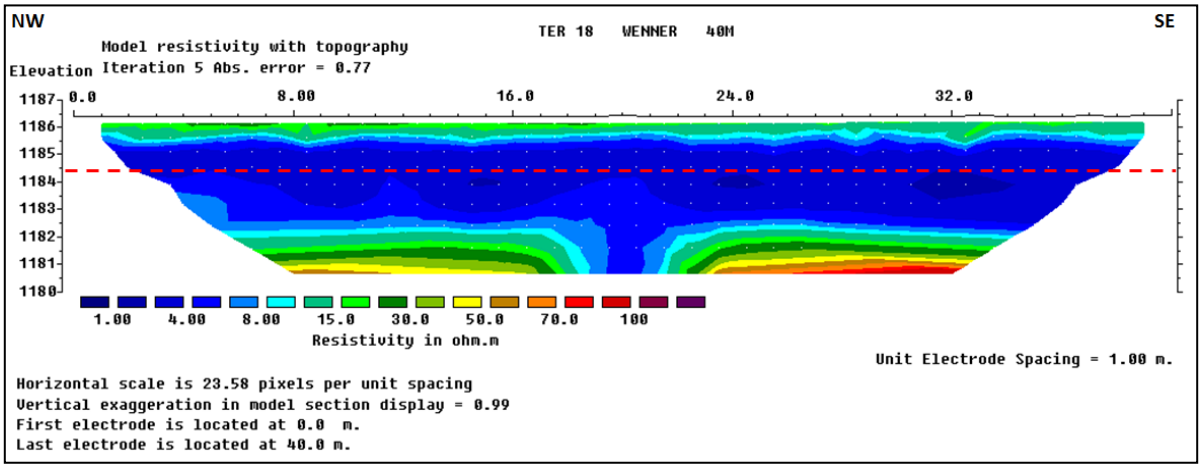


Figura VIII.1.18. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 18.

El Perfil 18 (Figura VIII.1.18) muestra continuidad estratigráfica, presenta 0.5 m de limos en la corona y esta desplantado en arcilla.

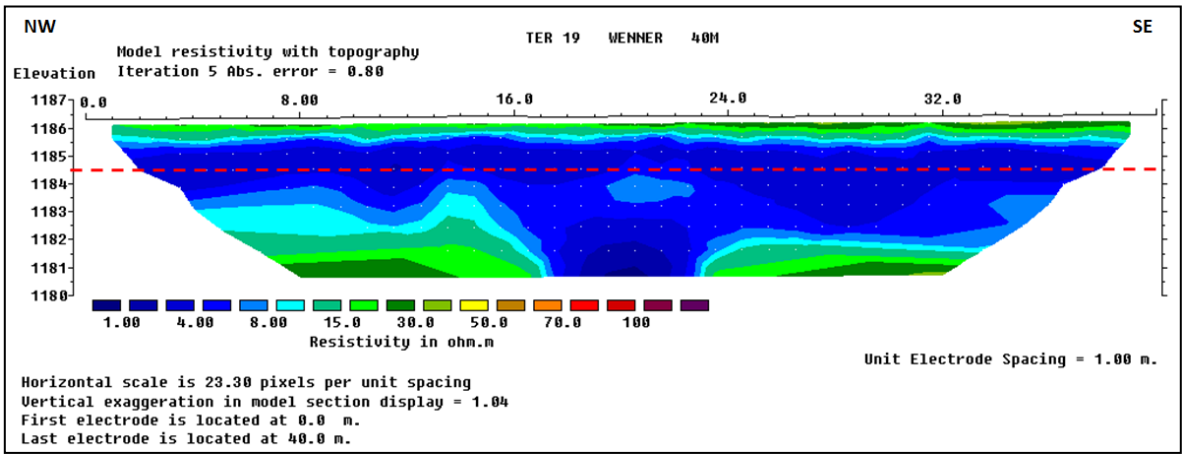


Figura VIII.1.19. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 19.

El Perfil 19 (Figura VIII.1.19) muestra continuidad estratigráfica, presenta 0.5 m de limos en la corona y esta desplantado en arcilla.

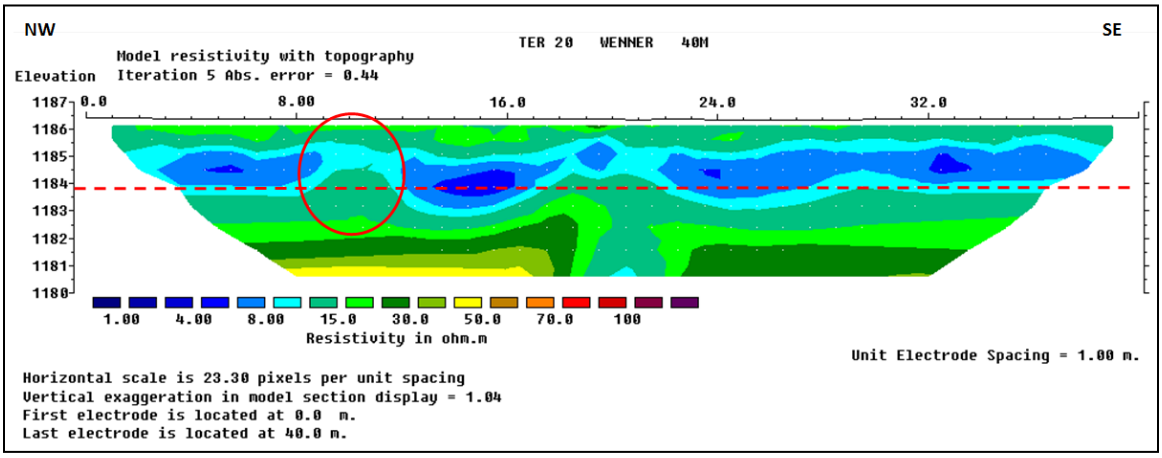


Figura VIII.1.20. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 20.

El Perfil 20 (Figura VIII.1.20) muestra una anomalía entre los 9 y 12 m, tiene 1.0 m de limos en la corona y esta desplantado en materiales limoso en su mayoría.

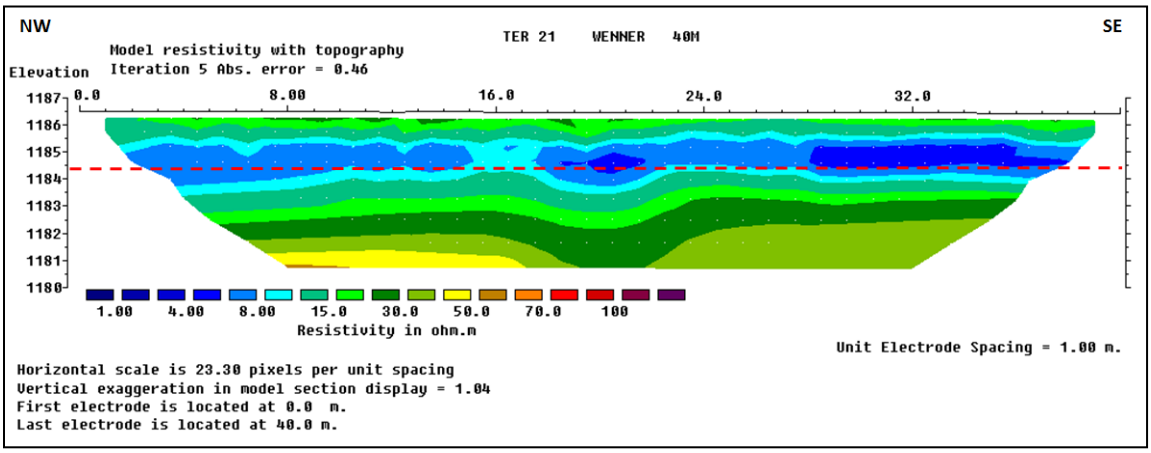


Figura VIII.1.21. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 21.

El Perfil 21 (Figura VIII.1.21) muestra continuidad estratigráfica, presenta 1.0 m de limos en la corona y esta desplantado en arcilla.

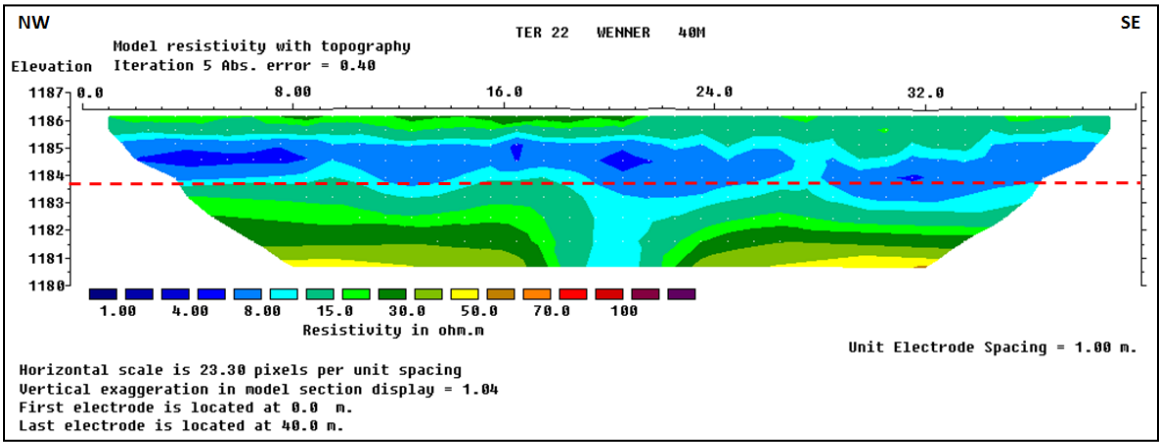


Figura VIII.1.22. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 22.

El Perfil 22 (Figura VIII.1.22) muestra continuidad estratigráfica, presenta 1.0 m de limos en la corona y esta desplantado en arcilla.

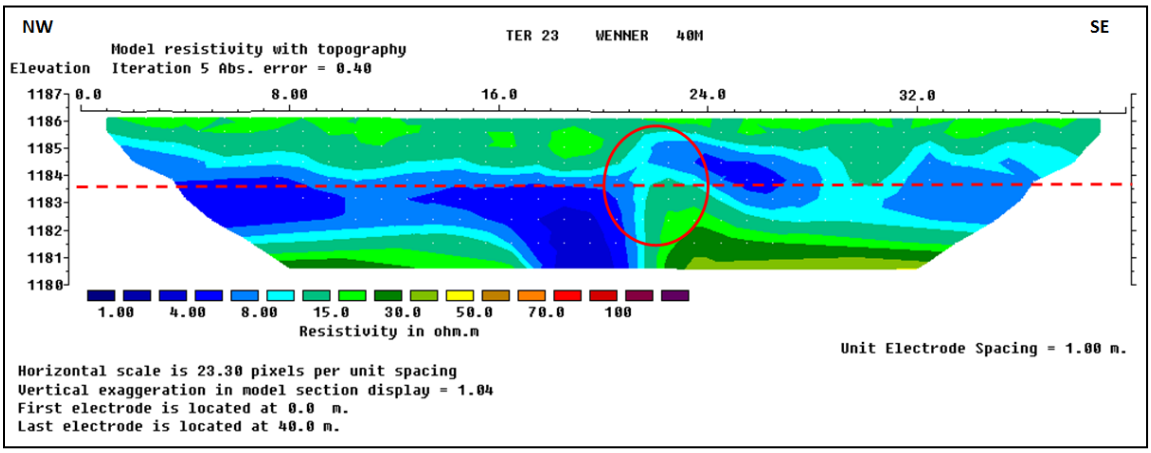


Figura VIII.1.23. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 23.

El Perfil 23 (Figura VIII.1.23) presenta una anomalía entre los 20 m y los 24 m, 2 m de espesor en la corona de material asociado a limos en su mayoría, y esta desplantado en arcilla.

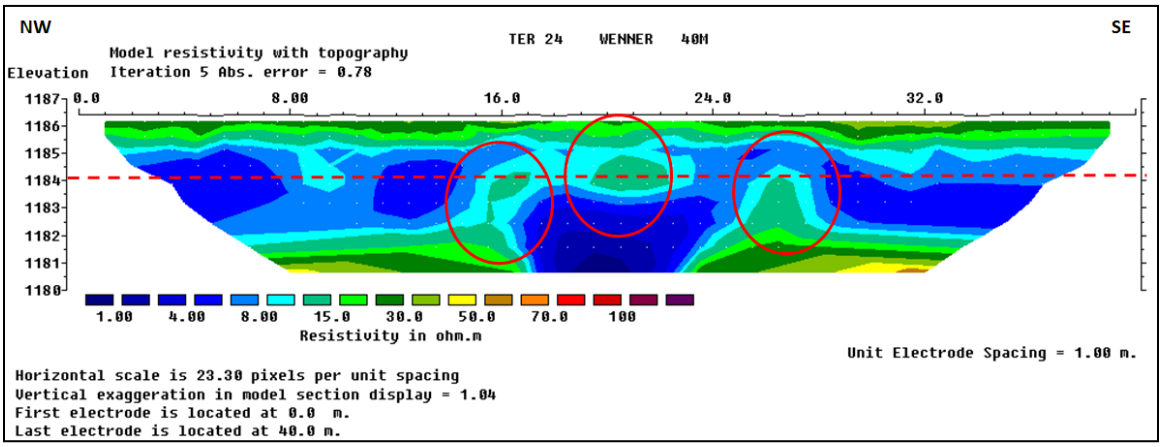


Figura VIII.1.24. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 24.

El Perfil 24 (Figura VIII.1.24) presenta varias anomalías en 15 m, 23 m, y una más entre los 26 m y 28 m. Se tiene 1.0 m de espesor en la corona de material asociado a limos en su mayoría, y esta desplantado en arcilla.

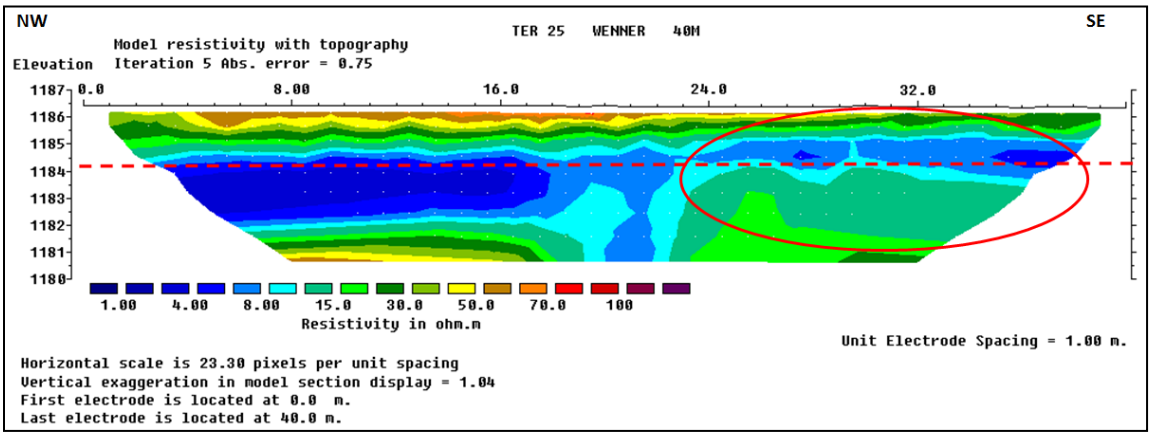


Figura VIII.1.25. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 25.

El Perfil 25 (Figura VIII.1.25) presenta un adelgazamiento en la capa de arcillas desde los 22 m hasta el término de la TER. Se observa el espesor aproximado de la corona de 1.5 m y esta desplantado sobre arcillas.

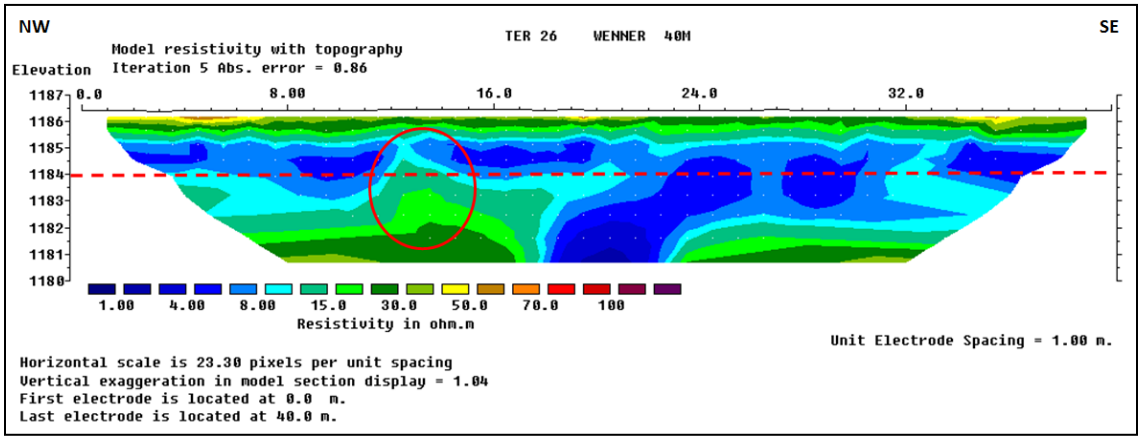


Figura VIII.1.26. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 26.

El Perfil 26 (Figura VIII.1.26) muestra una anomalía entre los 12 m y 14 m de la sección, mientras que en el resto del perfil los estratos son continuos, tiene 0.5 m de espesor compuesto de limos en la corona y se encuentra desplantado en arcillas.

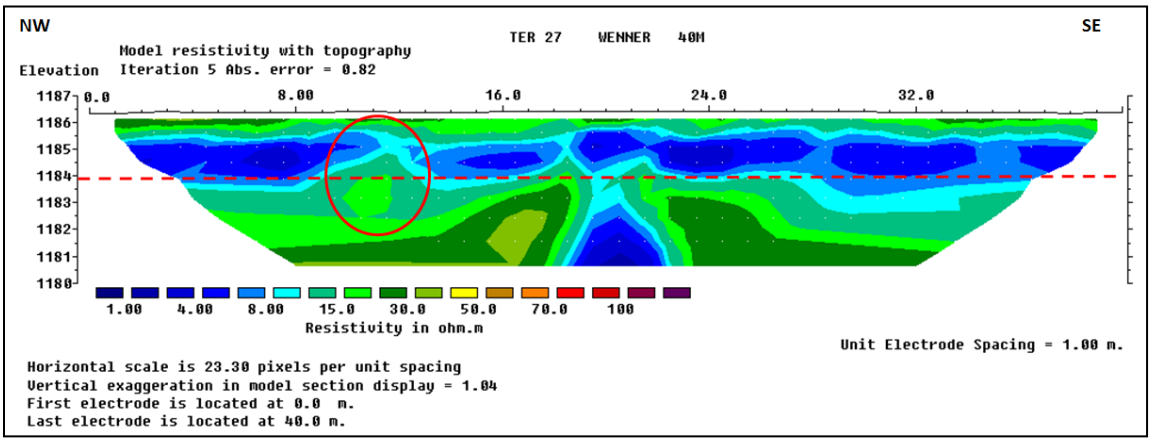


Figura VIII.1.27. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 27.

El Perfil 27 (Figura VIII.1.27) muestra una anomalía entre los 10 m y 13 m, tiene 0.5 m de espesor compuesto de limos en la corona y se encuentra desplantado en arcillas.

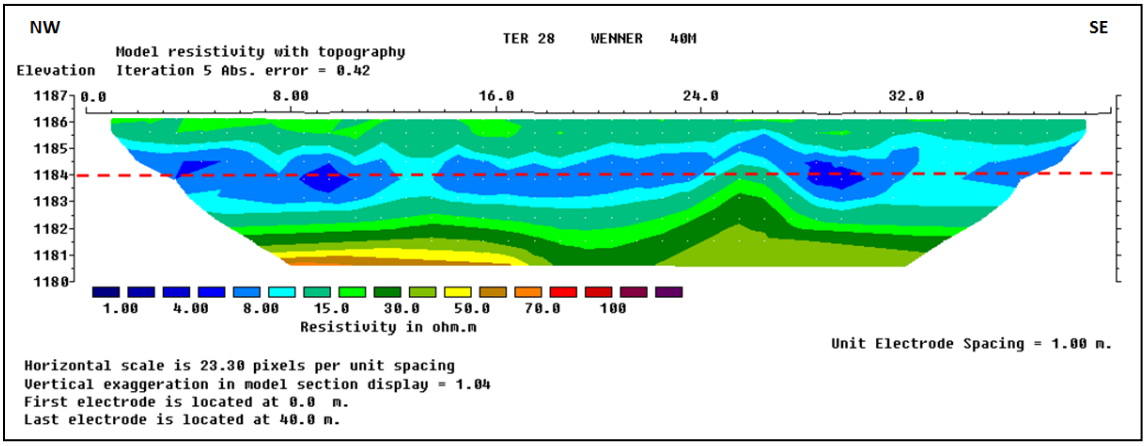


Figura VIII.1.28. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 28.

El Perfil 28 (Figura VIII.1.28) muestra continuidad estratigráfica, tiene 1.0 m de espesor compuesto de limos en la corona y se encuentra desplantado en arcillas.

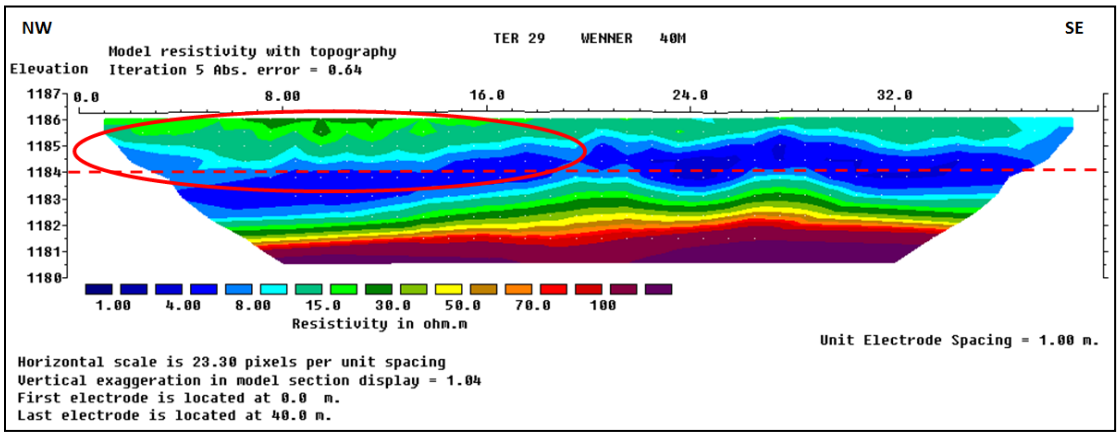


Figura VIII.1.29. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 29.

El Perfil 29 (Figura VIII.1.29) muestra continuidad estratigráfica y un engrosamiento de 2 m en la capa de material limoso de la corona, desde el inicio del perfil hasta los 18 m. Se encuentra desplantado en arcillas.

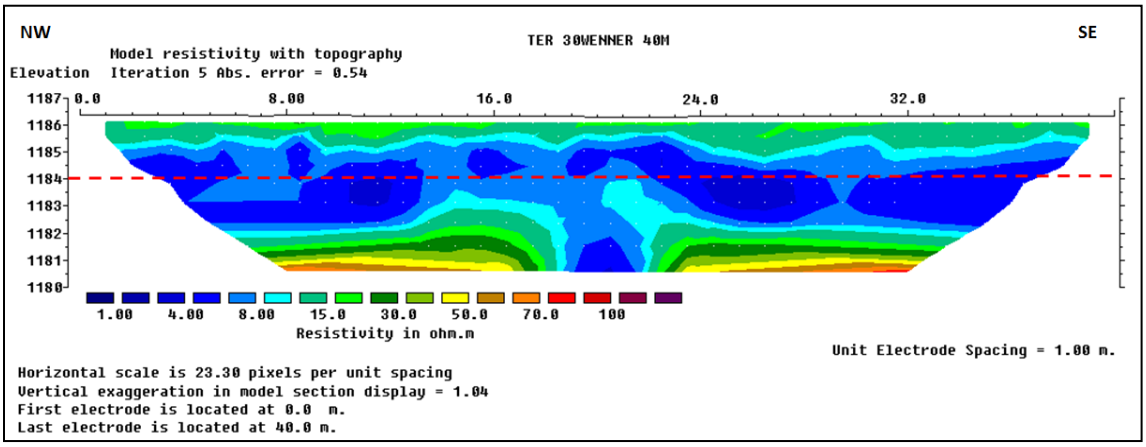


Figura VIII.1.30. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 30.

El Perfil 30 (Figura VIII.1.30) muestra continuidad estratigráfica, tiene 1.0 m de espesor compuesto de limos en la corona y se encuentra desplantado en arcillas.

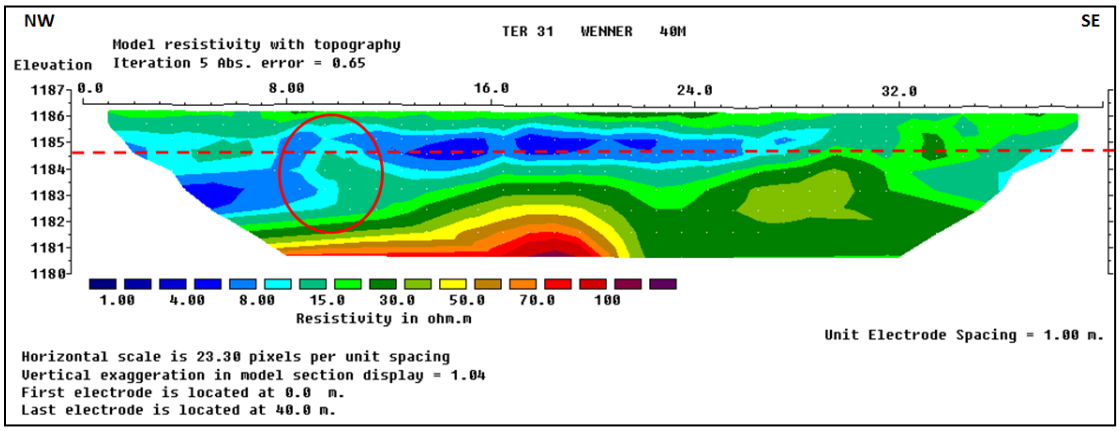


Figura VIII.1.31. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 31.

El Perfil 31 (Figura VIII.131) muestra una anomalía entre los 9 m y 11 m. A partir de los 28 m, el bordo pierde continuidad estratigráfica por el cruce de la calle Las Almeras.

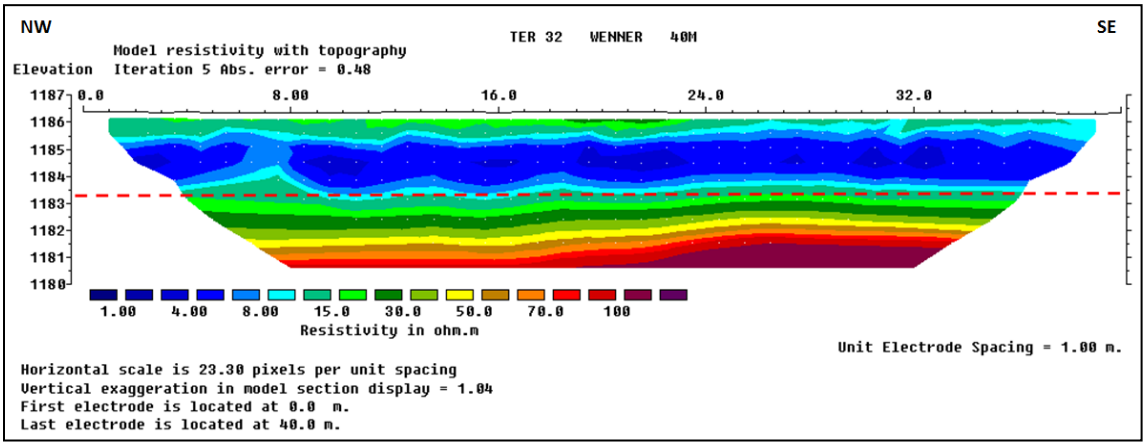


Figura VIII.1.32. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 32.

El Perfil 32 (Figura VIII.1.32) muestra continuidad estratigráfica, tiene 0.5 m de espesor compuesto de limos en la corona y se encuentra desplantado en arcillas.

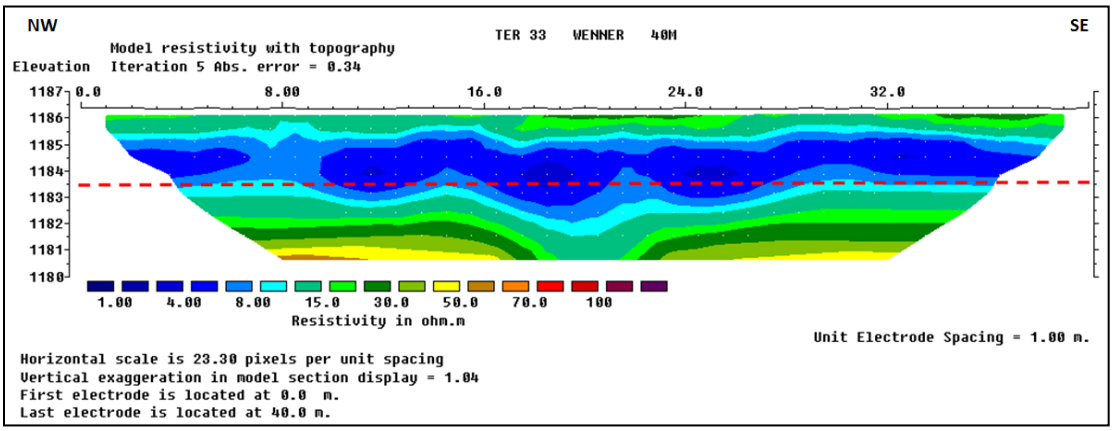


Figura VIII.1.33. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 33.

El Perfil 33 (Figura VIII.1.33) muestra continuidad estratigráfica, tiene 0.5 m de espesor compuesto de limos en la corona y se encuentra desplantado en arcillas.

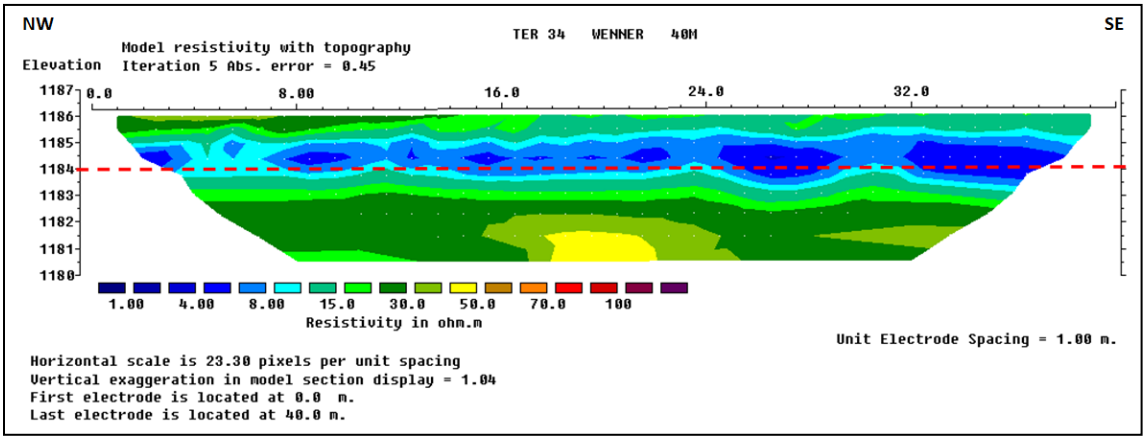


Figura VIII.1.34. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 34.

El Perfil 34 (Figura VIII.1.34) muestra continuidad estratigráfica, tiene 1.0 m de espesor compuesto de limos en la corona y se encuentra desplantado en arcillas.

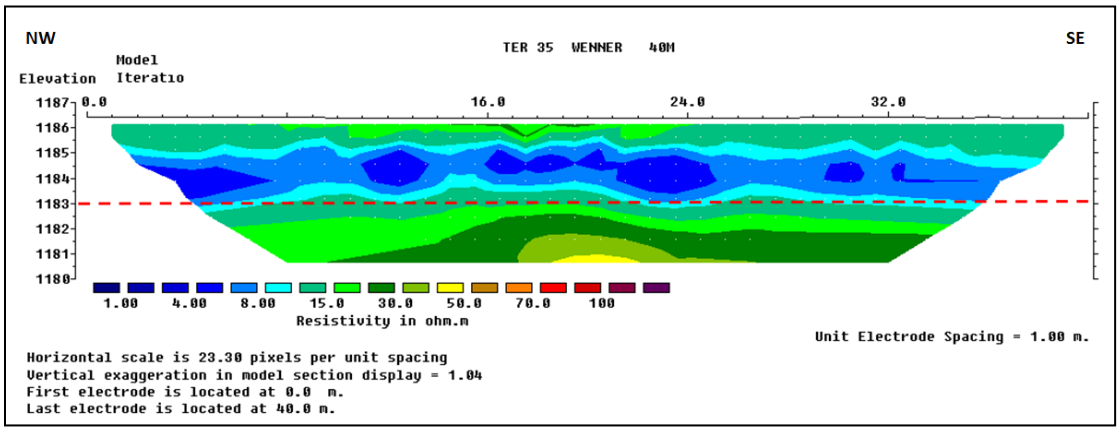


Figura VIII.1.35. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 35.

El Perfil 35 (Figura VIII.1.35) muestra continuidad estratigráfica, tiene 1.0 m de espesor compuesto de limos en la corona y se encuentra desplantado en arcillas.

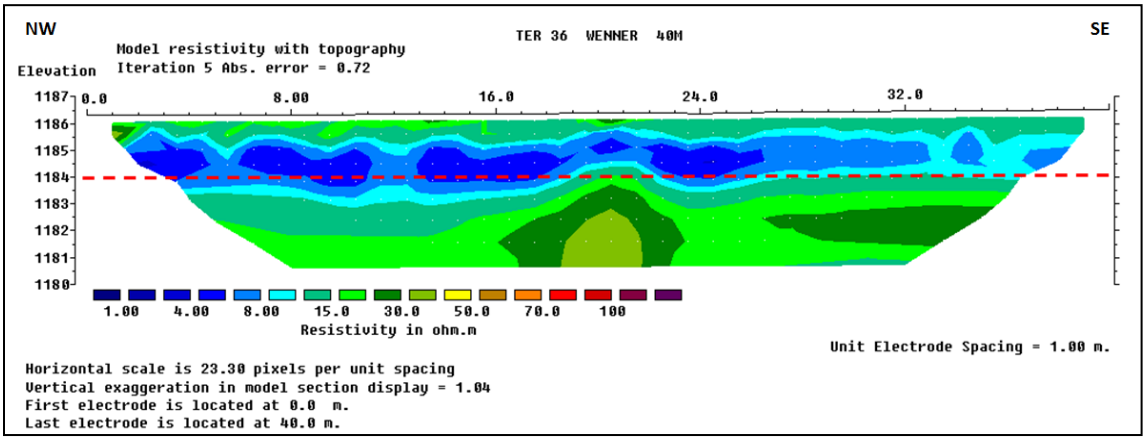


Figura VIII.1.36. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 36.

El Perfil 36 (Figura VIII.1.36) muestra continuidad estratigráfica, tiene 1.0 m de espesor compuesto de limos en la corona y se encuentra desplantado en arcillas.

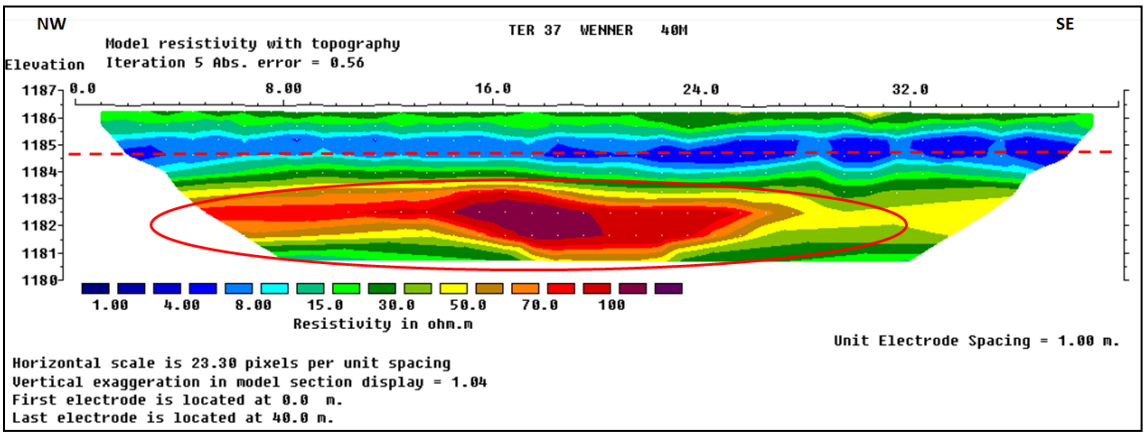


Figura VIII.1.37. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 37.

El Perfil 37 (Figura VIII.1.37) muestra continuidad estratigráfica, tiene 1.0 m de espesor compuesto de limos en la corona y se encuentra desplantado en arcillas. En este perfil, existe riesgo de tubificación por debajo del bordo ya que se observa una capa considerable de material muy arenoso de aproximadamente 1.5 m de espesor.

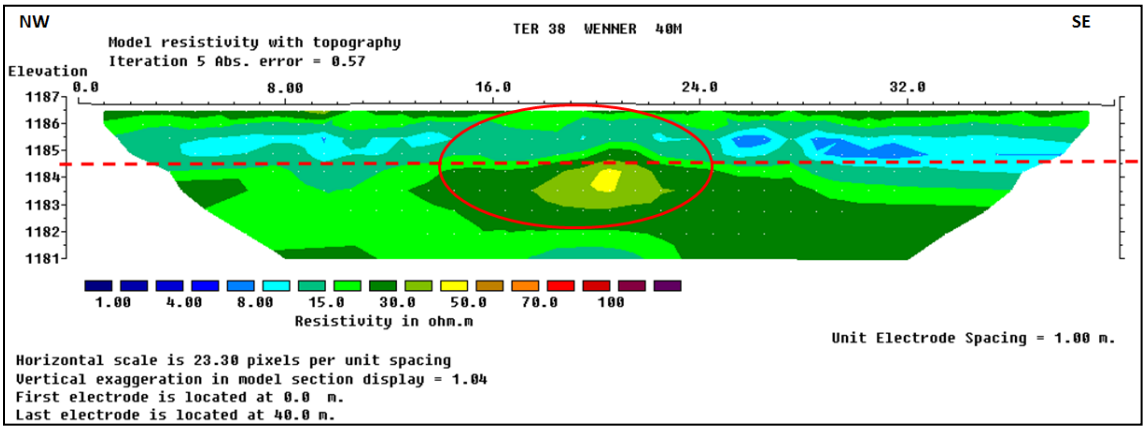


Figura VIII.1.38. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 38.

En el Perfil 38 (Figura VIII.1.38) se puede observar que el cuerpo del bordo está compuesto por material limo-arenoso.

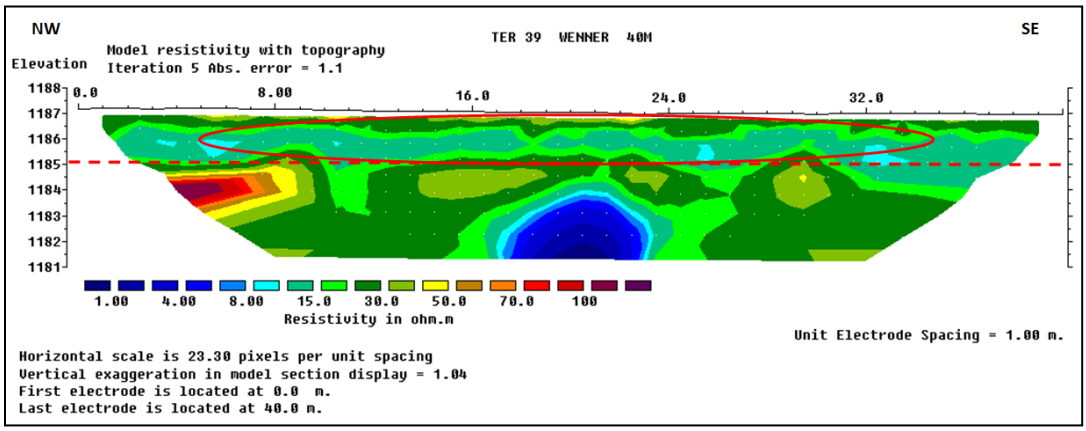


Figura VIII.1.39. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 39.

En el Perfil 39 (Figura VIII.1.39) se puede observar que el cuerpo del bordo está compuesto por material limo-arenoso.

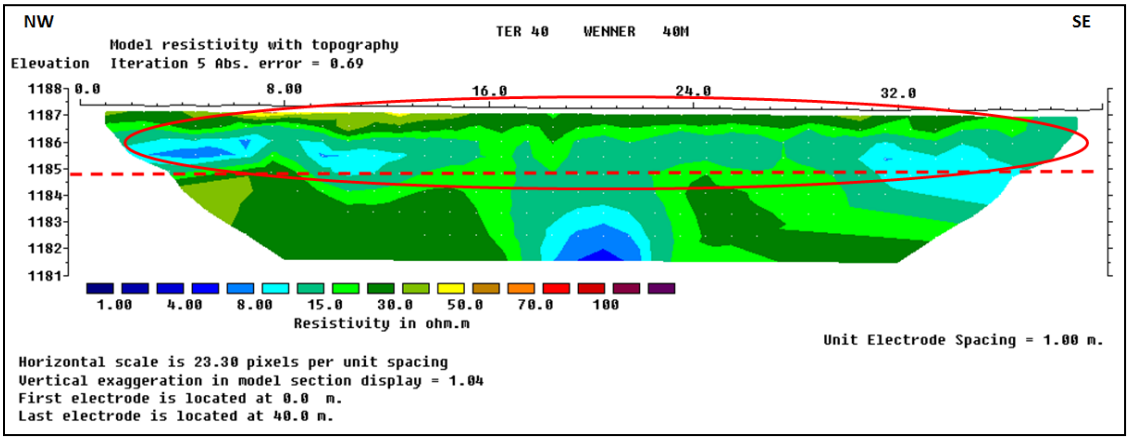


Figura VIII.1.40. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 40.

En el Perfil 40 (Figura VIII.1.40) se puede observar que el cuerpo del bordo está compuesto por material limo-arenoso.

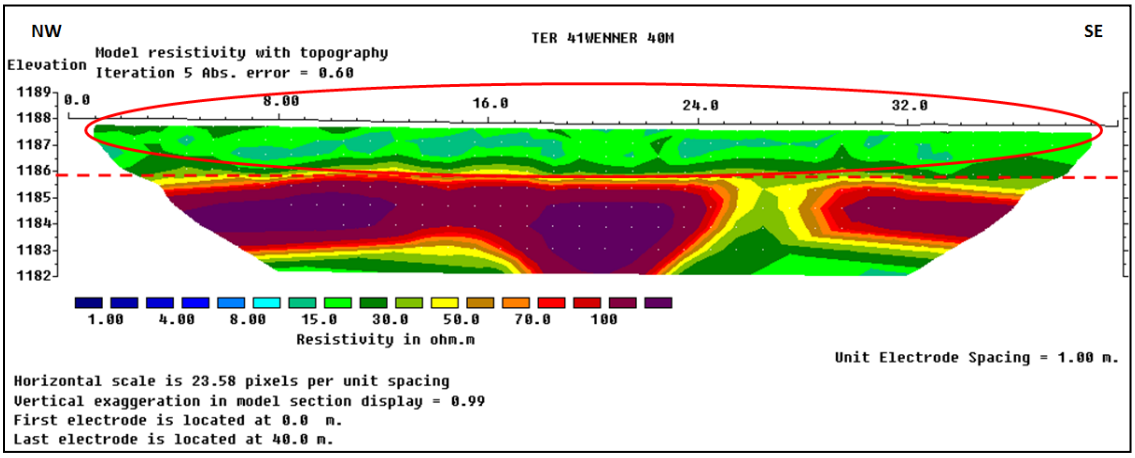


Figura VIII.1.41. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 41.

En el Perfil 41 (Figura VIII.1.41) se puede observar que el cuerpo del bordo está compuesto por material limo-arenoso y se encuentra desplantado sobre material asociado a arena.

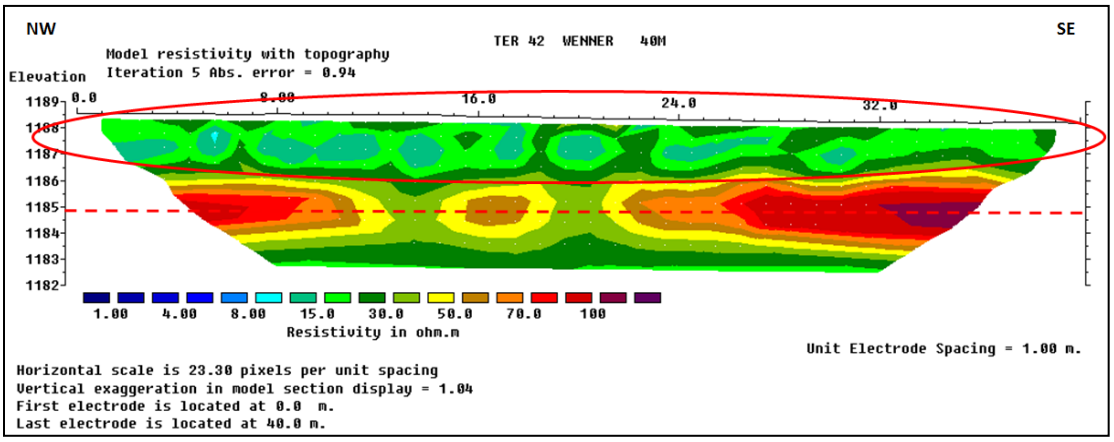


Figura VIII.1.42. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 42.

En el Perfil 42 (Figura VIII.1.42) se puede observar que el cuerpo del bordo está compuesto por material limo-arenoso y se encuentra desplantado sobre material asociado a arena.

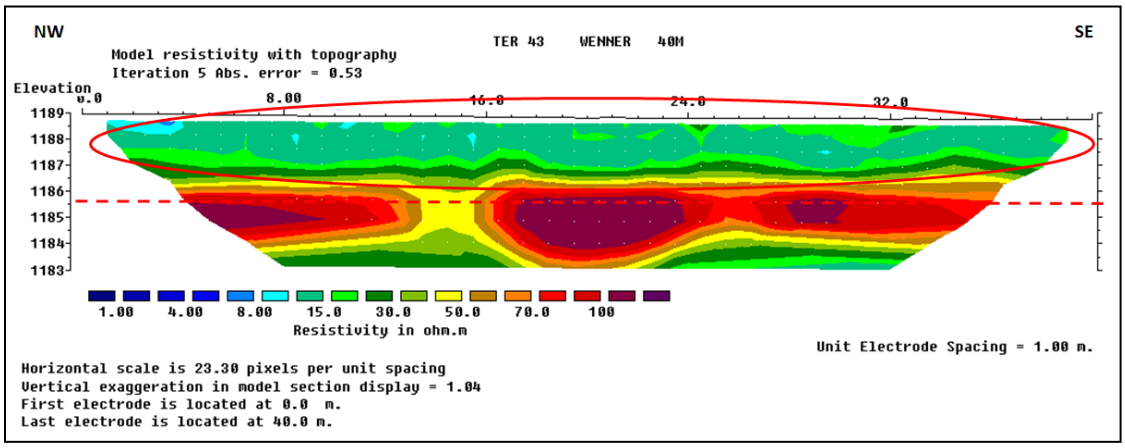


Figura VIII.1.43. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 43.

En el Perfil 43 (Figura VIII.1.43) se puede observar que el cuerpo del bordo está compuesto por material limo-arenoso y se encuentra desplantado sobre material asociado a arena.

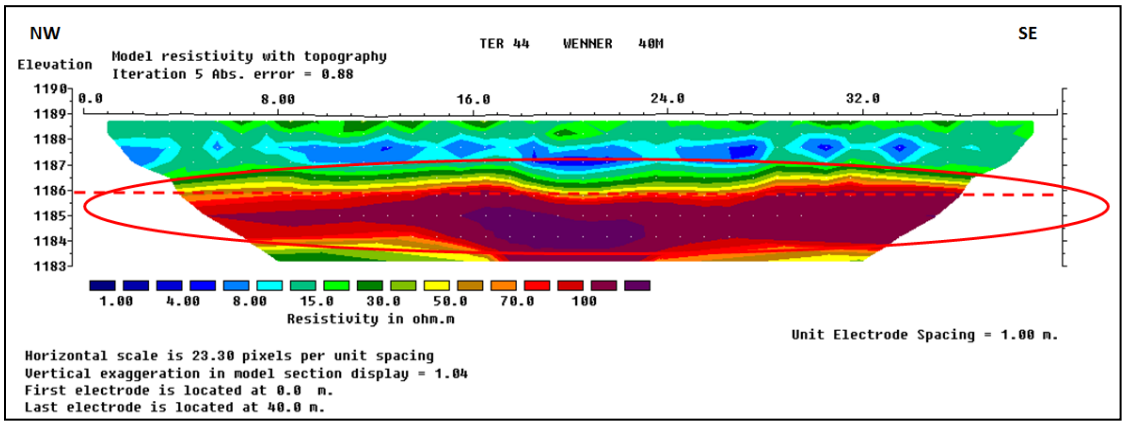


Figura VIII.1.44. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 44.

En el Perfil 44 (Figura VIII.1.44) se puede observar que el cuerpo del bordo está compuesto por material limo-arenoso y se encuentra desplantado sobre material asociado a arena.

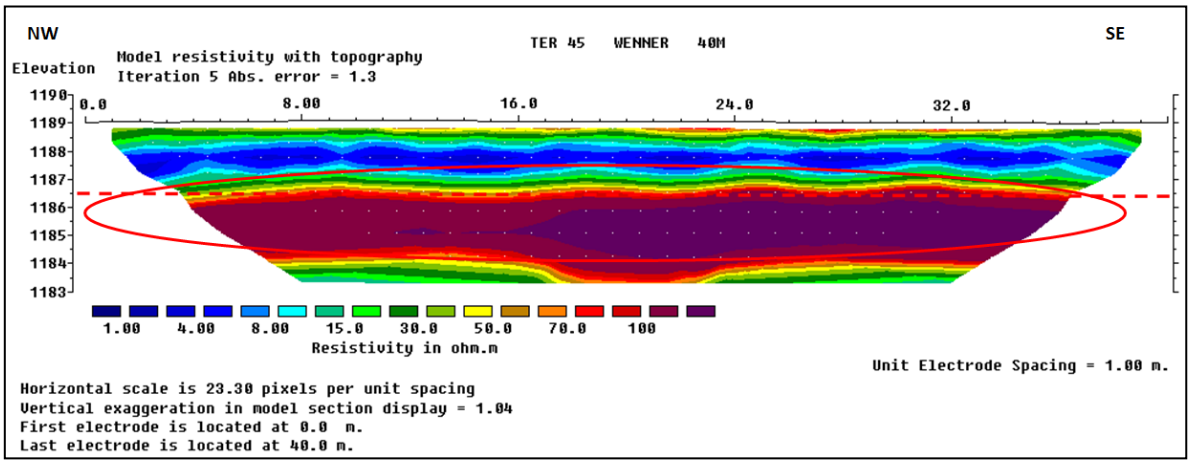


Figura VIII.1.45. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 45.

En el Perfil 45 (Figura VIII.1.45) se puede observar que el cuerpo del bordo está compuesto por material arcilloso y se encuentra desplantado sobre material asociado a arena.

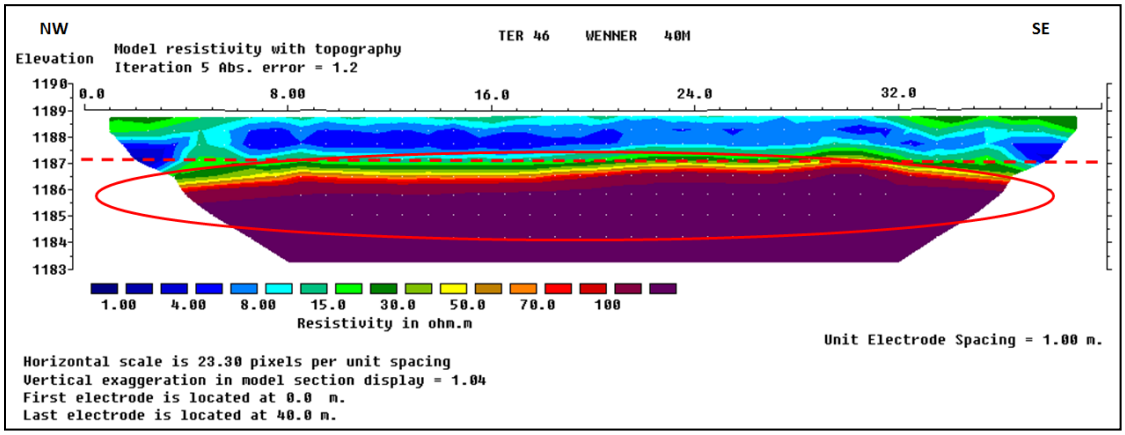


Figura VIII.1.46. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 46.

En el Perfil 46 (Figura VIII.1.46) se puede observar que el cuerpo del bordo está compuesto por material arcilloso y se encuentra desplantado sobre material asociado a arena.

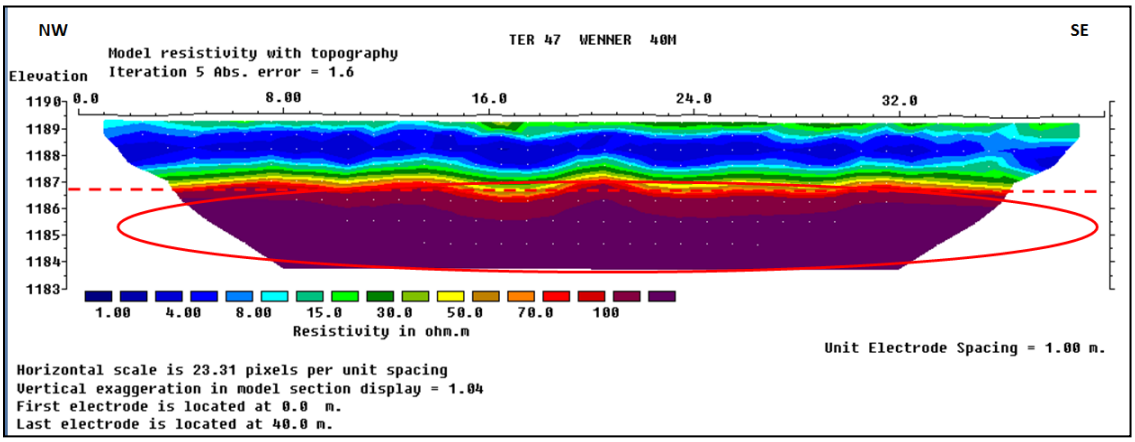


Figura VIII.1.47. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 47.

En el Perfil 47 (Figura VIII.1.47) se puede observar que el cuerpo del bordo está compuesto por material arcilloso y se encuentra desplantado sobre material asociado a arena.

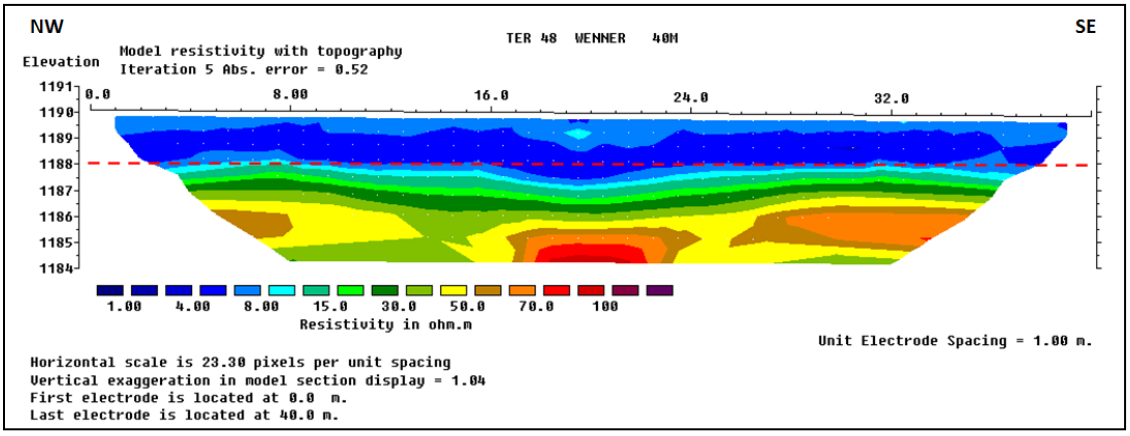


Figura VIII.1.48. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 48.

En el Perfil 48 (Figura VIII.1.48) se puede observar que el cuerpo del bordo está compuesto por material correspondiente a arcilla y se encuentra desplantado sobre material arcilloso. Muestra continuidad estratigráfica.

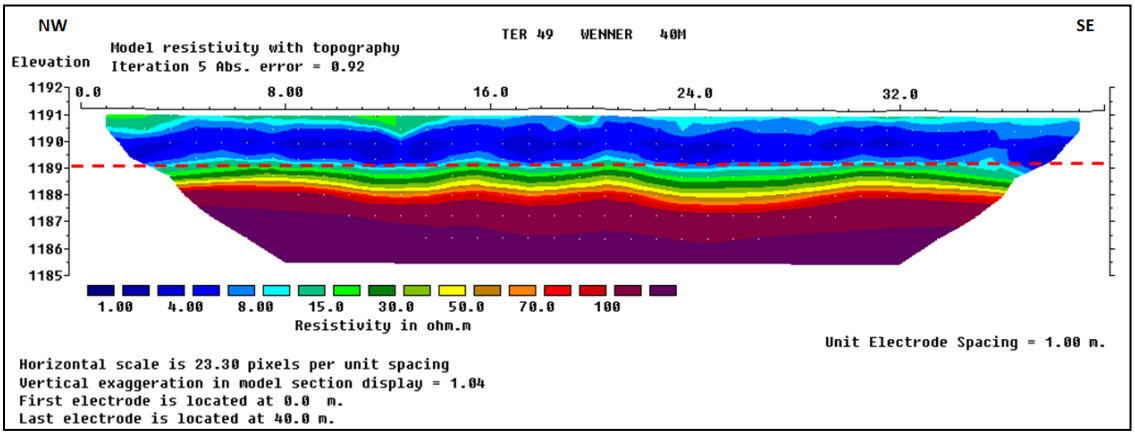


Figura VIII.1.49. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 49.

En el Perfil 49 (Figura VIII.1.49) se puede observar que el cuerpo del bordo está compuesto por material arcilloso y se encuentra desplantado sobre material asociado a arena. Muestra continuidad estratigráfica.

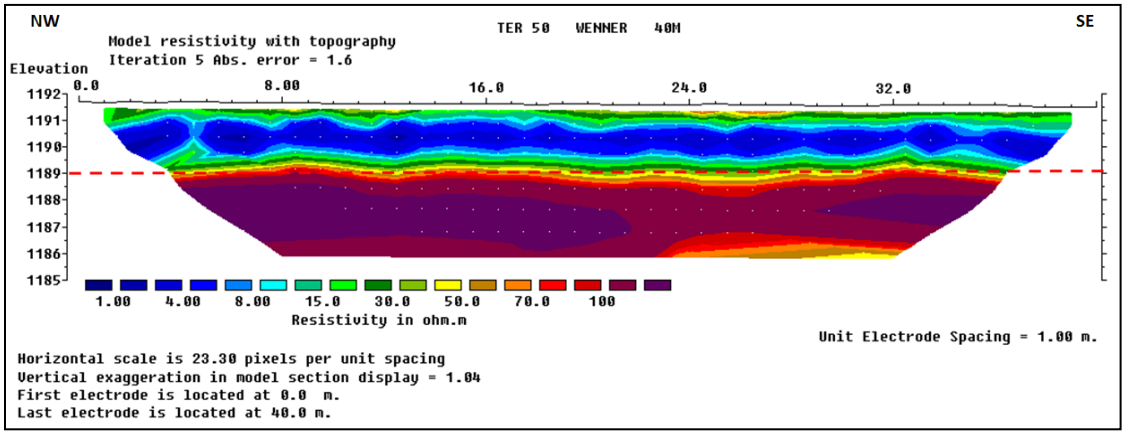


Figura VIII.1.50. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 50.

El Perfil 50 (Figura VIII.1.50) muestra continuidad estratigráfica, 0.5 m de espesor compuesto de limos en la corona y se encuentra desplantado en material asociado a arena.

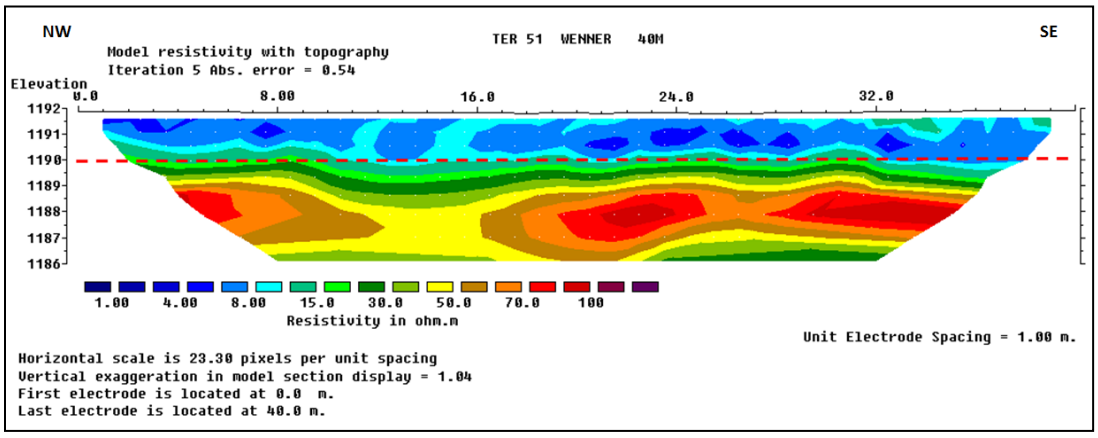


Figura VIII.1.51. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 51.

El Perfil 51 (Figura VIII.1.51) muestra continuidad estratigráfica, se puede observar que el cuerpo del bordo está compuesto por material arcilloso.

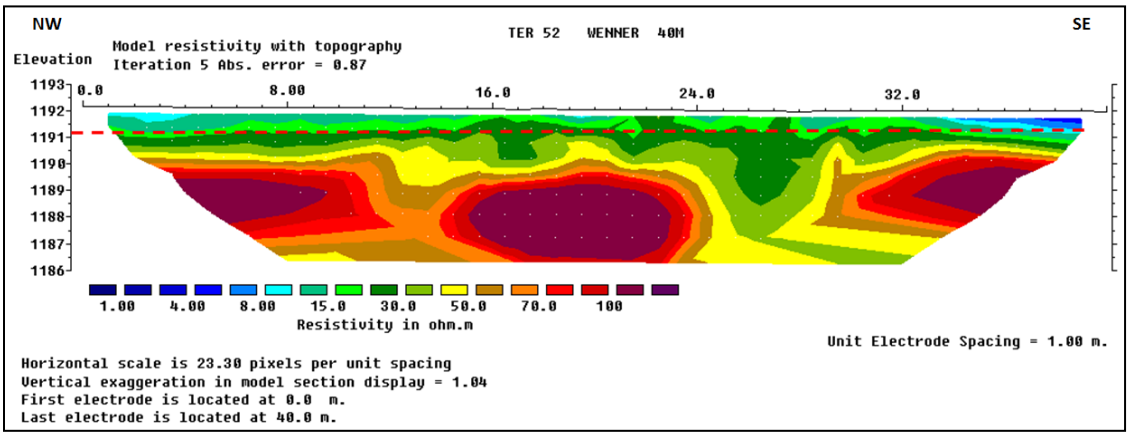


Figura VIII.1.52. Perfil Eléctrico Resistivo de la TER 52.

El Perfil 52 (Figura VIII.1.52) se encuentra a pocos metros de cercanía con el Boulevard Talamás Camandarí, por lo que se se puede observar que el cuerpo del bordo está compuesto por material limo-arenoso. En este punto el bordo solo tiene 1.0 m de altura.

IX. INTERPRETACIÓN DE PERFILES

El proceso de interpretación de los datos geoeléctricos a unidades litológicas se llevó a cabo a través de la integración de la información generada en este estudio. Las variaciones en profundidad registradas en el campo resistivo se consideraron consistentes con las observaciones geológicas superficiales en las cuales se observan horizontes litoestratigráficos interestratificados. La correlación entre rangos resistivos y unidades litologías se realizó tomando en consideración el hecho de que el tamaño de grano es directamente proporcional al registro electro resistivo (Tabla II).

Tabla II. Rangos resistivos y Unidades Geoeléctricas.

RANGO RESISTIVO (Ohm-m)	LITOLOGÍA
< 10	Arcillas Plásticas
15 -45	Limos o Arenas de Grano Fino
> 50	Arena de Grano medio a Grueso

A continuación de enlistan las anomalías más importantes y las líneas de TER en la que se observaron, así como el estatus de las mismas, ya sea que afecten o no la composición estructural del BMMH y los tramos en donde se localizan estas afectaciones (Figura VI.1).

Tabla III. Listado de Anomalías.

TER	ANOMALÍA (C.M. en metros)				STATUS
	A1	A2	A3	A4	
05	12	13	14	15	No compromete la estructura del bordo
06	8	9	10	26	**Con Afectación**
09	19	20	21	22	**Con Afectación**
16	13	14	15	16	No compromete la estructura del bordo
20	9	10	11	12	No compromete la estructura del bordo
23	20	21	22	23	**Con Afectación**
24	16	23	26	27	**Con Afectación**
25	24	25	26	29	**Con Afectación**
26	12	13	14		**Con Afectación**
27	10	11	12	13	**Con Afectación**

31	**9**	10	11		No compromete la estructura del bordo
02	**19**	**20**			**Con Afectación, se realizó un corte transversal al bordo**
39-43	Estas tomografías muestran espesores de más de 1m de materiales limo-arcillosos, además de estar el bordo desplantado sobre registros resistivos altos asociados con arena.				
48	No compromete la estructura del bordo sin embargo, el material del que está hecho este tramo del bordo es nuevo, debido al corte transversal realizado.				
01	No compromete la estructura del bordo sin embargo, a partir de este tramo se realizó un corte transversal al bordo hasta la TER 02.				

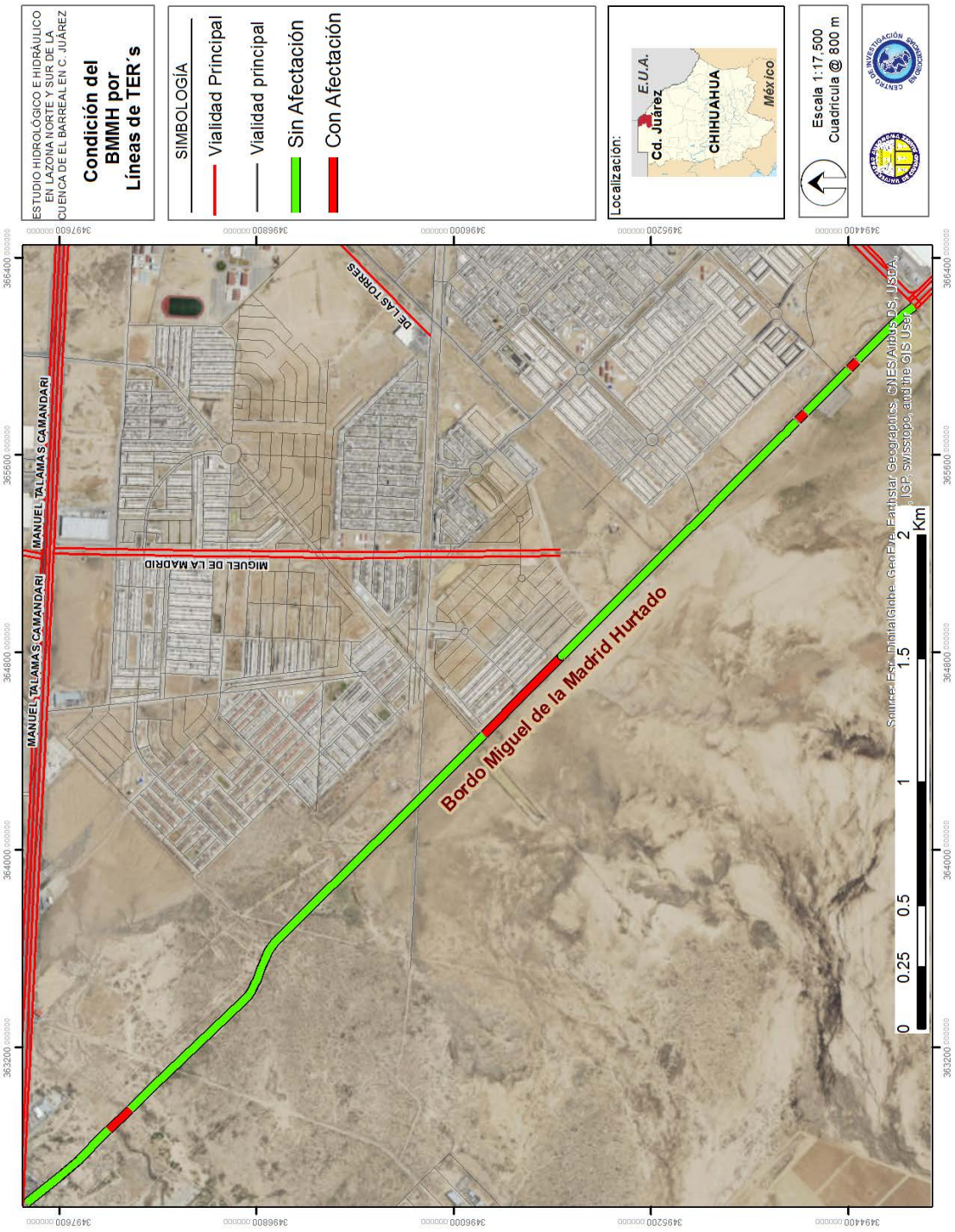


Figura IX.1 Interpretación de zonas Con y Sin afectación estructural en el BMMH.

X. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conforme a los estudios de esta investigación, en la cual se evaluaron las condiciones electroestratigráficas de la técnica de TER´s se concluye lo siguiente:

1. Las anomalías detectadas son asociadas con heterogeneidades laterales en el cuerpo del bordo. Esto ocurre principalmente entre las TERs 23, 24, 25, 26 y 27, mismas que se localizan a tan solo 40 metros del desarrollo habitacional mas cercano.
2. Entre las TERS 38 a 42 se observan registros resistivos asociados con materiales limo-arenosos con más de 1 m de espesor.

Conforme el resultado de la presente investigación se recomienda:

1. Validar la asociación litológica inferida por las TERs con los sondeos Directos
2. Analizar la operación hidráulica del bordo y su integridad estructural en los escenarios de falla revelados como factibles de ocurrir en las TERs.

ESTUDIOS DE SÍSMICA

XI. ESTUDIOS DE SÍSMICA

El método de sísmica de refracción consiste en determinar las propiedades mecánicas del subsuelo mediante la determinación de las velocidades de propagación de la onda compresional, referida como P, por ser el primer arribo en cualquier evento sísmico activo o pasivo. La velocidad sísmica es proporcional a la densidad del medio de propagación y es por consiguiente un método efectivo para inferir las propiedades elásticas o mecánicas del continuo que en este caso constituye el macizo rocoso a estudiar. En este método se transmite energía a través de un pulso sísmico al subsuelo por medio de un martillo o fuente propulsada elásticamente o por nitrógeno, en este caso se emplearía un martillo de 16 lbs. Una vez que la energía sísmica ha interactuado con las capas del subsuelo, la señal resultante de convolución de la fuente con el medio es medida en la superficie, y una vez procesada es utilizada para inferir propiedades del subsuelo.

La refracción sísmica se fundamenta físicamente en el proceso de refracción crítica para inferir velocidades y profundidades de capas (incrementos de velocidad respecto a la profundidad). El principio base es que cuando la onda sísmica entra a un contacto donde hay un contraste de velocidad, la dirección de la onda cambia al entrar en un nuevo medio. El cambio de dirección es gobernado por la ley de Snell.

$$\frac{sen\ i}{sen\ r} = \frac{V1}{V2}$$

Donde V1 y V2 son las velocidades de las capas superior e inferior. E *i* y *r* son los ángulos de incidencia y refracción. En la refracción se considera

principalmente la onda primaria P, para el estudio. Aunque es posible detectar fase de onda S mediante reducciones de tiempo, o bien desarrollando metodologías de dispersión como MASW y ReMI.

El arreglo consiste en colocar una línea de geófonos (receptores) en línea para capturar arribos de onda a partir de disparos sísmicos llevados a cabo por una fuente (marro o pistón) (Figura XI.1). Las ondas viajan en forma de ondas directas sobre la superficie, por reflexión sobre la capa reflectora y por refracción critica. La captura de los arribos es llevada a un sismograma en el cual cada geófono genera una traza (Figura XI.2), para entonces identificar y medir *tiempos de arribo* en una gráfica de dromocrónica o de tiempo-distancia

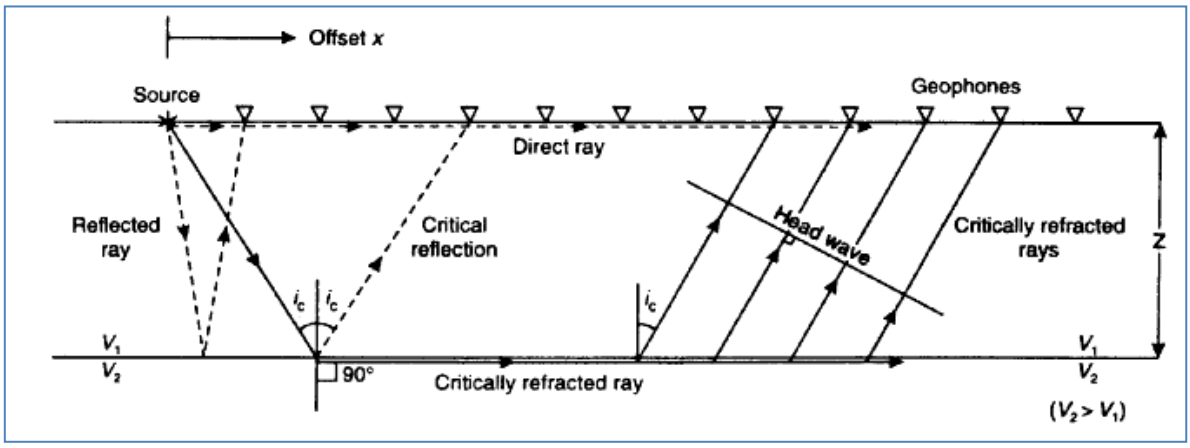
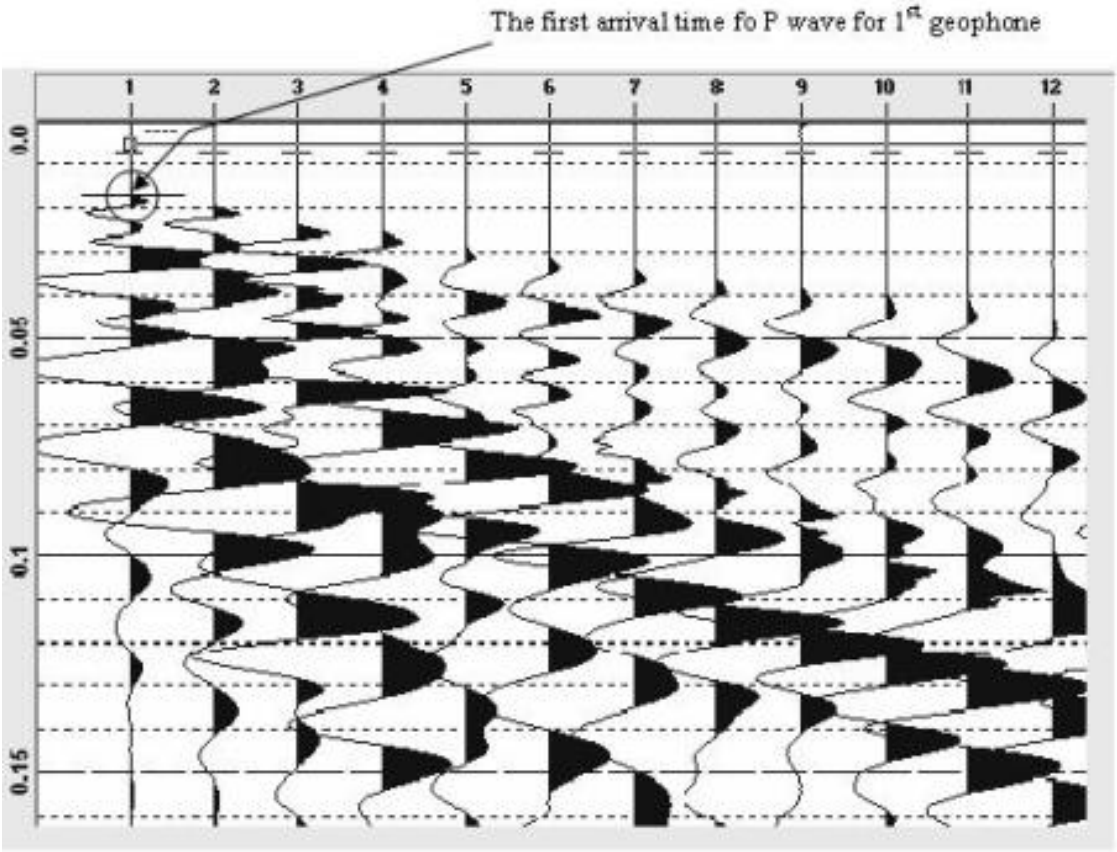


Figura XI.1. Adquisición y rayos involucrados en el método de sísmica de refracción.



.

Figura XI.2. Apilamiento de sismogramas de cada geófono en función de la distancia offset.

Las aplicaciones de la refracción sísmica entre otras son el análisis de la aptitud del suelo para propósitos de ingeniería (ripabilidad), estimación de profundidad a roca, exploración de acuífero e incluso estudios de estructura de la corteza.

Como ejemplo se muestra como en base al mapeo sistemático de la velocidad P es posible inferir el nivel de intemperismo, fracturamiento, índice de calidad

de la roca (RQD) y ripabilidad hasta una profundidad de 25 m en una zona propuesta para el desplante de la cortina de la Presa proyectada (Figura XI.3).

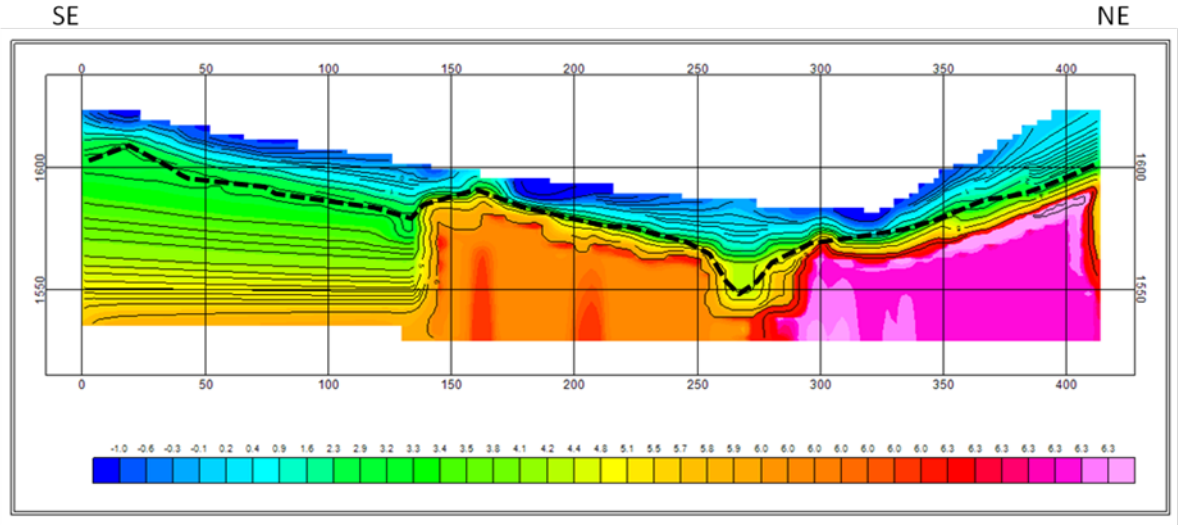


Figura XI.3. Sección sísmica de velocidad compresional P. Los tonos fríos (azul a verde) indican velocidades sísmicas menores a 3.0 km/s, son consideradas como de mala calidad para el desplante de la presa dado el grado e fracturamiento. Los tonos cálidos (amarillo a purpura) con velocidades mayores a 3.5 km/s se consideran con un RQD de regular a bueno para propósitos de cimentación. La línea punteada es el contorno de 3000 m/s, velocidades abajo de este valor se consideran ripables y con RQD malo. (Fuente: estudios propios).

XI.1. ONDA DE CORTE (S)

La velocidad de la onda de corte o cizalla Vs se puede determinar mediante refracción utilizando geófonos horizontales, siendo el método de procesamiento igual al explicado para la onda de cuerpo compresional P explicado en el apartado anterior. También es posible calcular la Vs en función de la onda superficial Raylegh mediante la técnica o método MASW, la cual a continuación se detalla.

METODO MASW

El método de Adquisición Multicanal de Ondas Superficiales, conocido como MASW por sus siglas en el idioma inglés, consiste en la medición de ondas de corte o secundarias (Vs) a partir de las ondas superficiales Raylegh, cuyo componente principal es precisamente la onda Vs. El método se basa en la medición de la dispersión que sufre el paquete de ondas o wavelet conforme la energía alcanza mayor "offsets" o distancias respecto del disparo (Figura XI.1.1).

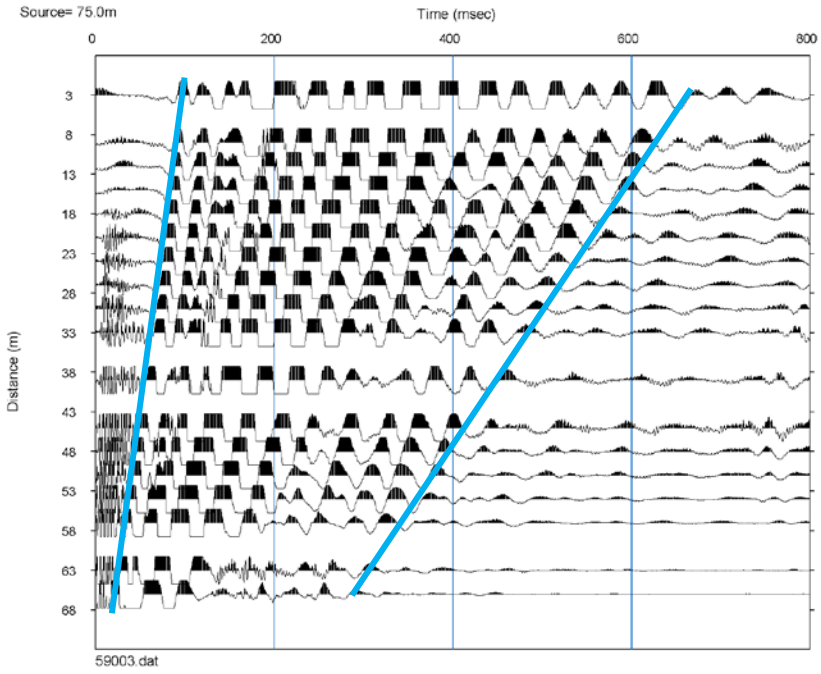


Figura XI.1.1. Sismograma mostrando la dispersión de fases dentro del paquete de la onda Raylegh. La separación entre líneas azules muestra como las fases se retrasan conforme aumenta el offset o distancia.

Las diferentes velocidades de propagación de las diferentes fases que componen la onda Raylegh son función de la frecuencia, es decir, las longitudes de onda corta mapean estructuras someras en tanto que las longitudes onda larga mapean estructuras más profundas (Figura XI.1.2). Por lo general, la longitud de onda más larga es precisamente la máxima distancia entre geófonos, siendo la profundidad de penetración aproximadamente la mitad del largo del tendido en el caso del disparo más lejano.

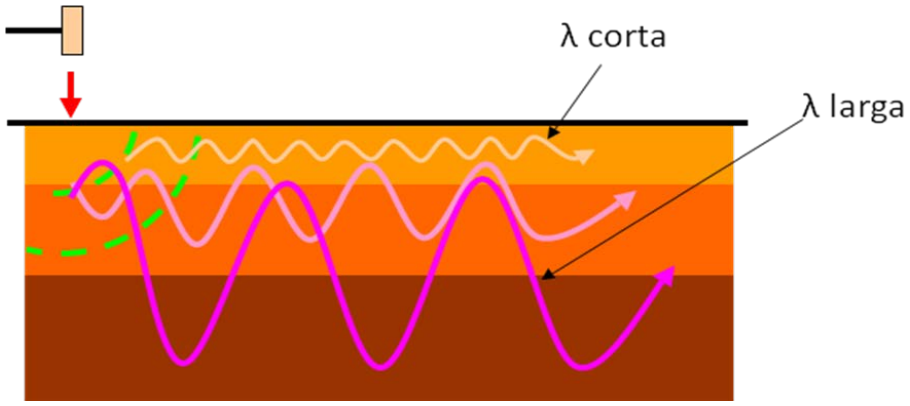


Figura XI.1.2. Diferente penetración en términos de la frecuencia o longitud de onda.

XI.2. TRABAJO DE CAMPO

Se adquirieron en campo ocho (8) líneas de Onda Superficial con longitud de 38 m y orientación Noroeste-Sureste a lo largo del Bordo Miguel de la Madrid Hurtado (Figura XI.2.1). Los registros de apilamiento del set de ondas se muestran en la Figura XI.2.2 a la Figura XI.2.10.

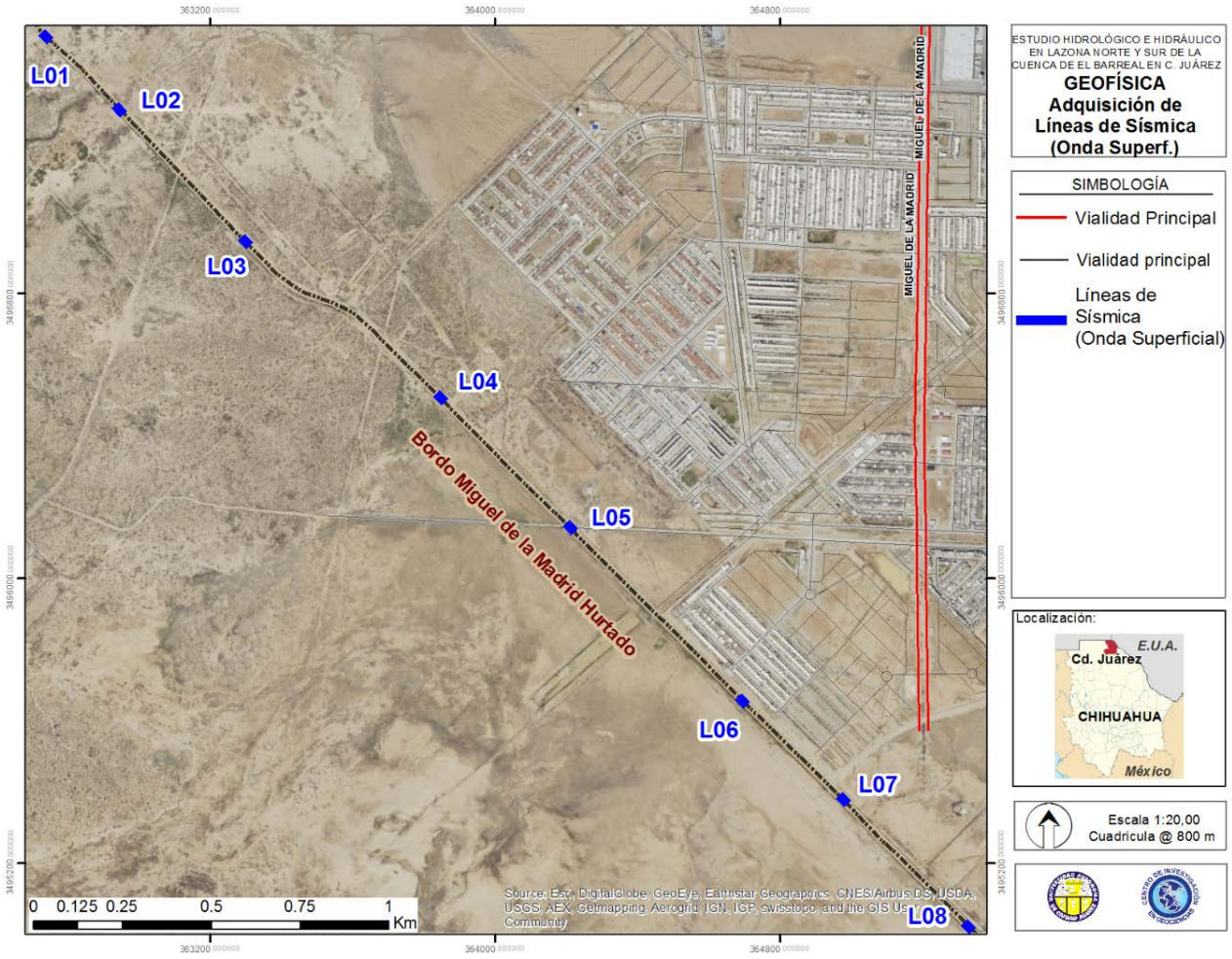


Figura XI.2.1. Adquisición de 8 líneas de Onda Superficial en el BMMH.

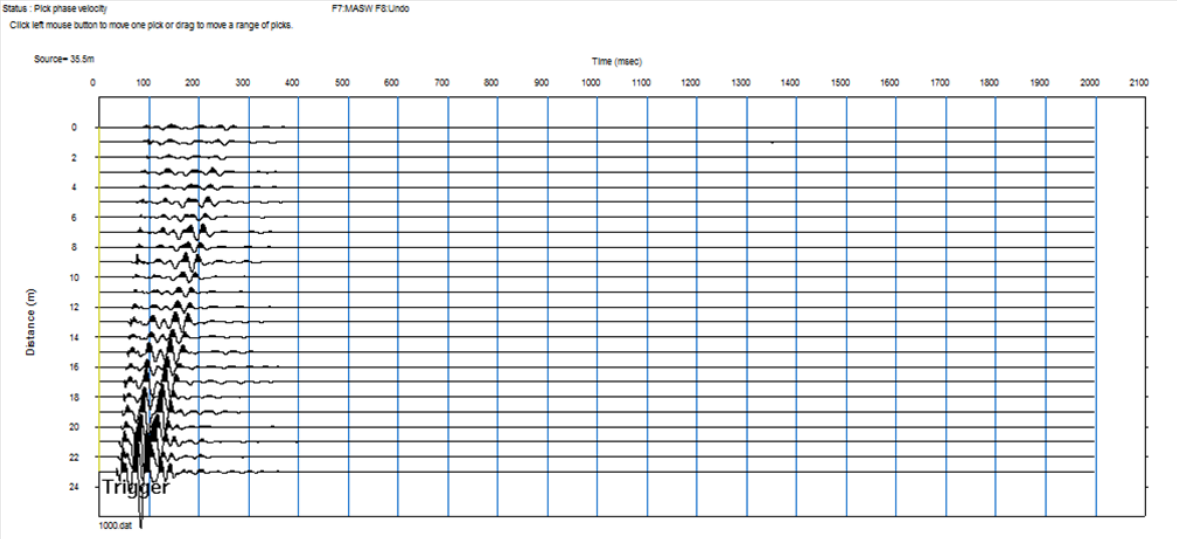


Figura XI.2.2. Línea de Onda Superficial 01.

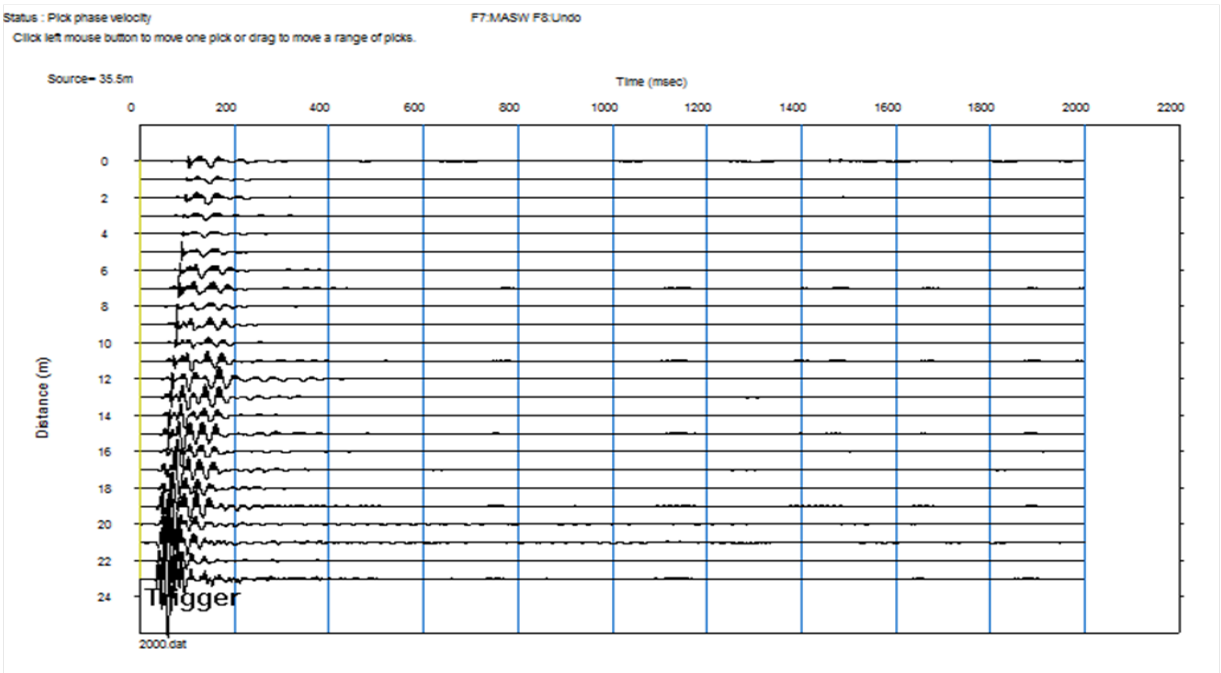


Figura XI.2.3. Línea de Onda Superficial 02.

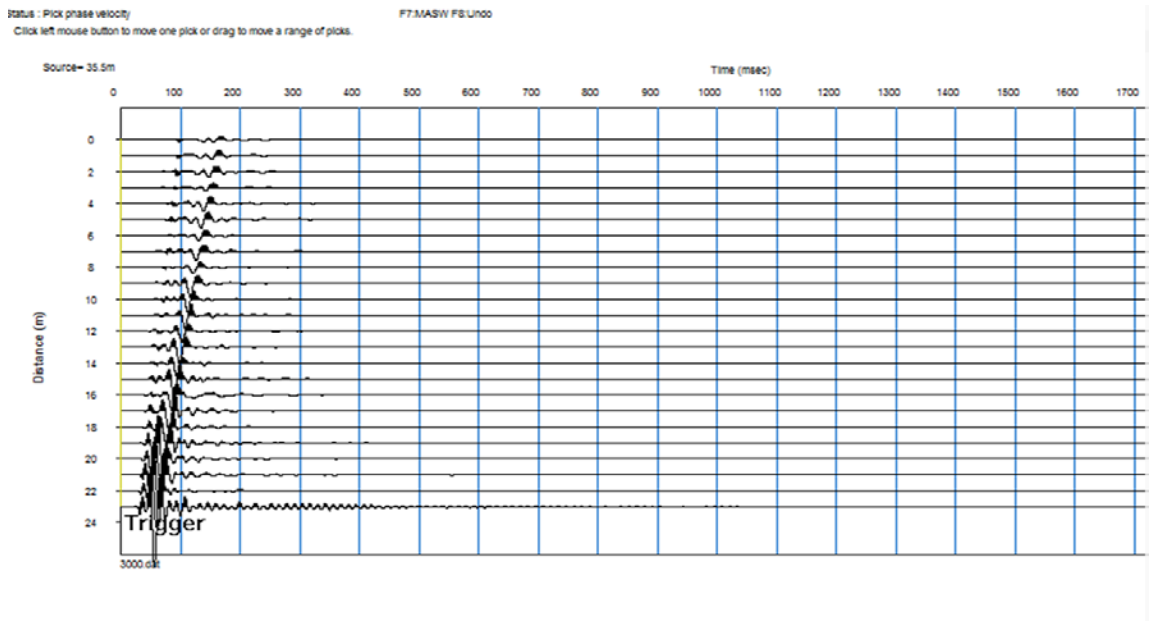


Figura XI.2.4. Línea de Onda Superficial 03.

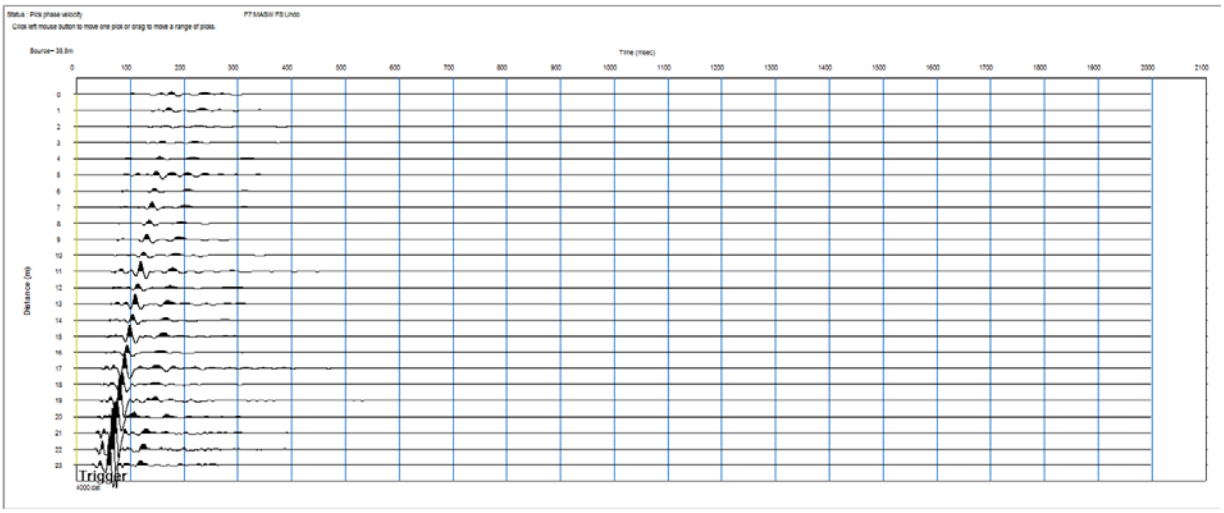


Figura XI.2.5. Línea de Onda Superficial 04.

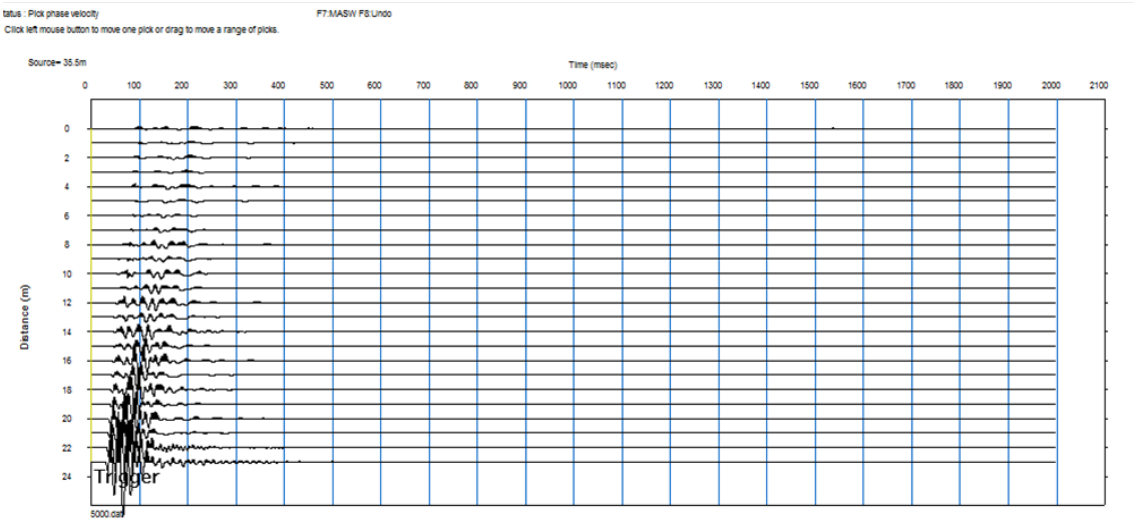


Figura XI.2.6. Línea de Onda Superficial 05.

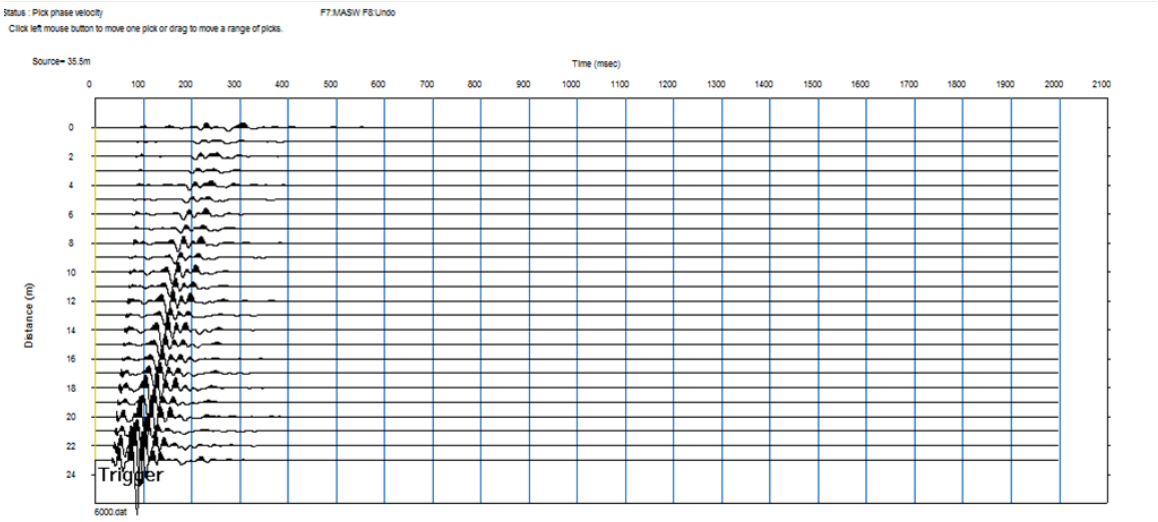


Figura XI.2.7. Línea de Onda Superficial 06.

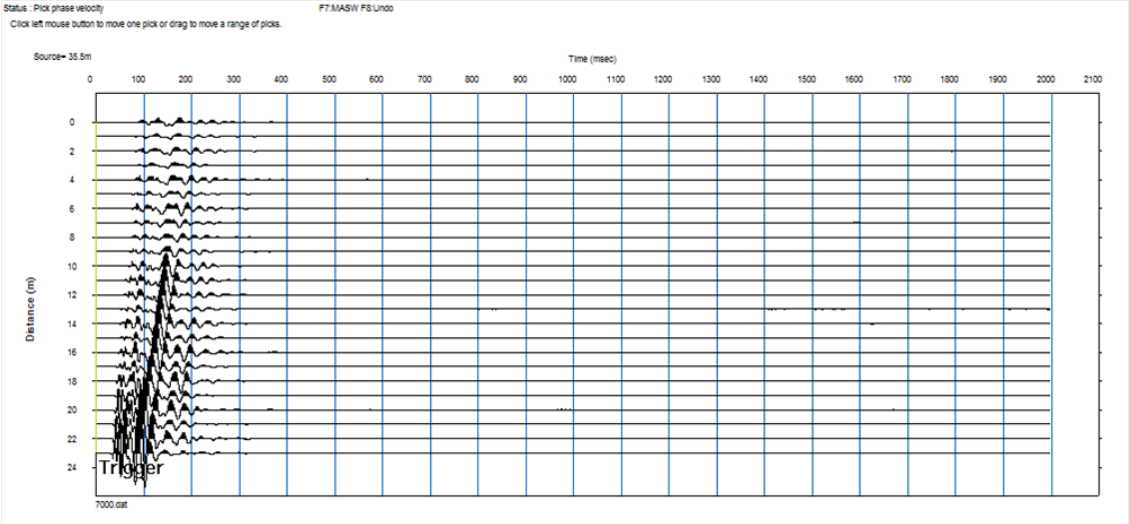


Figura XI.2.6. Línea de Onda Superficial 07.

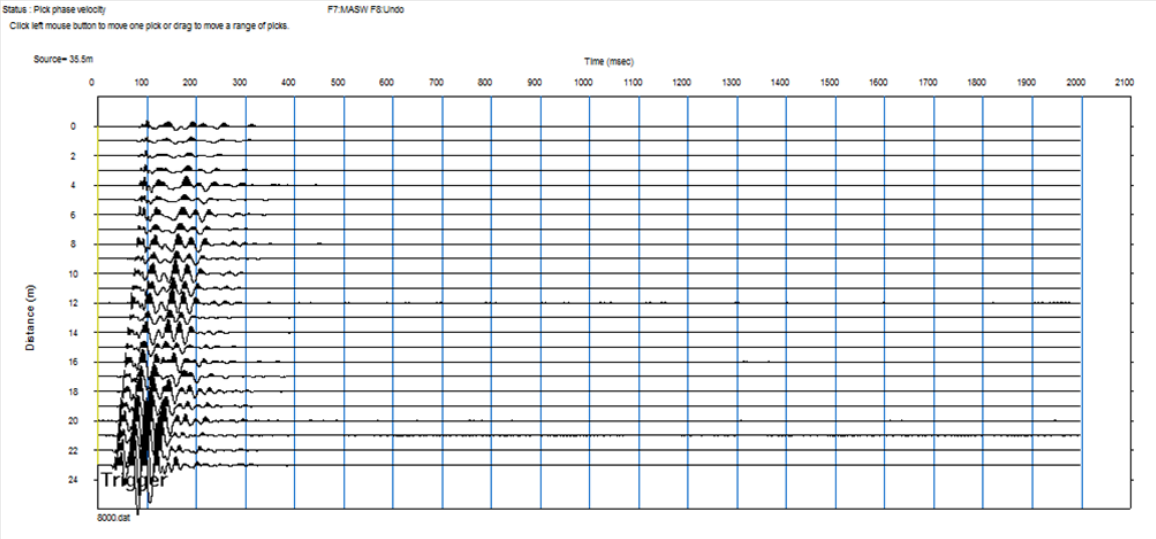


Figura XI.2.7. Línea de Onda Superficial 08.

XI.3. PROCESAMIENTO DE LA ONDA DE CORTE (S)

El procesamiento consiste en generar una curva de dispersión a partir del espectro de frecuencia-velocidad generado a partir de la transformada Tau-P aplicada sobre los sismogramas (Figura XI.3.1), posteriormente se corrigen los arribos seleccionados mediante el filtrado de sobretonos, y se invierte la curva suavizada de dispersión, generándose así un modelo 1D de velocidad de corte

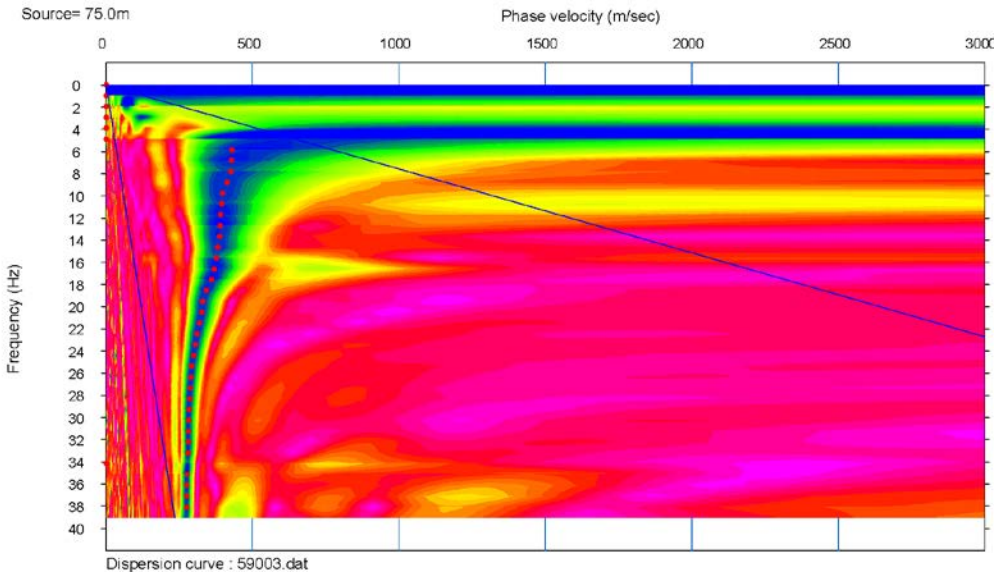


Figura XI.3.1. Espectro Frecuencia-Velocidad. Las mayores energías o amplitudes en azul representan la zona que se mapean los arribos identificados (puntos rojos) asociados con las diferentes fases.

A continuación, se muestran las 8 secciones en el espectro frecuencia-velocidad (Figura XI.3.2 a la Figura XI.3.9).

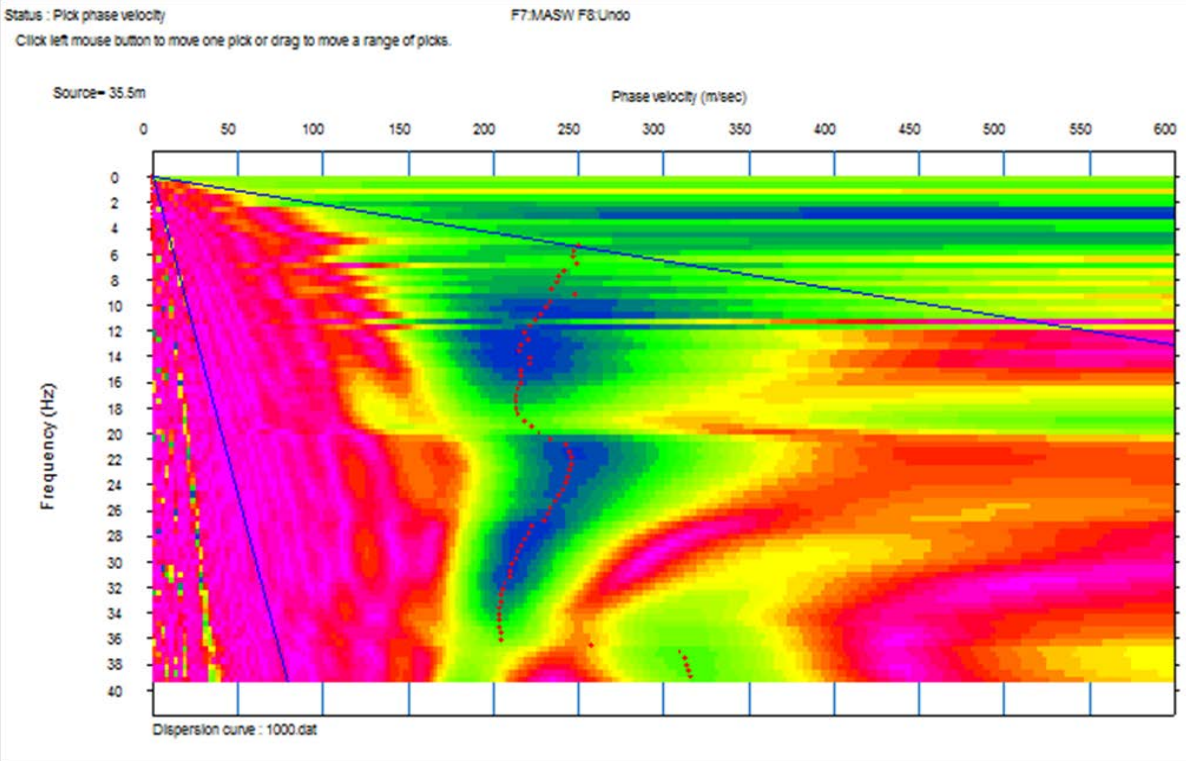


Figura XI.3.2. Espectro Frecuencia-Velocidad de la línea Onda Superficial 01.

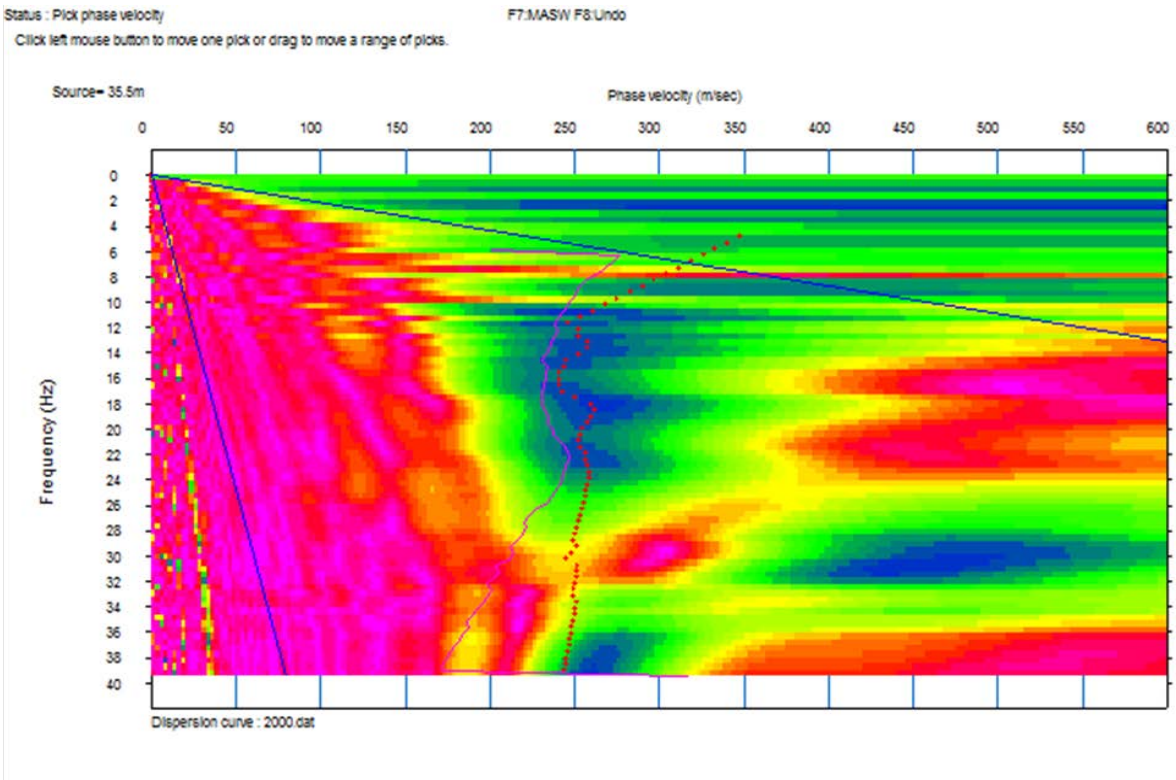


Figura XI.3.3. Espectro Frecuencia-Velocidad de la línea Onda Superficial 02.

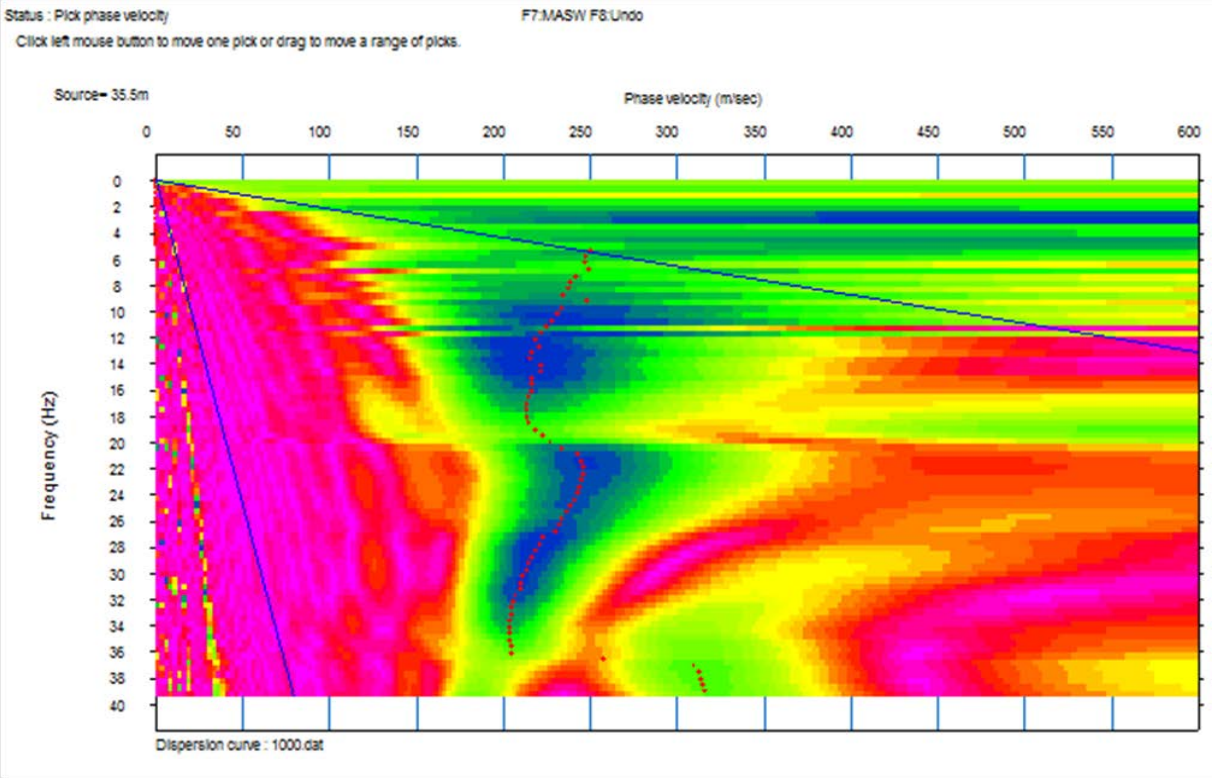


Figura XI.3.4. Espectro Frecuencia-Velocidad de la línea Onda Superficial 03.

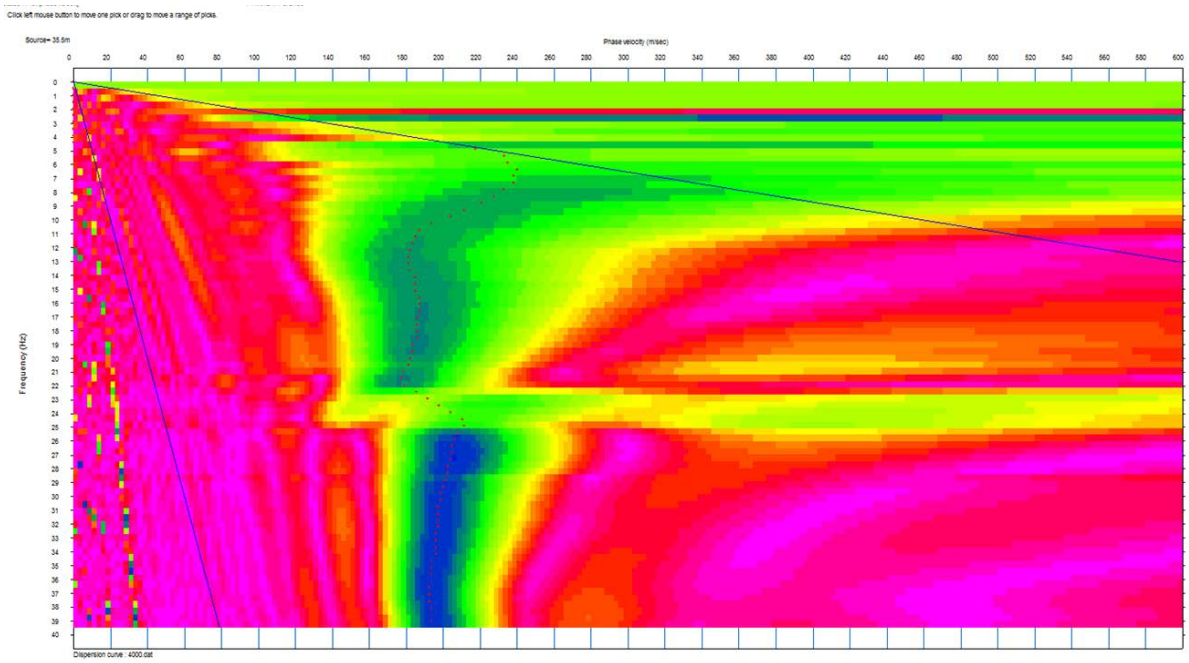


Figura XI.3.5. Espectro Frecuencia-Velocidad de la línea Onda Superficial 04.

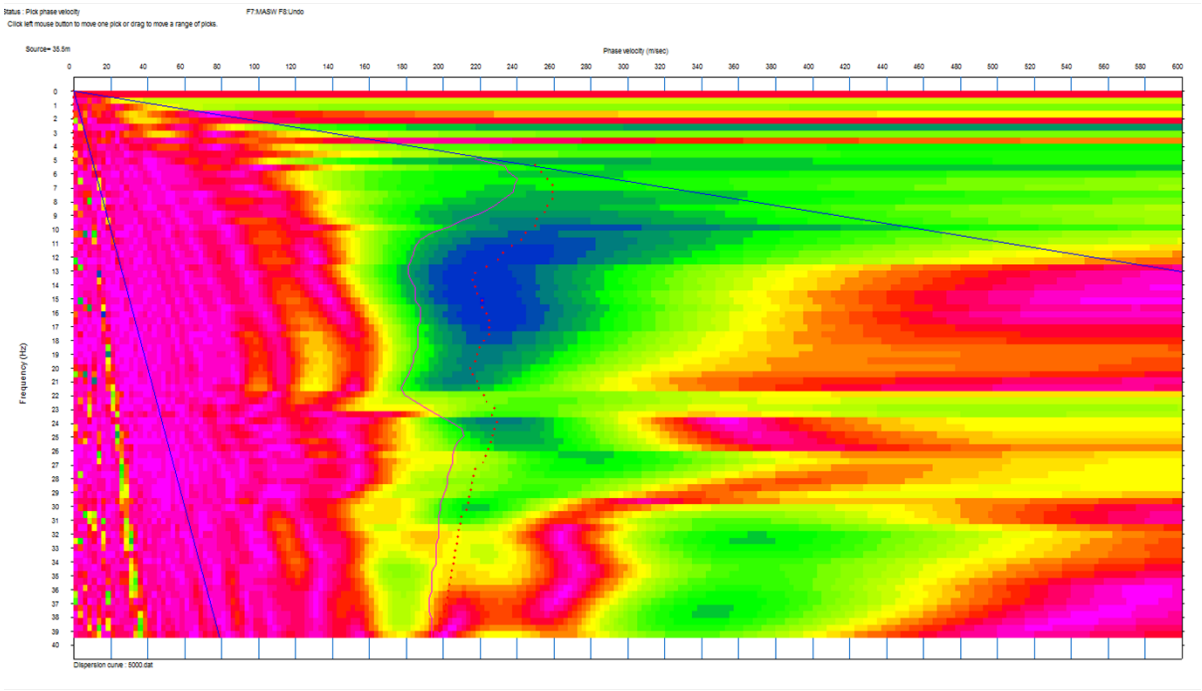


Figura XI.3.6. Espectro Frecuencia-Velocidad de la línea Onda Superficial 05.

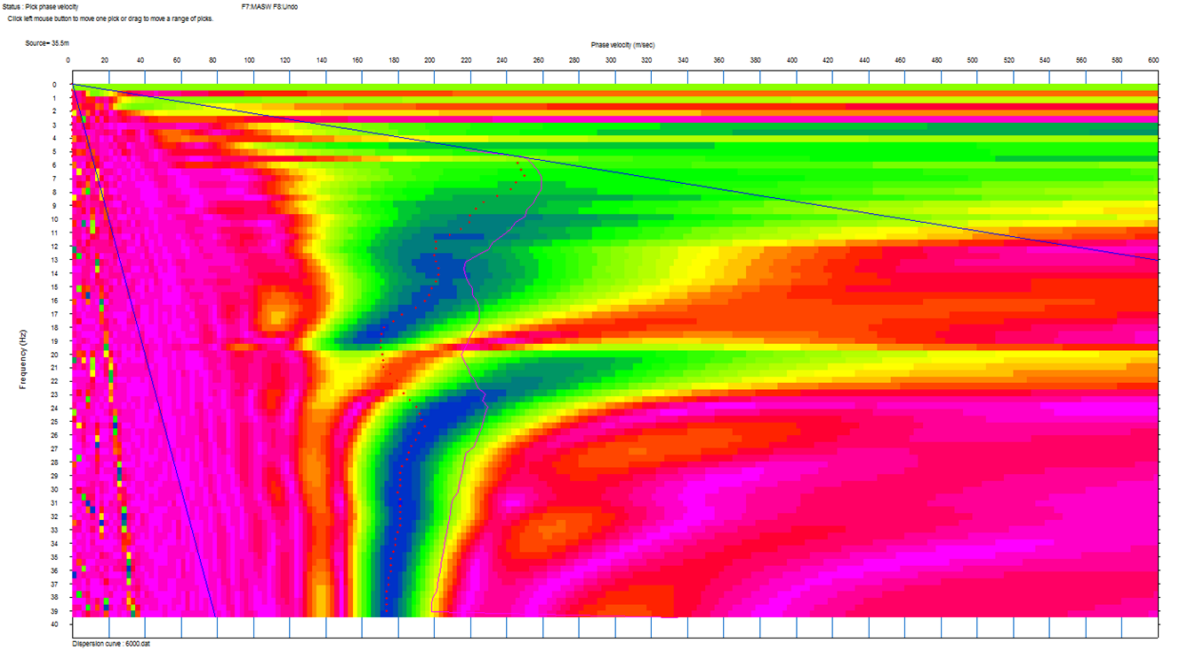


Figura XI.3.7. Espectro Frecuencia-Velocidad de la línea Onda Superficial 06.

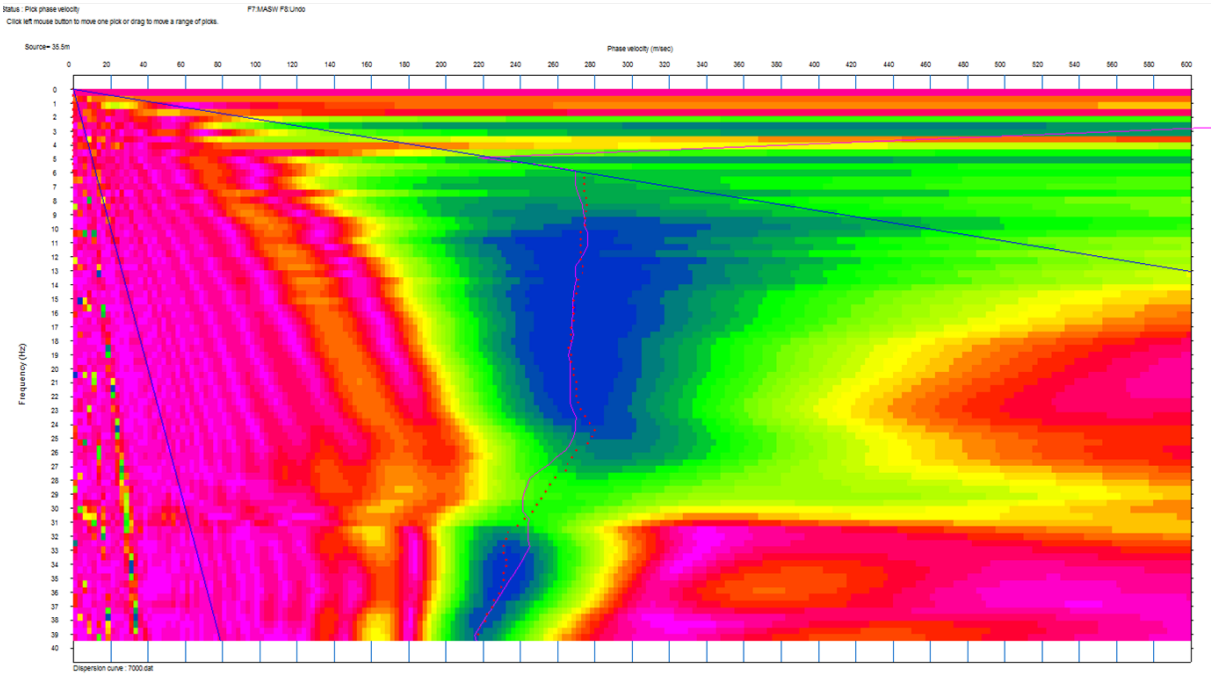


Figura XI.3.8. Espectro Frecuencia-Velocidad de la línea Onda Superficial 07.

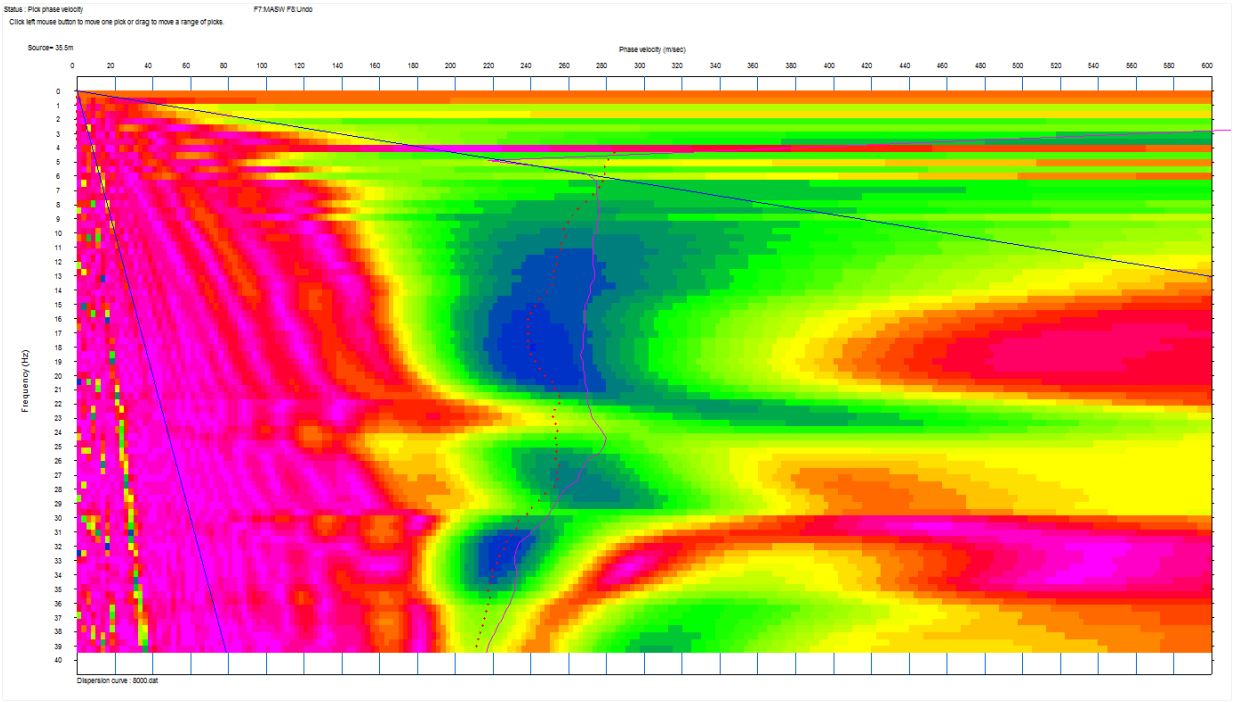


Figura XI.3.9. Espectro Frecuencia-Velocidad de la línea Onda Superficial 08.

XI.4. RESULTADO DE LA ONDA DE CORTE (S)

La ventaja de este método conforme al objetivo global de este estudio de mapear la integridad estructural del BMMH, es que a partir del modelo 1D es factible el correlacionar las Vs obtenidas con el parámetro N (número de golpes) de la Prueba de Penetración Estándar (SPT por sus siglas en inglés) y relacionarlo con la capacidad de carga del subsuelo en 1D (Figuras XI.4.1 a la Figura XI.4.8).

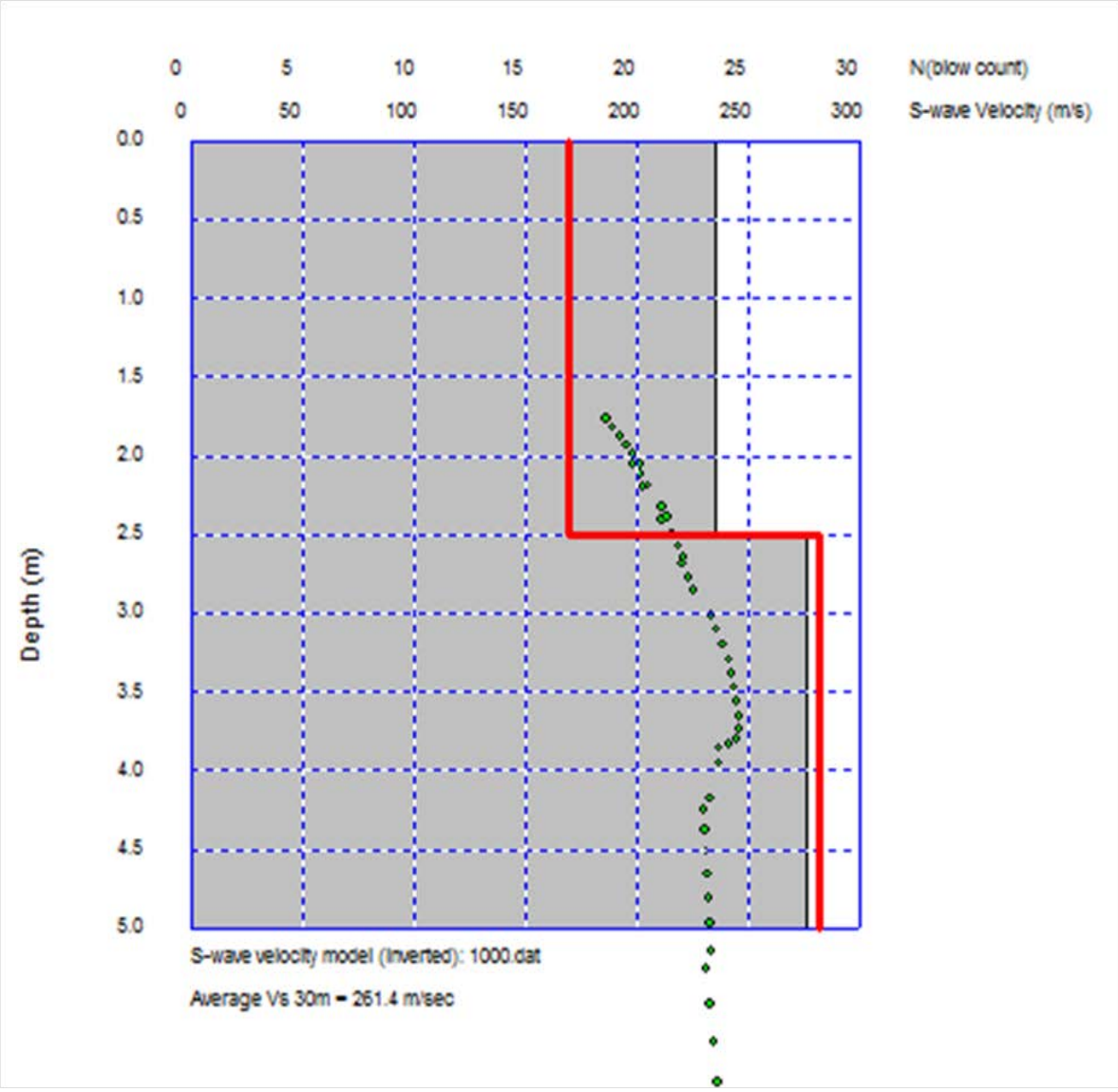


Figura XI.4.1. Modelo Vs en 1D-01. Conversión a N (línea roja) de la SPT.

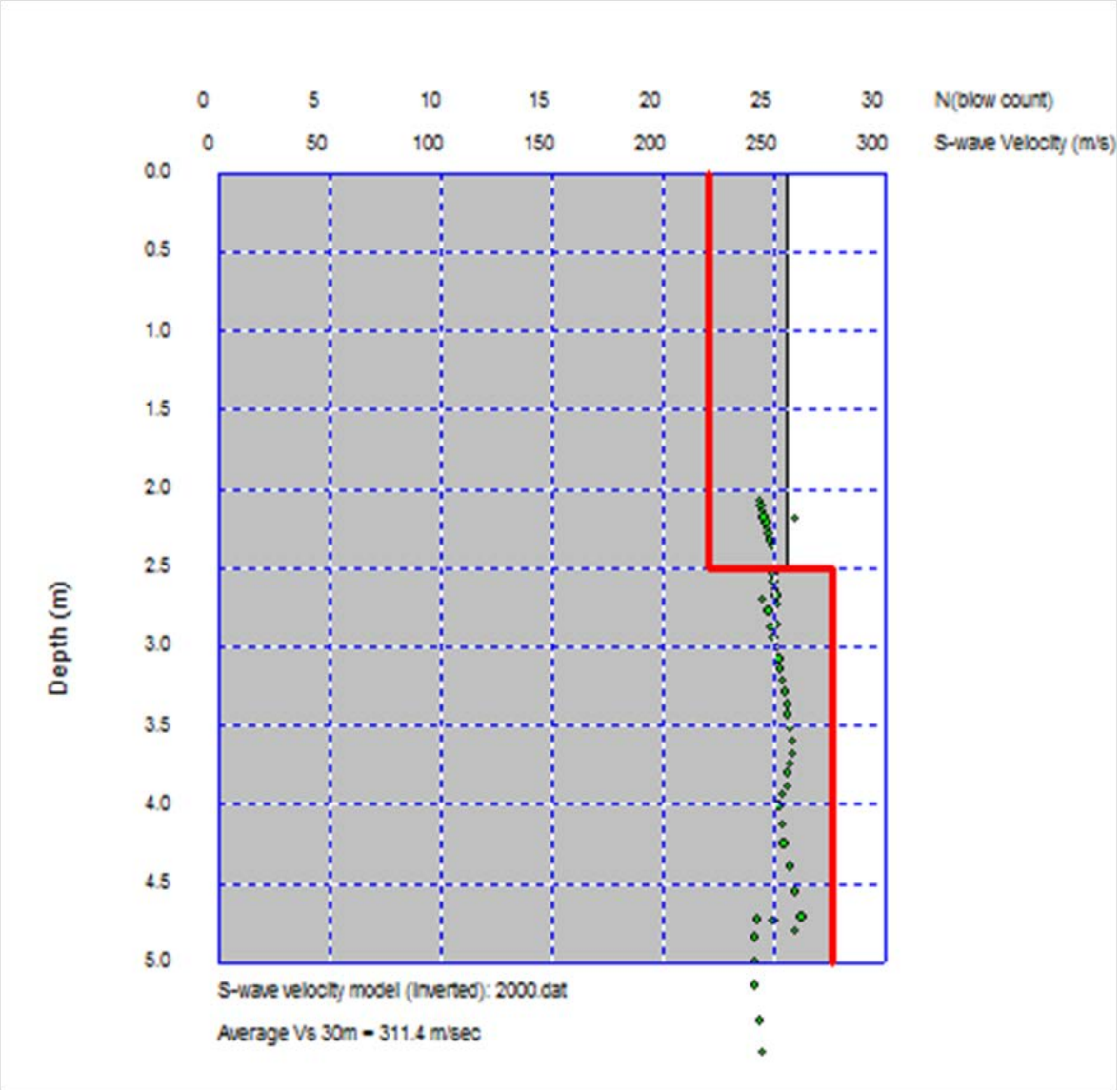


Figura XI.4.2. Modelo Vs en 1D-02. Conversión a N (línea roja) de la SPT.

(a)

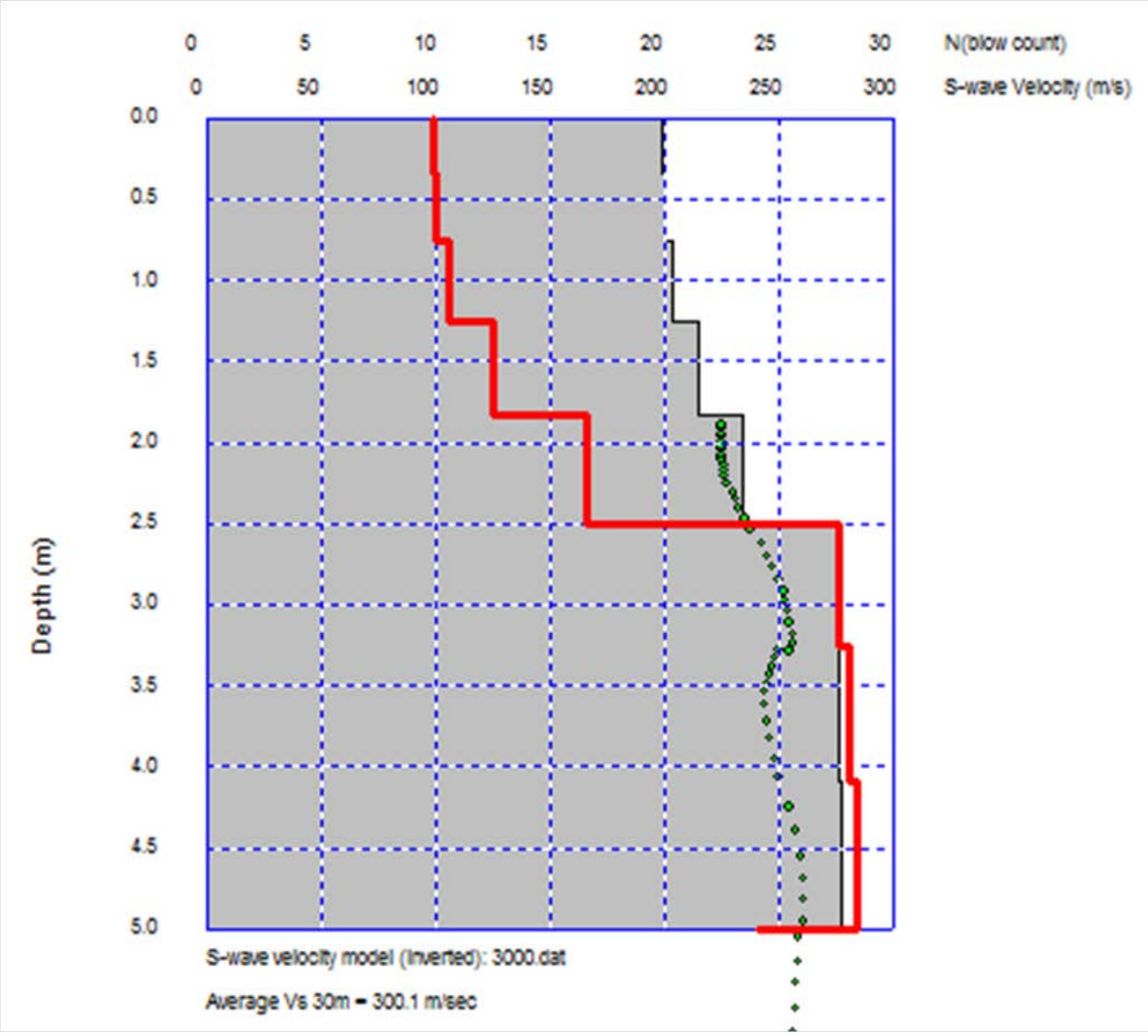


Figura XI.4.3. Modelo Vs en 1D-03. Conversión a N (línea roja) de la SPT.

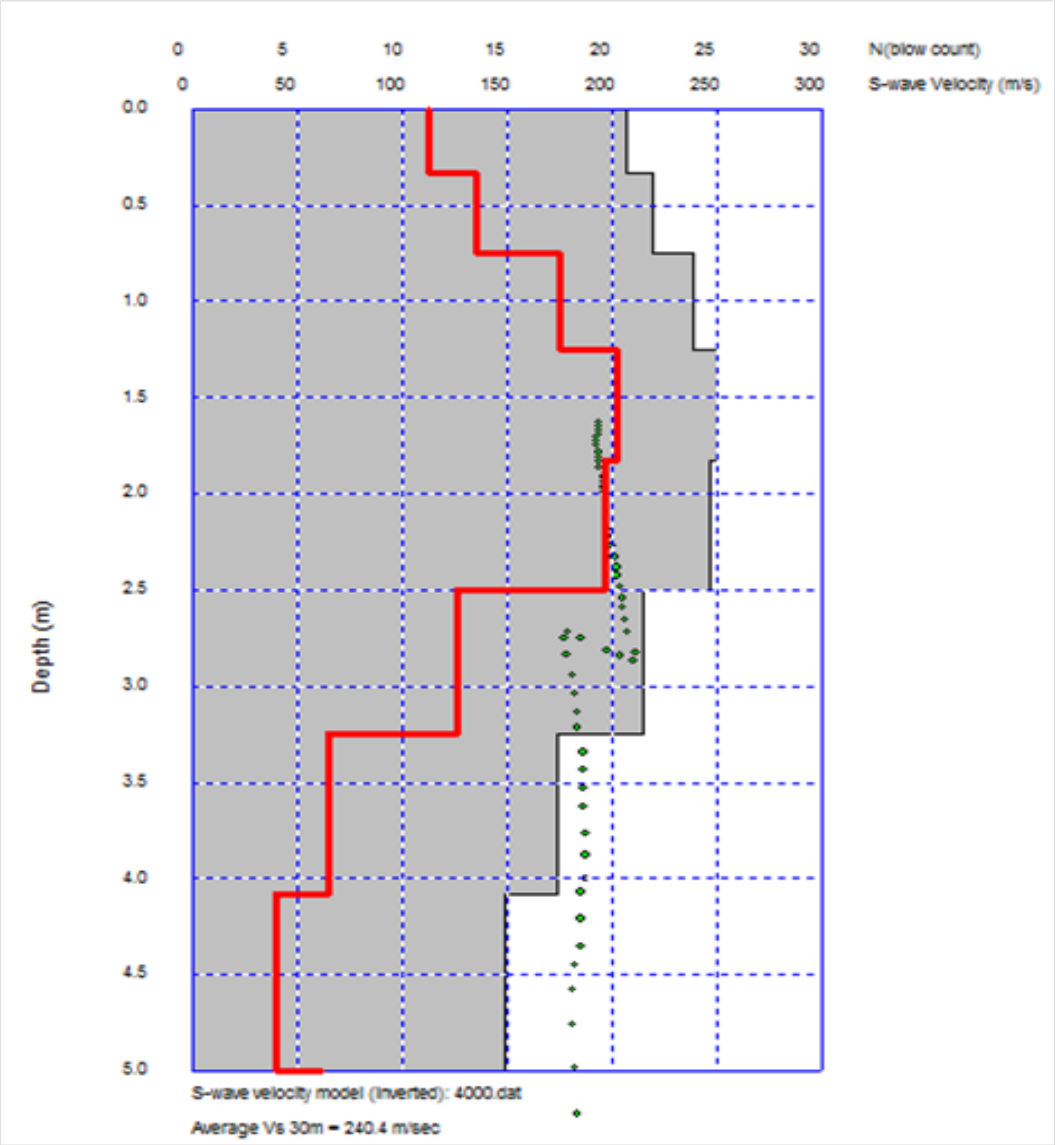


Figura XI.4.4. Modelo Vs en 1D-04. Conversión a N (línea roja) de la SPT.

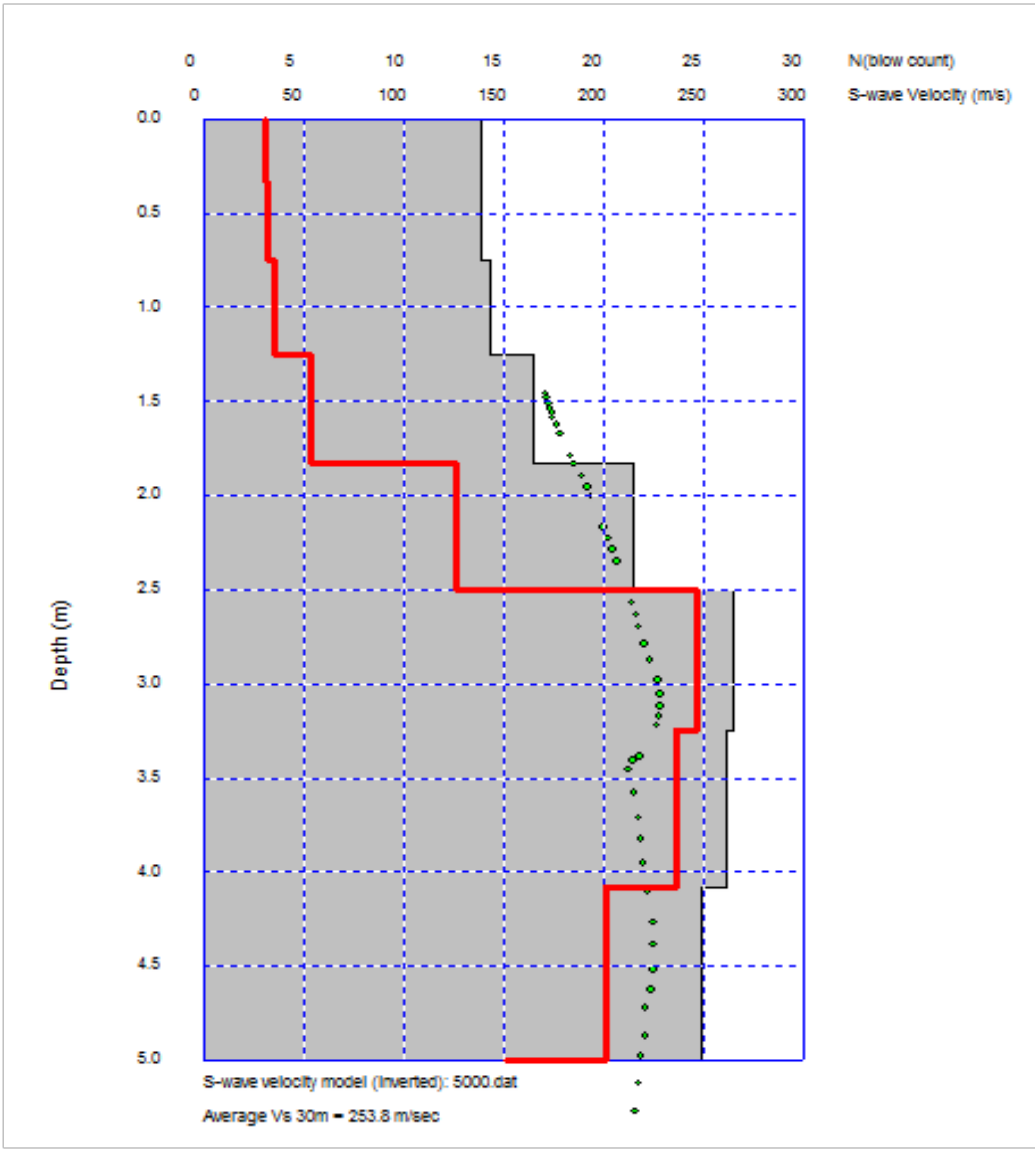


Figura XI.4.5. Modelo Vs en 1D-05. Conversión a N (línea roja) de la SPT.

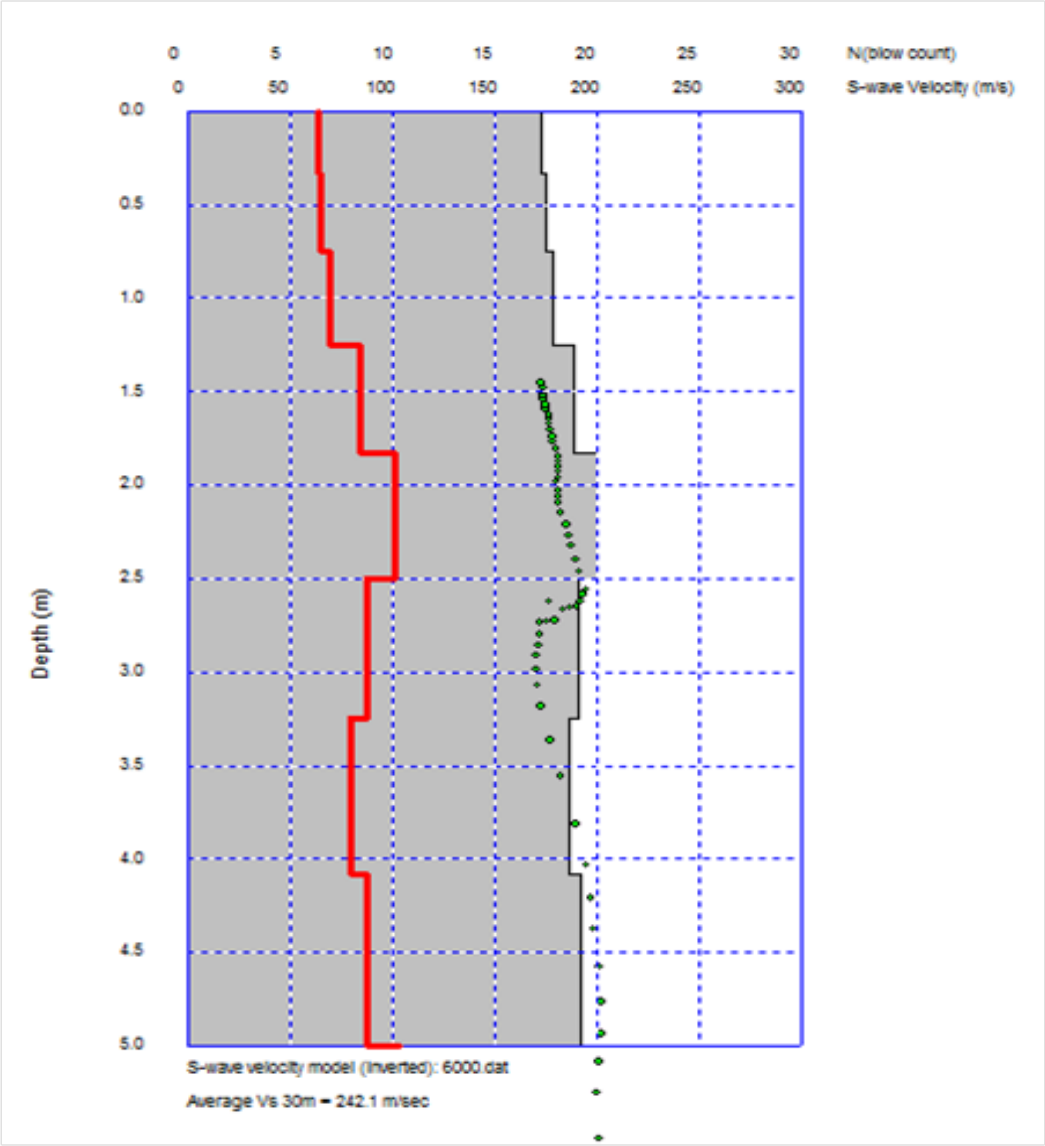


Figura XI.4.6. Modelo Vs en 1D-06. Conversión a N (línea roja) de la SPT.

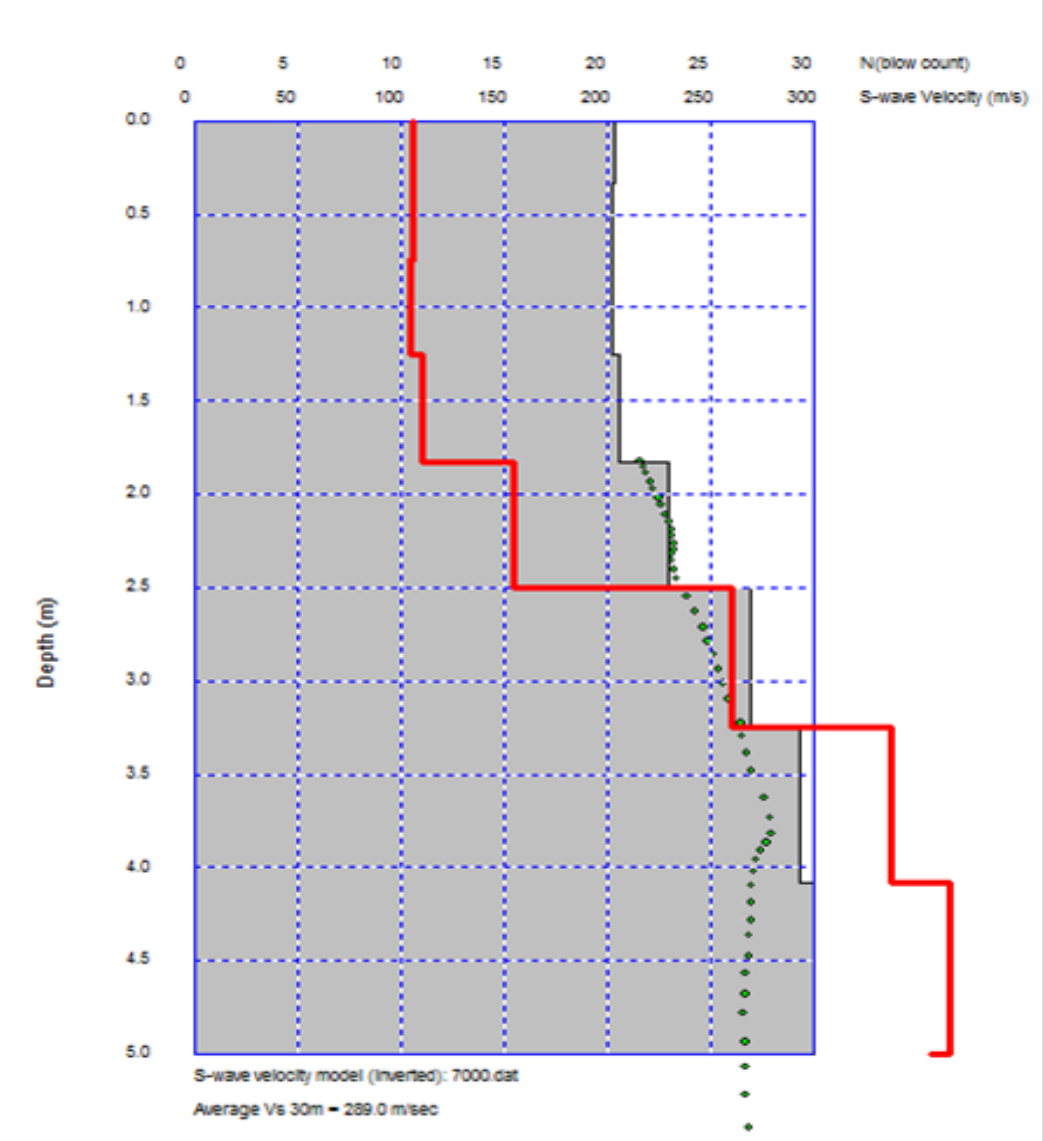


Figura XI.4.7. Modelo Vs en 1D-07. Conversión a N (línea roja) de la SPT.

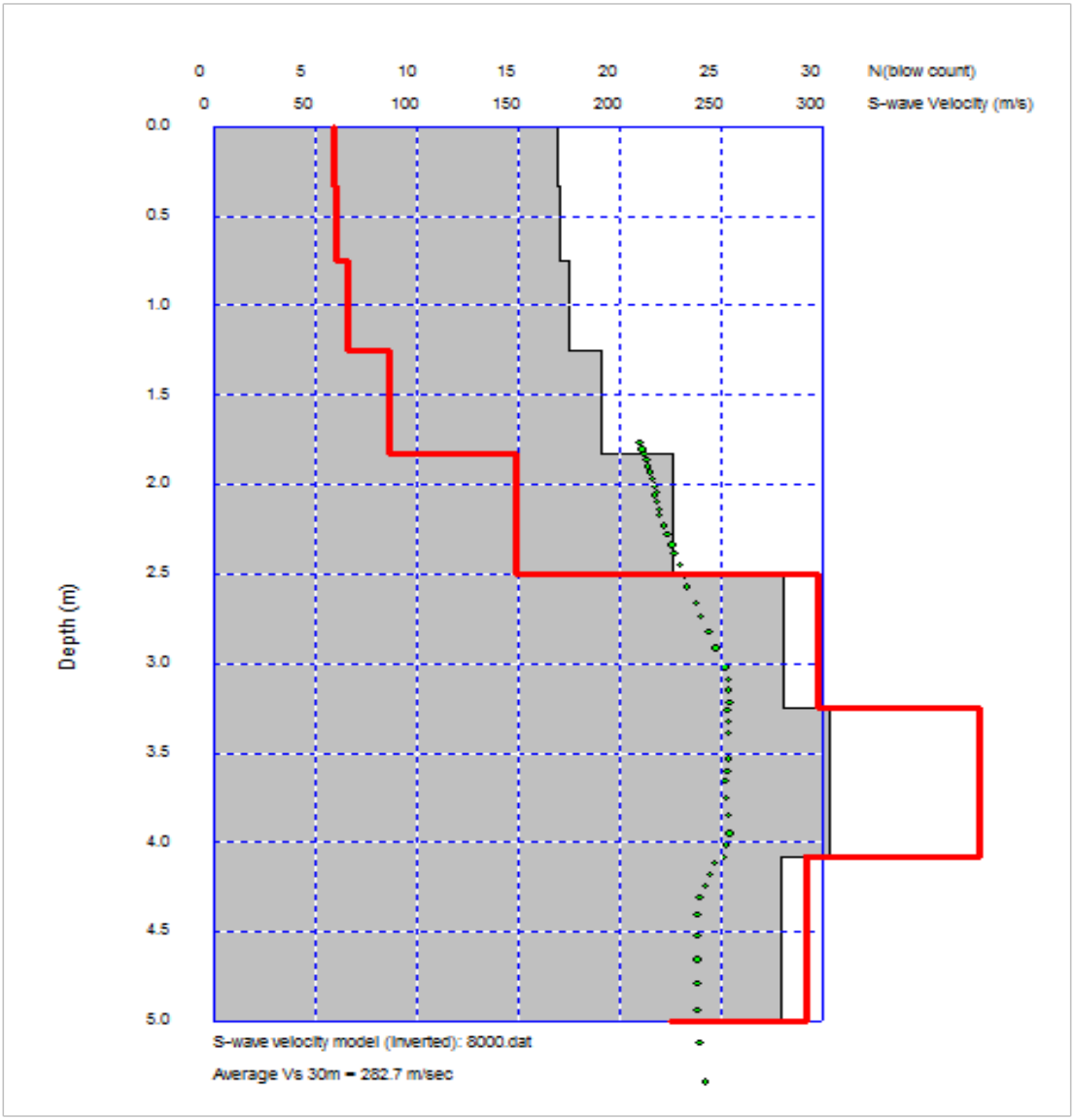


Figura XI.4.8. Modelo Vs en 1D-08. Conversión a N (línea roja) de la SPT.

XI.5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conforme los estudios de Onda Superficial, se concluye que el primer metro no fue revelado por la metodología por cuestiones del contenido espectral del registro sísmico como lo revelan los conos de dispersión.

Las velocidades de onda de corte son en promedio de 300 m/s asociadas con N mayor de 25, sin embargo hay registros bajos en velocidad en la primer capa de algunos sondeos, con N menores a 15.

Los valores bajos de Vs y N son indicativos de una posible falta de integridad estructural.

ESTUDIOS DE GEORADAR

XII. ESTUDIOS DE GEORADAR

XII.1. INTRODUCCIÓN

Los estudios de Georadar consisten en medir variaciones de la constante dieléctrica en el régimen de desplazamiento del campo electromagnético. Estas mediciones permiten detectar detalles ocultos de las estructuras tales como la presencia de varilla de refuerzo, zonas de daño como oquedades o fracturas, así como la presencia de objetos que sean conductivos. El procedimiento consiste en desplegar o arrastrar la antena sobre la superficie a estudiar y en la pantalla DVL se van desplegando los registros en tiempo real (Figura XII.1.1). Esta técnica geofísica es muy versátil, ya que sus aplicaciones van desde estudios en ciencias forenses, como también en la ingeniería civil, arqueología, minas y cavernas, etc.

Figura XII.1. Aplicaciones del Georadar (GPR).

XII.1. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para la consecución del objetivo global de este estudio consistió en aplicar el método geofísico de Georadar o radar de suelos.

XII.1.1. Georadar o Ground Penetrating Radar (GPR)

Es una técnica no destructiva orientada al estudio del suelo superficial y que se fundamenta en la capacidad de las ondas de radar para propagarse a través de medios poco conductivos, por lo que opera dentro del rango de frecuencias (MHz) sensibles a las variaciones o contrastes del parámetro físico de la constante dieléctrica. Este método emplea dos antenas, la primera que es la que emite pulsos electromagnéticos y la segunda antena los recibe. Estos pulsos que se emiten son un frente de onda que es parcialmente reflejado al encontrar una discontinuidad o un cambio de material en el subsuelo, así, pudiendo ser detectado en la superficie mediante una antena receptora (Figura XII1.1.1).

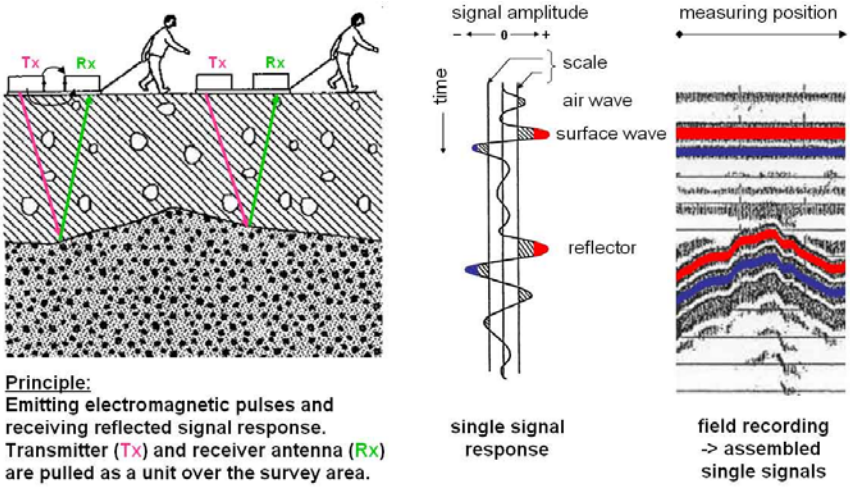


Figura XII.1.1.1. Principio de operación del Georadar (GPR).

Para la adquisición de las líneas de Georadar se utilizó el equipo GPR Nogging Smart Cart 250 del proveedor canadiense *Sensors and Software.*

Figura XII.1.1.2. Equipo de georadar GPR Nogging Smart Cart 250.

XII.2. TRABAJOS DE CAMPO

Se realizaron setenta y cuatro (74) líneas de Georadar a lo largo del Bordo Miguel de la Madrid, con una orientación de Noroeste-Sureste (Figura XII.2.1).

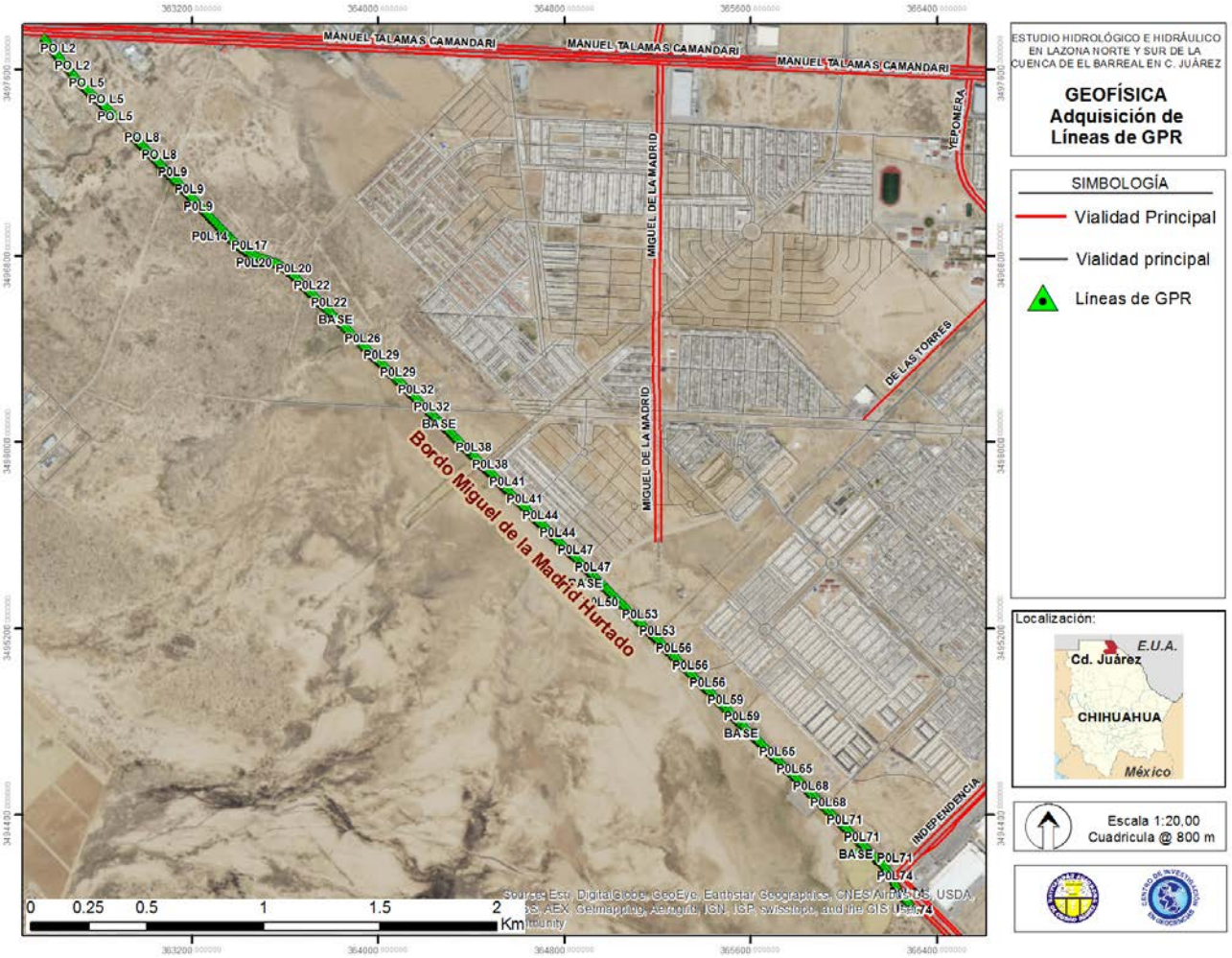


Figura XII.2.1. Líneas de adquisición dentro del área de estudio.

XII.3. PROCESAMIENTO

El flujo de procesamiento consistió en aplicar diferentes procesos o filtros a los datos crudos. El primer filtro aplicado fue el de DEWOW para suprimir el efecto "ringing" inherente a la toma de datos, posteriormente se aplicó una ventana de ganancia automática (AGC) para resaltar los arribos o pulsos iniciales. Una vez resaltados los eventos más evidentes, se aplicó un filtro de "background substraction", consistente en promediar las trazas adyacentes de manera que se suprime o minimiza el efecto conocido como "banding" resaltando arribos secundarios. Finalmente, dado que se observó cierta continuidad lateral entre trazas a tiempos de arribo doble mayores a los 150 ns, se aplicó un filtro de ganancia exponencial que resalto los arribos más profundos.

La conversión de velocidad a tiempo, se realizó con una velocidad de 0.12 m/ns, considerada como factible para rocas calizas. No se emplearon las hipérbolas observadas dados los intensos patrones de interferencia observados en los datos apilados o radargramas.

XII.4. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Los resultados o radargramas obtenidos (Figuras XII.4.1 a la Figura XII.4.21) muestran las líneas de radar que están relacionadas con los perfiles de TER´s en los cuales se observaron anomalías (TER´s 06, 09, 23, 24, 25, 26, 27, 02, 48, y 01) (Tabla IV).

Tabla IV. Listado de Líneas de Georadar relacionados con líneas de TER´s.

TER	LINEAS DE GEORADAR
06	L66, L67, L68
09	L63, L64, L65
23	L42, L43, L44
24	L39, L40, L41, L42, L43, L44
25	L39, L40, L41
26	L36, L37, L38
27	L36, L37, L38
02	L06, L07, L08
01	L03, L04, L05

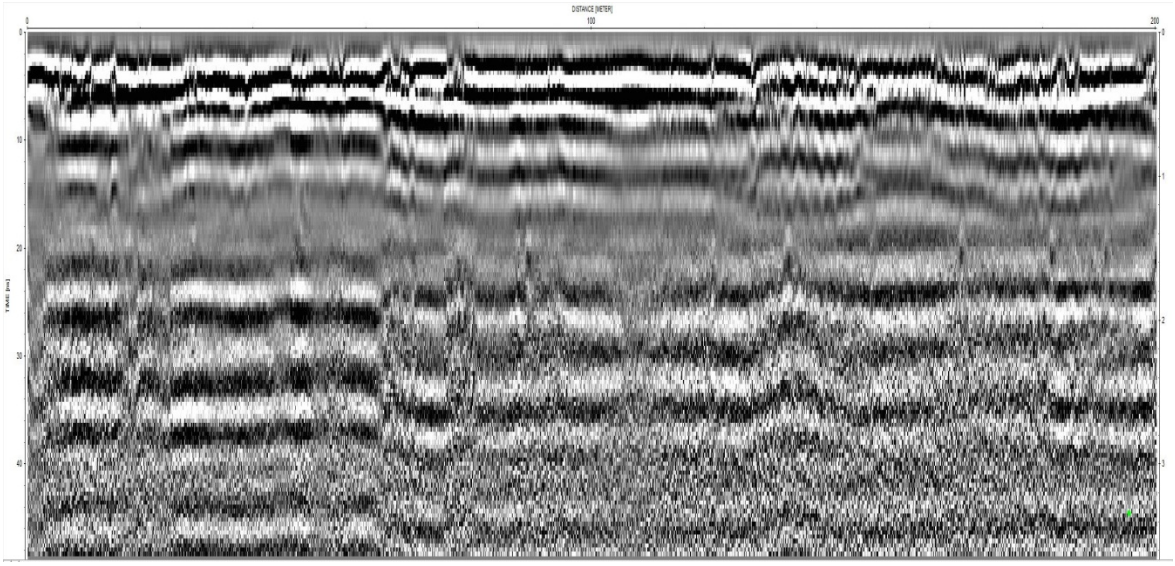


Figura XII.4.1 Radargrama correspondiente a la línea 66.

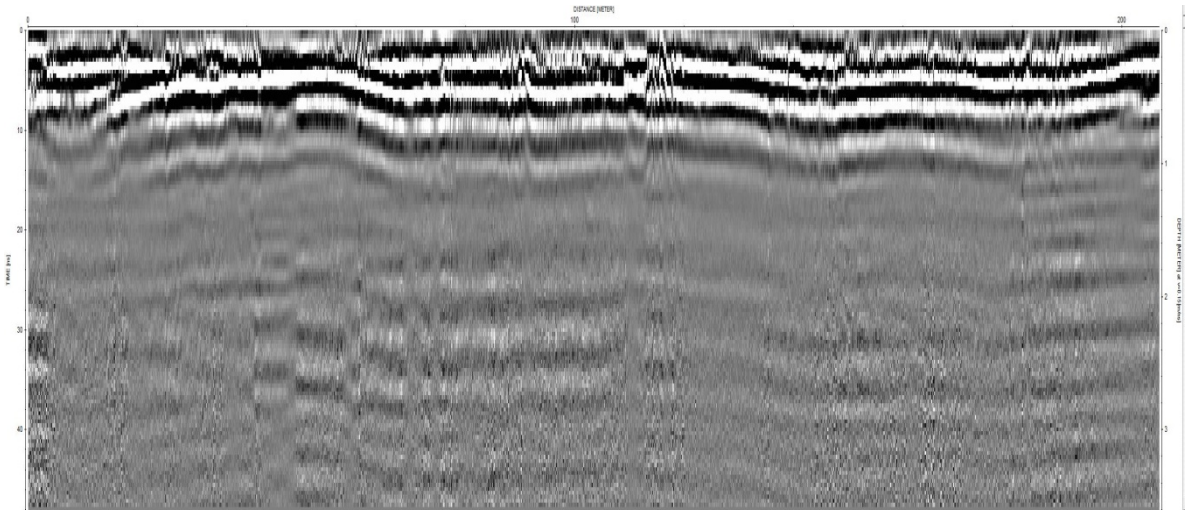


Figura XII.4.2 Radargrama correspondiente a la línea 67.

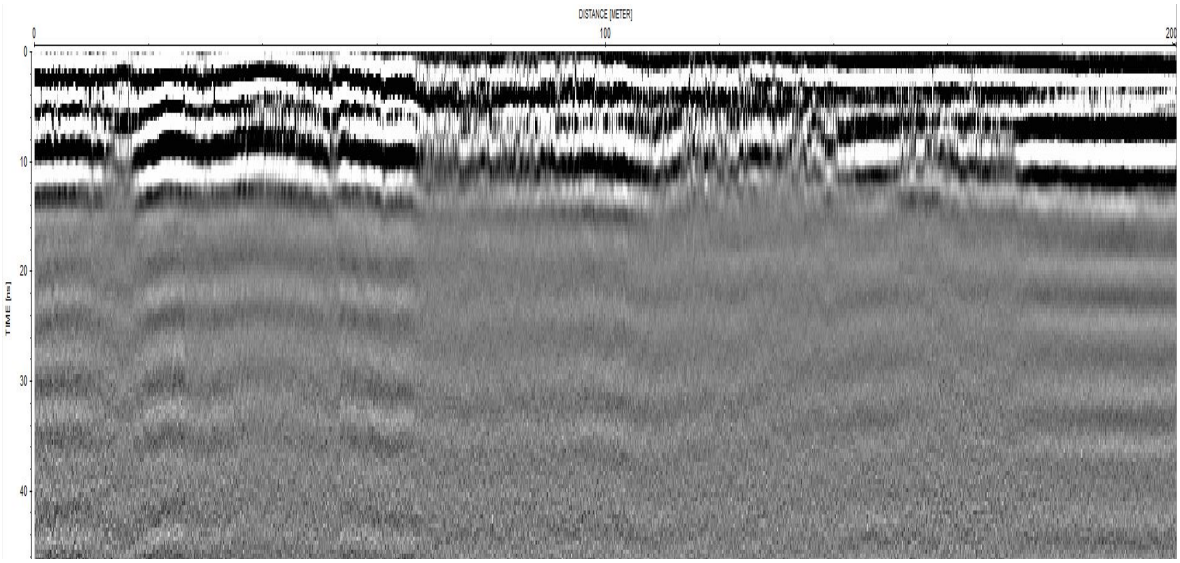


Figura XII.4.3. Radargrama correspondiente a la línea 68.

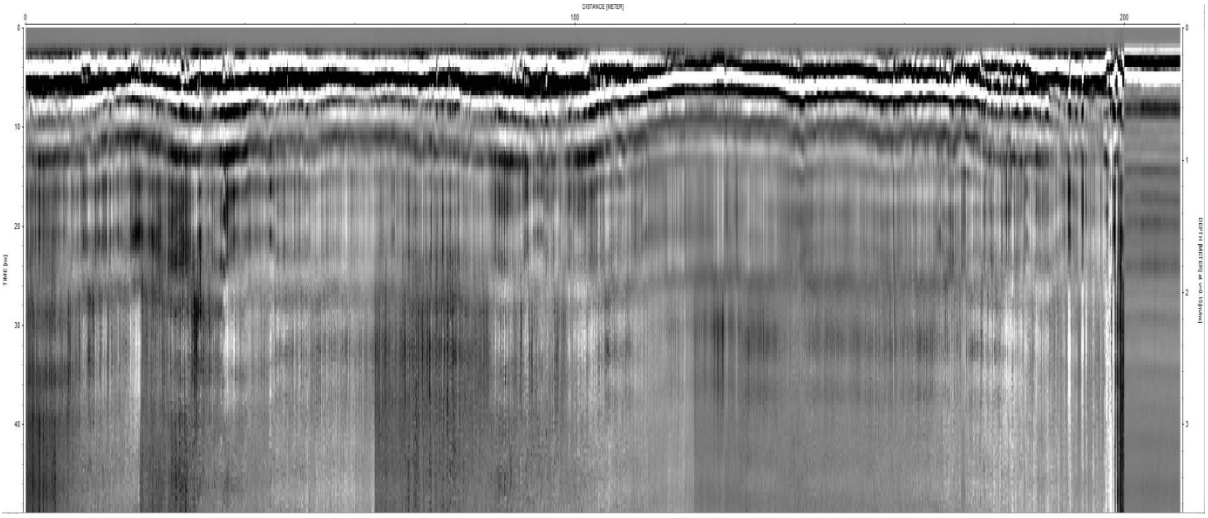


Figura XII.4.4. Radargrama correspondiente a la línea 63.

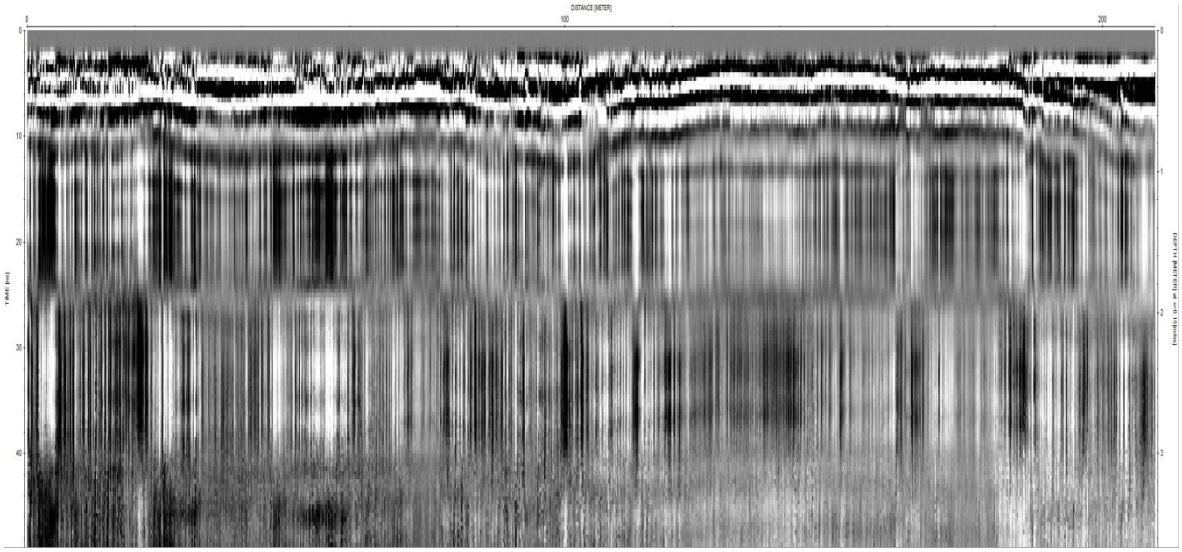


Figura XII.4.5. Radargrama correspondiente a la línea 64.

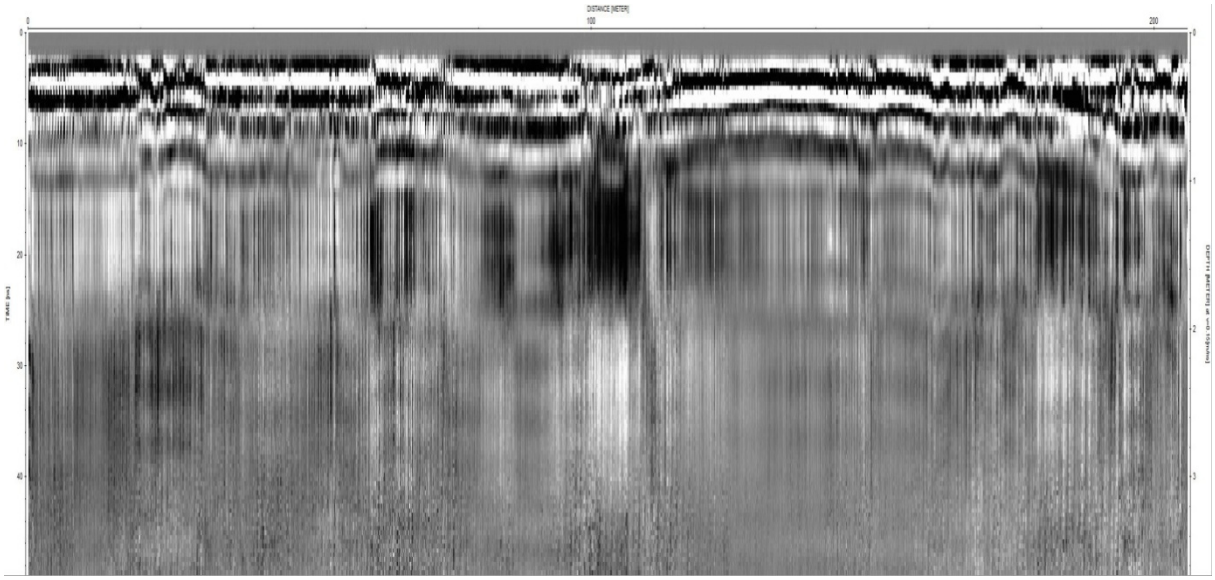


Figura XII.4.6. Radargrama correspondiente a la línea 65.

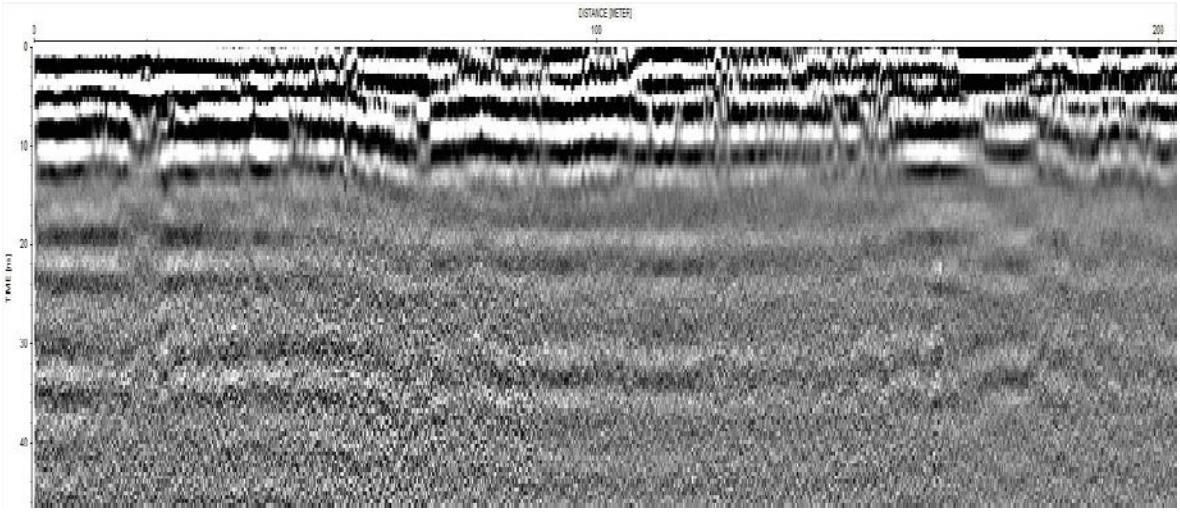


Figura XII.4.7. Radargrama correspondiente a la línea 36.

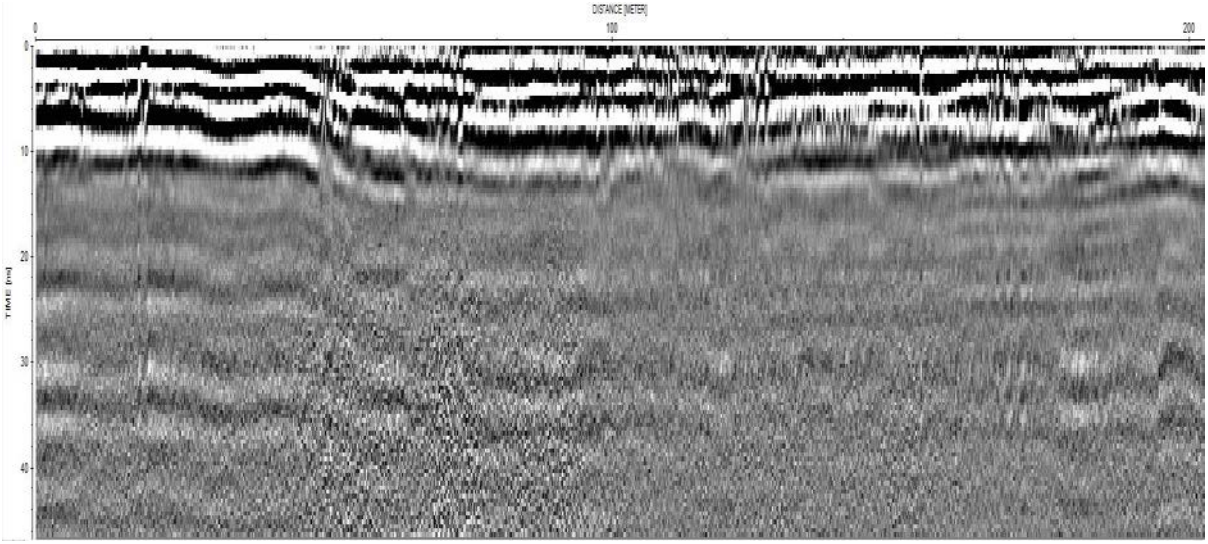


Figura XII.4.8. Radargrama correspondiente a la línea 37.

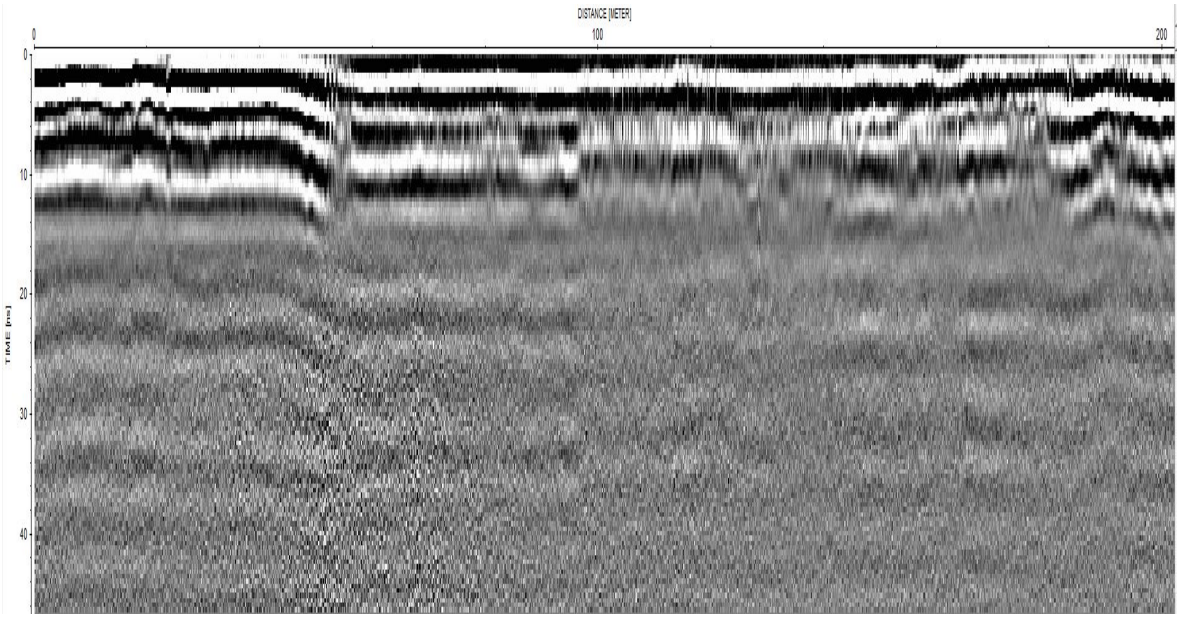


Figura XII.4.9. Radargrama correspondiente a la línea 38.

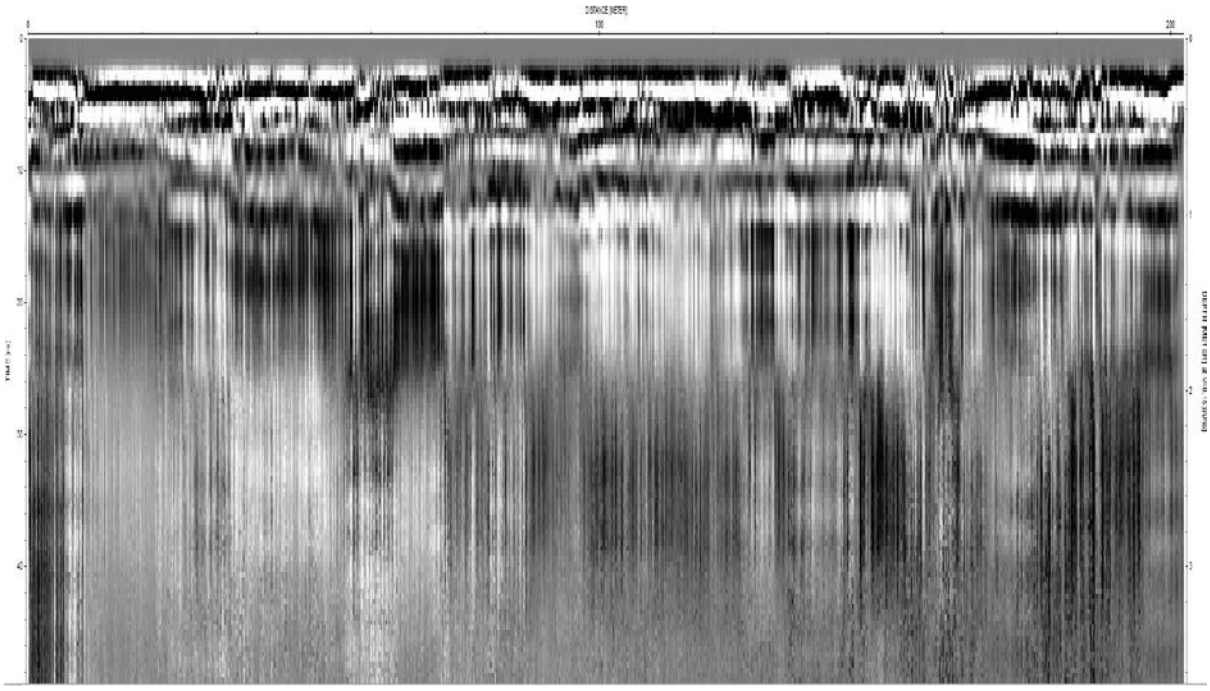


Figura XII.4.10. Radargrama correspondiente a la línea 39.

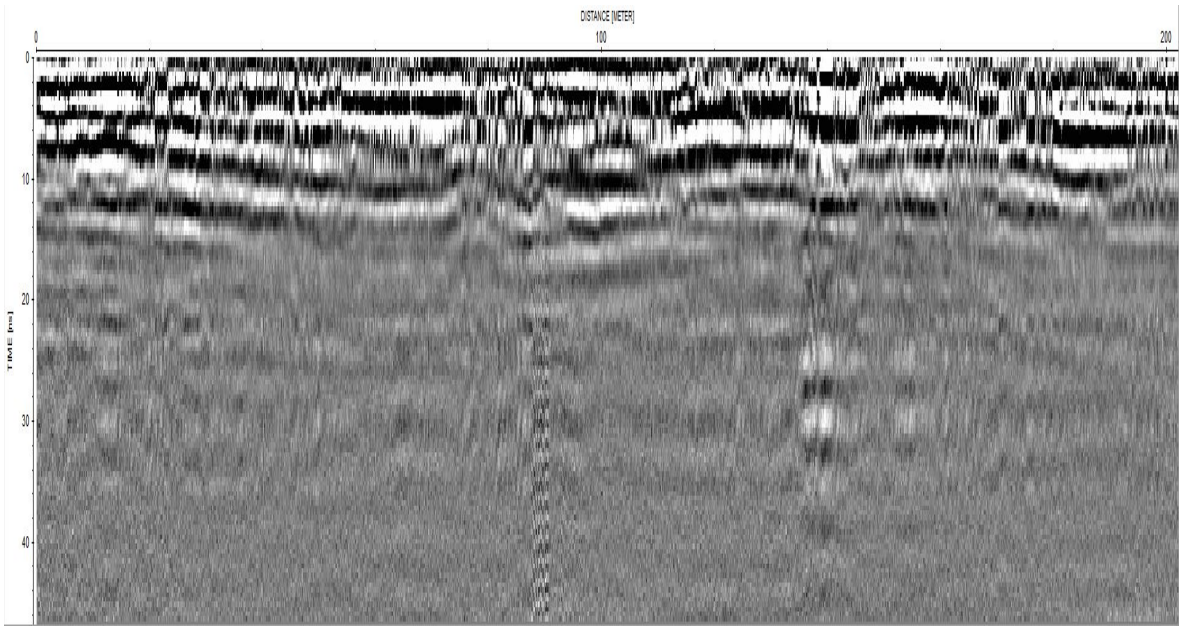


Figura XII.4.11. Radargrama correspondiente a la línea 40.

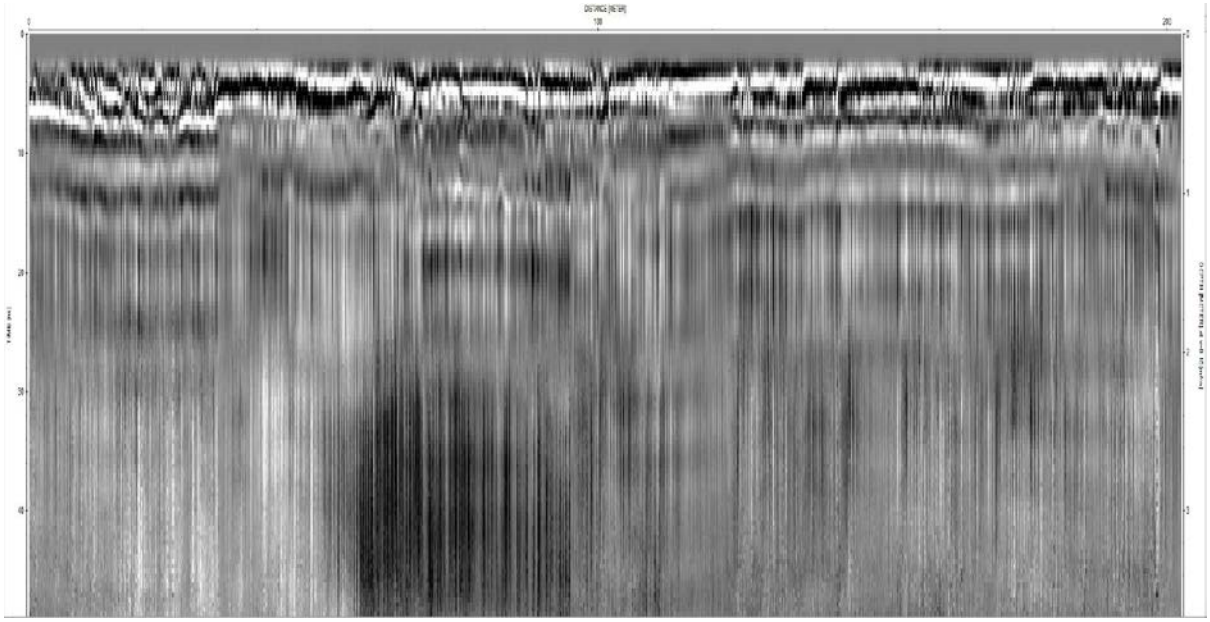


Figura XII.4.12. Radargrama correspondiente a la línea 41.

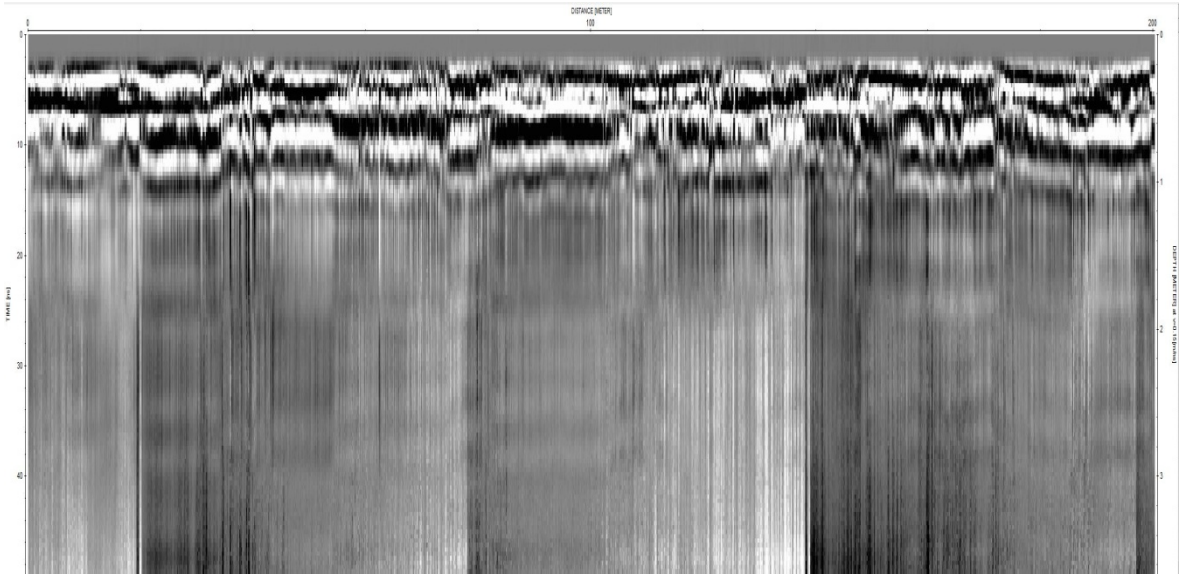


Figura XII.4.13. Radargrama correspondiente a la línea 42.

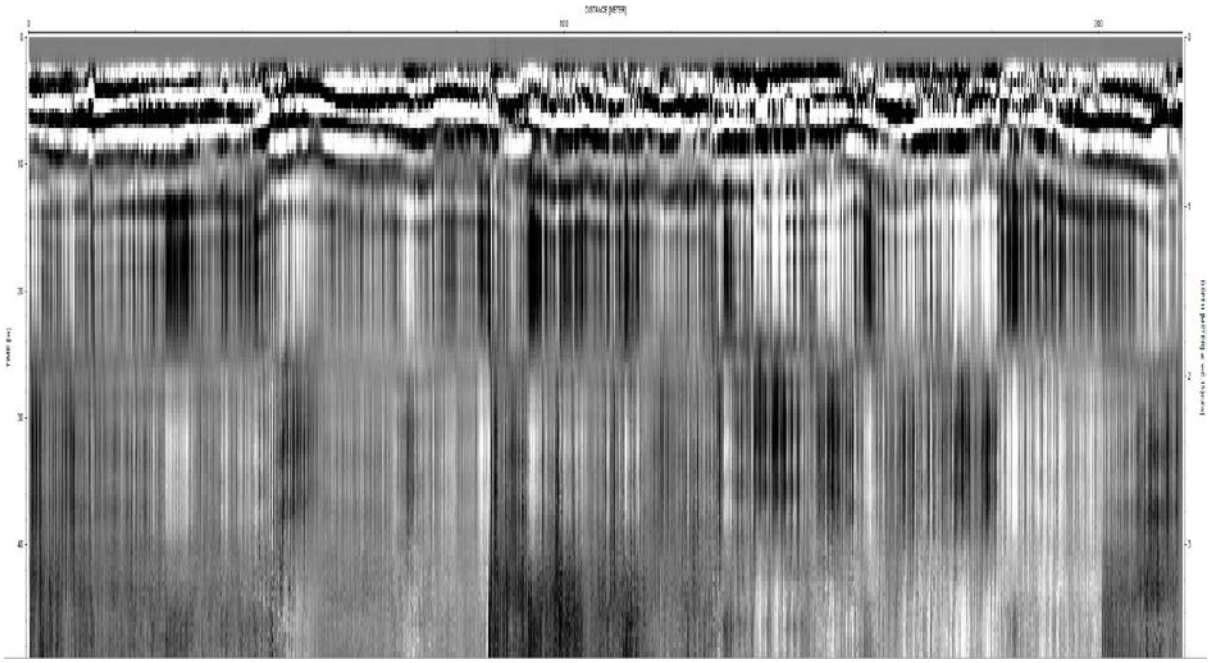


Figura XII.4.14. Radargrama correspondiente a la línea 43.

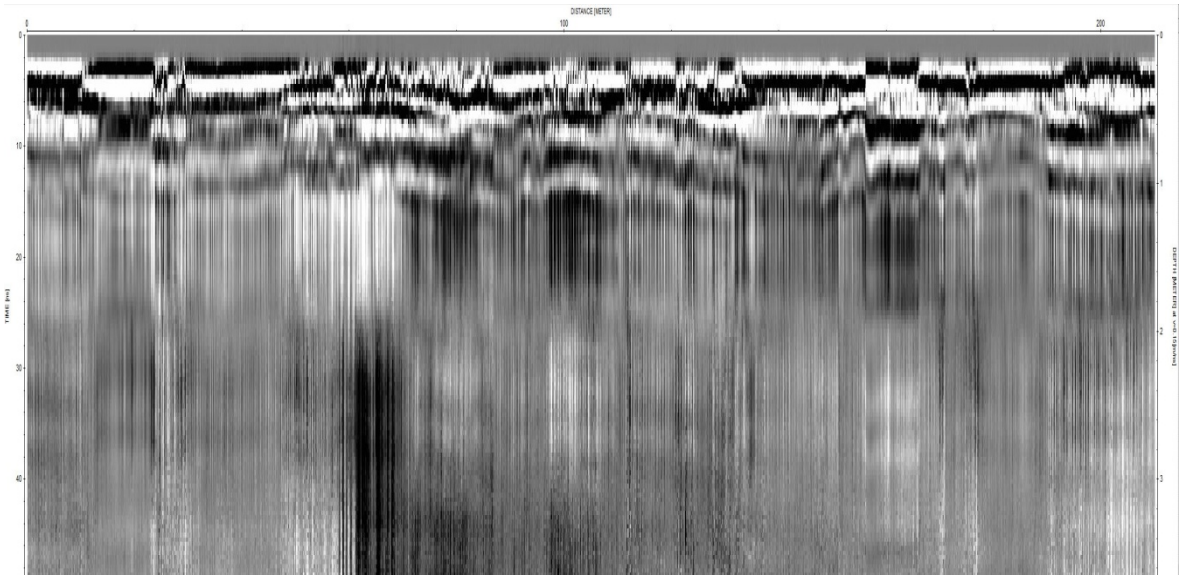


Figura XII.4.15. Radargrama correspondiente a la línea 44.

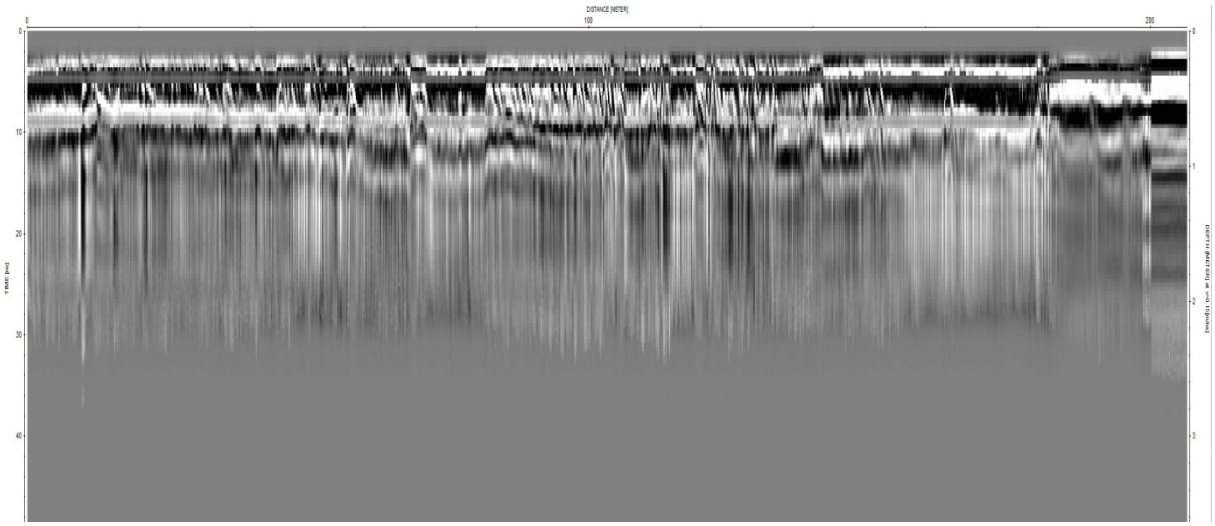


Figura XII.4.16. Radargrama correspondiente a la línea 06.

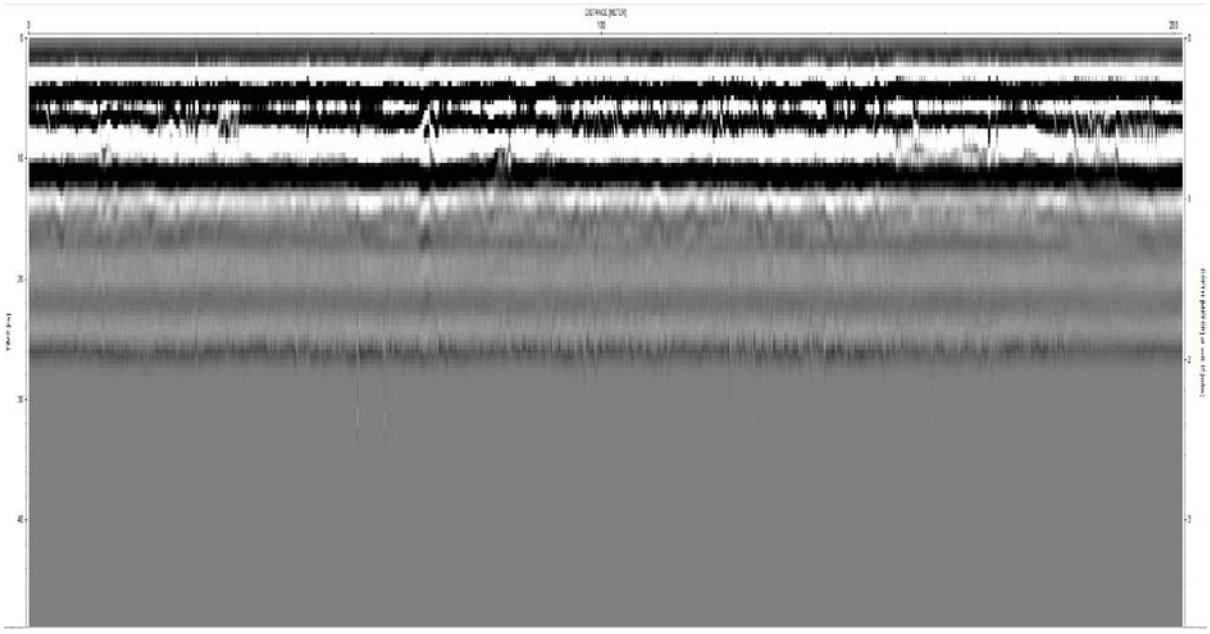


Figura XII.4.17. Radargrama correspondiente a la línea 07.

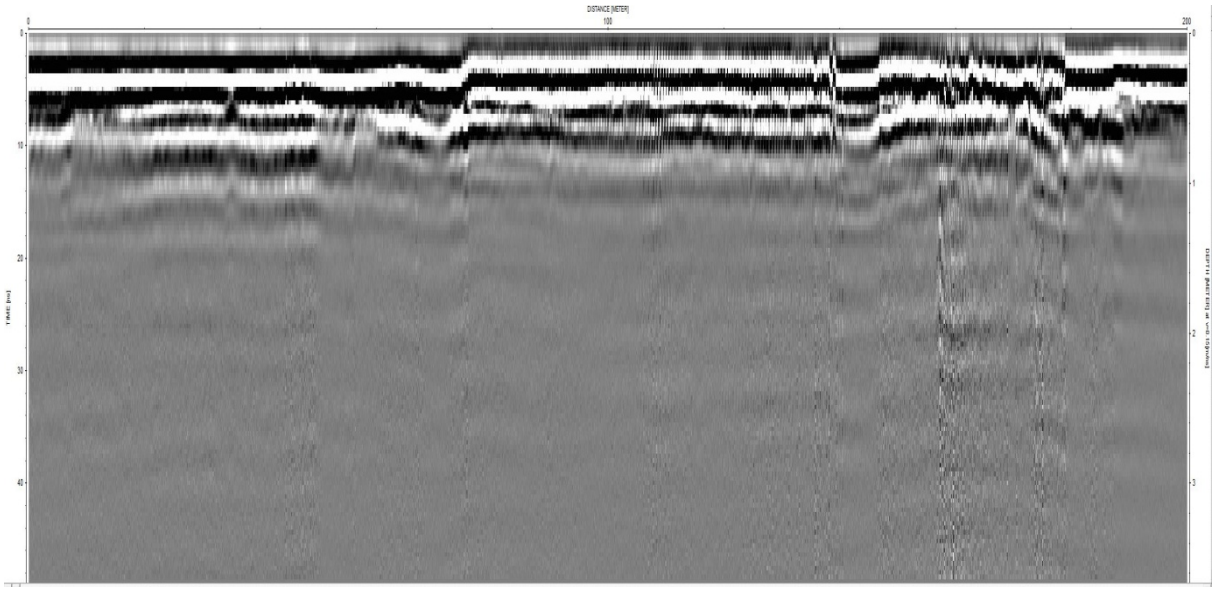


Figura XII.4.18. Radargrama correspondiente a la línea 08.

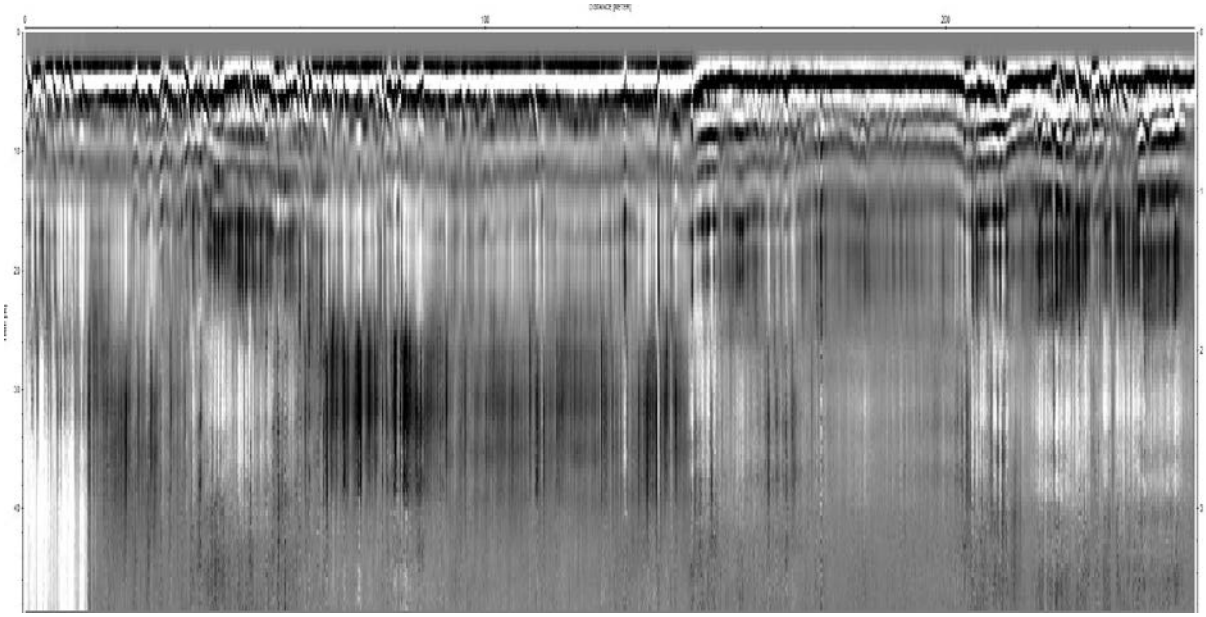


Figura XII.4.19. Radargrama correspondiente a la línea 03.

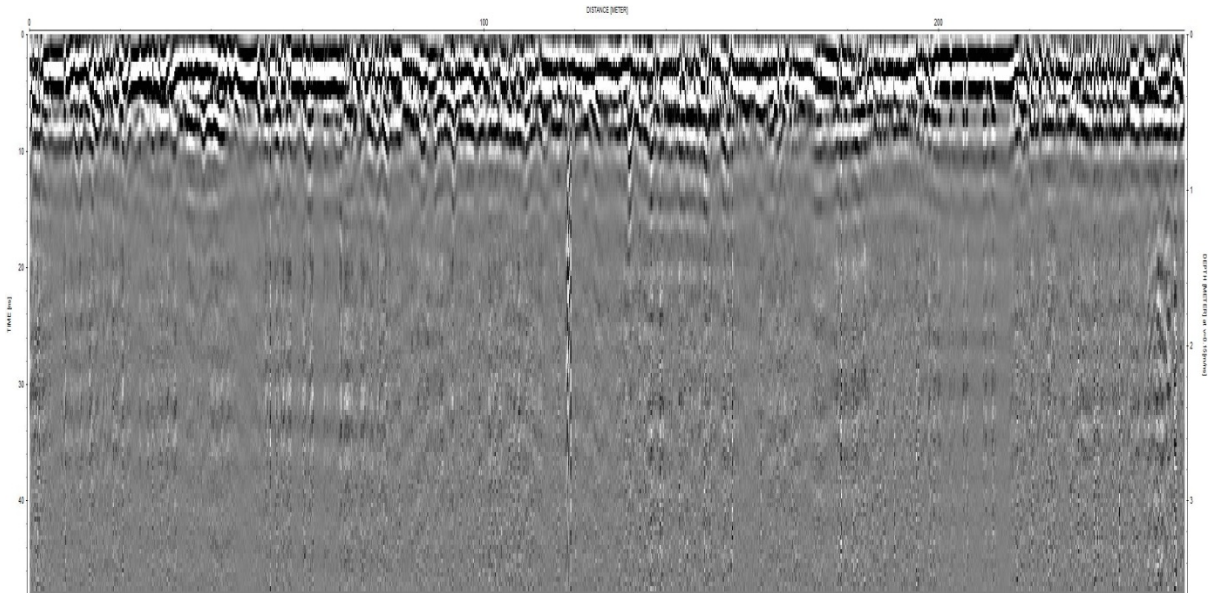


Figura XII.4.20. Radargrama correspondiente a la línea 04.

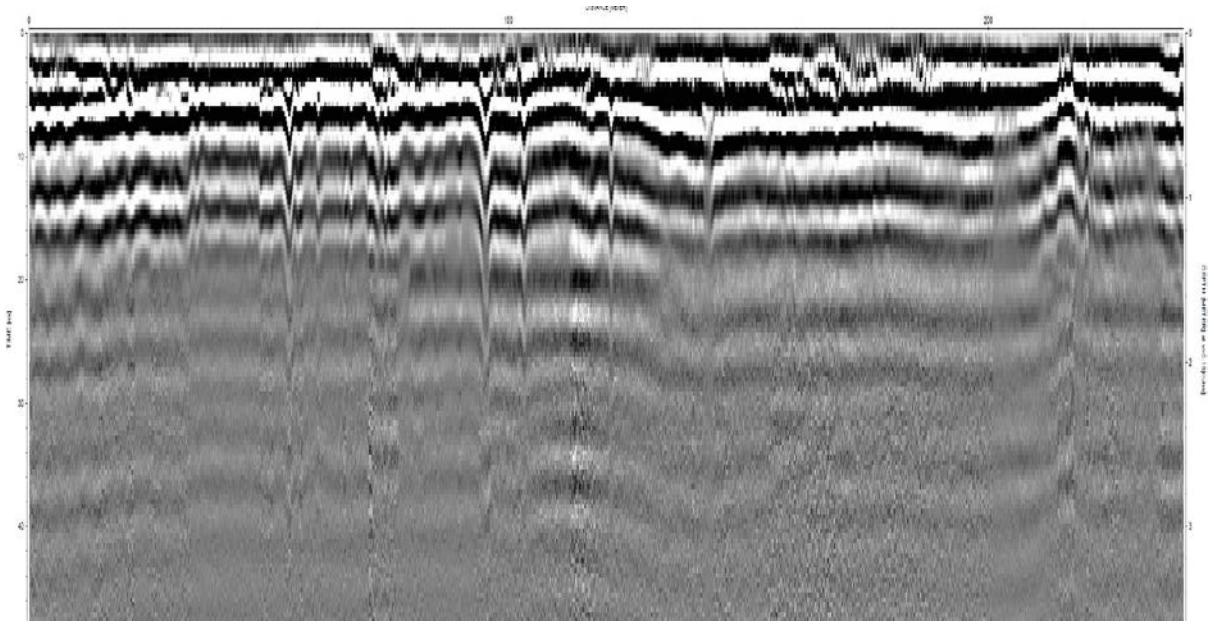


Figura XII.4.21. Radargrama correspondiente a la línea 05.

ESTUDIOS DE GEOTECNIA EN EL BORDO MIGUEL D ELA MADRID HURTADO

XIII. ESTUDIOS DE GEOTECNIA EN EL BORDO MIGUEL DE LA MADRID HURTADO

Reporte Técnico de las actividades realizadas en campo, en laboratorio, Resultados, Conclusiones y Recomendaciones.

A continuación, presentamos el Informe Técnico de nuestros trabajos de campo y resultados de gabinete, de los cuales, los primeros comprendieron la extracción de Muestras Alteradas de suelo mediante la ejecución de doce (12) Sondeo Exploratorio de Penetración Estándar (S.P.T.); mientras que los segundos, correspondieron a su consecutivo análisis en laboratorio.

Lo anterior, con el propósito de conocer las características conformantes del subsuelo en el Área de Estudio, las cuales, ayudarán a determinar las características estructurales del Bordo.

Para llegar a los resultados en adelante expuestos, nos hemos valido de información básica del proyecto, la consulta de normatividad especializada publicada internacionalmente, así como la aplicación de los conocimientos, tareas y criterios comunes en las actividades propias de la ingeniería para este tipo de estudios.

El sitio donde se realizó el **estudio de ingeniería** que se presenta en este documento, pertenece al Bordo Miguel de la Madrid Hurta, ubicado entre el Blvd. Libramiento y el Blvd. Independencia, dentro de una parte de la Col. Granjas Polo Gamboa, en Ciudad Juárez, Chihuahua (**Figura 01**).

Figura 01.- Ubicación del Área de Estudio.

III.1. EXPLORACIÓN DE CAMPO

Atendiendo la amable petición de nuestro cliente: **UACJ**, por vía de su representante para nuestro estudio, el **Dr. Oscar Dena**, realizamos nuestras labores de campo del día **8** al **13 de noviembre de 2017**, dentro del Área de Estudio (**Tabla 01** y **Figura 02**).

Tabla 01.- Ubicación georreferenciada de los Sondeos Exploratorios.

Sondeo	Coord.: *UTM - WGS 84* Zona: *13 N*.		Profundidad de exploración (m)
	X (m)	Y (m)	
S – 0	362,739.74	3'497,523.83	6.00
S – 1	362,948.22	3'497,315.72	5.10
S – 2	363,299.41	3'496,947.11	6.60
S – 3	363,455.30	3'496,807.72	6.45
S – 4	363,847.43	3'496,505.37	6.45
S – 5	364,210.34	3'496,143.58	5.10
S – 6	364,698.03	3'495,653.76	6.60
S – 7	364,975.77	3'495,377.66	6.00
S – 8	365,329.92	3'495,022.68	6.00
S – 9	365,757.37	3'494,595.22	6.00
S – 10	365,971.79	3'494,380.56	7.35
S – 11	366,195.26	3'494,155.25	6.00

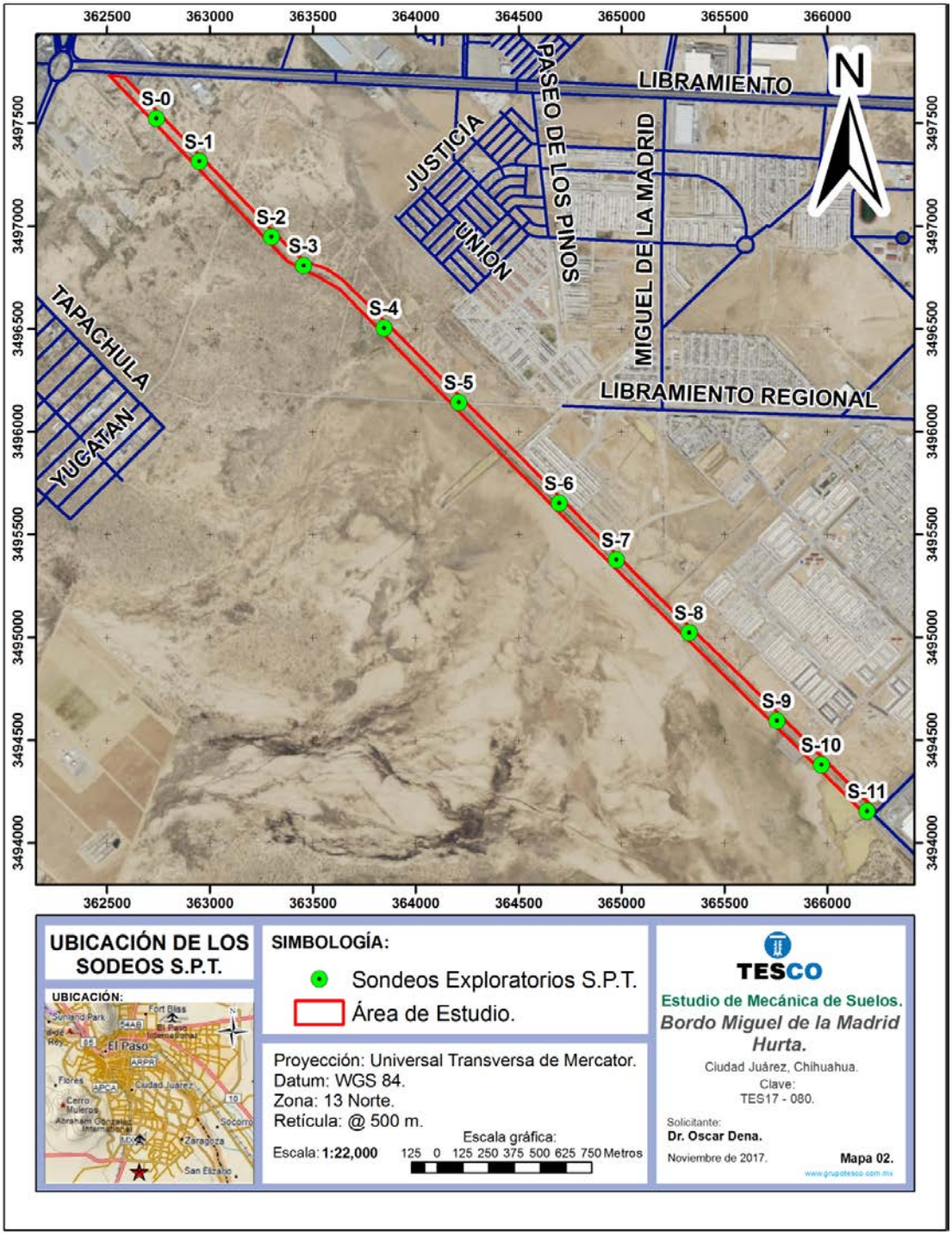


Figura 02.- Ubicación de los trabajos de campo.

Los ***Sondeos de Penetración Estándar*** (S.P.T.), consisten en introducir un barreno continuo (tramos de brocas rotatorias entrelazadas), hasta las profundidades de análisis requeridas.

Dichas profundidades de exploración, son preestablecidas en intervalos donde se requiere la extracción de muestras mediante un dispositivo llamado *muestreador de media caña* (o simplemente *cuchara*), el cual, consta de un cuerpo de acero que es hincado en el suelo con golpes de un martinete.

Mediante el conteo de golpes requeridos para llegar a ciertas profundidades de hincado (denotado técnicamente como ***valor N***), se infieren algunos parámetros de calidad del suelo (tanto en el sitio, en base a la experiencia del personal de perforación; como en el laboratorio, con ecuaciones de ingeniería geotécnica).

El primer sondeo ejecutado, fue el denominado como ***S - 1*** (**Figuras 03**, **04** y **05**), el cual, tuvo una profundidad de exploración total de **5.10 metros**, de donde se obtuvieron **seis** (**6**) **Muestras Alteradas**, mismas que fueron empaquetadas, transportadas y analizadas en nuestro laboratorio conforme a los alcances del presente estudio y su Normatividad Estandarizada Vigente.

El sondeo ***S – 2***, se hizo hasta la profundidad de **6.60 metros**, recuperando **ocho** (**8**) **Muestras Alteradas de Suelo** (**Figuras 06**, **07** y **08**).

Enseguida, se realizó el sondeo ***S – 3***, hasta una profundidad máxima de muestreo de **6.45 metros**, recuperando un total de **ocho** (**8**) **Muestras Alteradas de Suelo** (**Figuras 06**, **07** y **08**).

El sondeo ***S – 4***, se elaboró hasta la profundidad de **6.45 metros**, recuperando **ocho** (**8**) **Muestras Alteradas de Suelo** (**Figuras 06**, **07** y **08**).

Las labores de campo continuaron con la perforación del sondeo ***S – 5***, logrando una profundidad de exploración de **5.10 metros** de donde se sacó una totalidad de **siete** (**7**) **Muestras Alteradas** (**Figuras 09**, **10**, **11** y **12**).

Mientras que el sondeo ***S – 6***, se compuso por **nueve** (**9**) **Muestras Alteradas**, logrando alcanzar una profundidad de **6.60 metros** (**Figuras 06**, **07** y **08**).

El sondeo ***S – 7***, se efectuó hasta la profundidad de **5.85 metros**, recuperando **ocho** (**8**) **Muestras Alteradas de Suelo** (**Figuras 06**, **07** y **08**).

Prosiguiendo con el proyecto, se procedió a efectuar el sondeo designado como ***S – 8***, obteniendo un total de **ocho** (**8**) **Muestras**, con las cuales se logró reconocer hasta una profundidad de **6.0 metros** (**Figuras 06**, **07** y **08**).

En el sondeo ***S – 9***, se recuperaron **ocho** (**8**) **Muestras Alteradas**, consiguiendo reconocer a **6.0 metros** de profundidad (**Figuras 06**, **07** y **08**).

Por otro lado, en el sondeo ***S – 10*** se recuperaron **diez** (**10**) **Muestras**, llegando a reconocer el subsuelo hasta los **7.35 metros** de profundidad.

En tanto que el penúltimo sondeo, identificado como ***S – 0***, tuvo una profundidad de exploración máxima de **6.0metros**, en el cual, se efectuó una extracción de **ocho** (**8**) **Muestras Alteradas** (**Figuras 13**, **14** y **15**).

La perforación de sondeos S.P.T., culminó con el ***S – 11***, el cual tuvo una profundidad de exploración de **6.0 metros**, de donde se obtuvieron **ocho** (**8**) **Muestras Alteradas** en total (**Figuras 16**, **17**, **18** y **19**).

XIII.1.1. ENSAYOS EN LABORATORIO DE GEOTECNIA.

En nuestro **laboratorio**, se determinó el Contenido de Humedad, Análisis Granulométrico, Límites de Atterberg y los Pesos Volumétricos del lugar de las muestras extraídas durante las labores de campo.

Realizamos estos ensayes, con el objetivo de establecer las propiedades físicas y mecánicas de suelos representativos en el sitio. También, nos permitieron clasificar correctamente los suelos residentes de acuerdo al ***Sistema Unificado de Clasificación de Suelos*** (***S.U.C.S.***).

XIII.2. CONDICIONES GENERALES DEL SITIO DE LOS TRABAJOS.

XIII.2.1.- TOPOGRAFÍA.

El sitio de los trabajos se localiza en una parte plana de Ciudad Juárez, y aun que el Bordo Miguel de la Madrid Hurta se encuentra a aprox. 2.0 metros sobre el nivel del terreno natural, las colindancias se puede considerar como terrenos *relativamente planos*.

XIII.2.2.- VEGETACIÓN.

Debido a que sobre el Bordo transitan vehículos de todo tipo, el terreno se encuentra marcado por la nula presencia de vegetación. Pero bajo el bordo, que es en donde se acumula el agua pluvial, se observan algunos arbustos de no más de *2.20 m* de alto, tales como plantas *estepicursoras* (rodadoras), *zacate*, entre otras.

XIII.2.3.- ESTRATIGRAFÍA.

Los estratos del subsuelo observados en cada sondeo S.P.T. (sección IV.1 y **ANEXOS** del presente reporte), por sus características físico-mecánicas, pueden generalizarse para el Área de Estudio como a continuación se describe:

- Se observó un estrato compuesto por *arenas* con combinaciones de partículas *finas* tanto *plásticas* como *no pláticas* (según el caso), seca, café clara o blancuzca y de consistencia medio densa ó muy rígida dependiendo el sondeo; dicho estrato tiene una profundidad de aprox. **25 cm**.
- Seguido y hasta aprox. los **3.40** y **4.50 m** de profundidad, se encuentra un estrato, definido por suelos *arcillosos* color café, tanto secos como húmedos, de consistencia entre muy rígida y dura; en él se encuentra un pequeño lente de *grava* de **5 cm** de ancho (solo en algunos casos).
- En algunos casos, se encontró un estrato de *arenas limosas*, el cual se encuentra confinado entre dos estratos de *arcilla*.
- Por último, otro estrato de *arcilla*, combinado con *arenas finas*, el cual no en todos los sondeos se reconoce debido a su profundidad; localizado a partir de entre **4.75** y **7.0 m** (según el caso), color café, poco húmeda y húmeda y una consistencia por lo general *muy rígida*.

XIII.2.4.- AGUAS SUBTERRÁNEAS.

Al momento de nuestro estudio y hasta la profundidad máxima de exploración, **NO** se encontró el **nivel freático** o evidencias de algún otro escurrimiento subterráneo.

XIII.2.5.- CLIMA.

De acuerdo a la clasificación de climas realizada por Köeppen y modificada por Enriqueta García (1964), para las condiciones de la República Mexicana, el clima de la región es muy seco o desértico y se clasifica por su humedad y temperatura como BWkx'(e'), templado con verano cálido.

La temperatura media anual oscila entre 12 y 18 °C; la del mes más frío entre los -3 y los 18 °C; mientras que las del mes más caluroso sobrepasan los 18 °C, con un régimen de lluvias intermedio y muy extremoso (H. Ayuntamiento de Juárez 2004; 31).

XIII.3. RESULTADOS DE GABINETE Y LABORATORIO.

A continuación, presentamos de una manera resumida los resultados encontrados para la etapa de la exploración en campo.

XIII.3.1.- SONDEO EXPLORATORIO.

Tabla 02.- Estratigrafía encontrada en el S - 0.

Estrato (#)	Profundidad (m).-		Descripción	N	PVL Kg/m3	Ø	C
	De:	A:					
A	0.00	0.35	Arena limosa (SM), café clara, grano fino, medio densa, seca, con grumos de CaCO3.	17	1,790	28	0.0003
B	0.35	2.10	Arcilla ligera (CL), café, seca, plástica, muy rígida, de seca a	26	1,670	0	1.95

			poco húmeda.				
C	2.10	3.40	Arcilla limosa (CL-ML), café clara, media ó baja plasticidad, seca, rígida.	12	1560	0	0.54
D	3.40	4.40	Arcilla arenosa (CL) con limo, baja plasticidad, seca, café, rígida (de igual que lo anterior).	12	1590	11	0.39
E	4.40	6.00	Arcilla café (CH), seca, muy plástica, muy rígida.	40	1700	0	2.19

Tabla 03.- Estratigrafía encontrada en el S - 1.

Estrato (#)	Profundidad (m).-		Descripción	N	PVL Kg/m3	Ø	C
	De:	A:					
A	0.00	2.85	Arcilla café (CH) claro con arena húmeda dura.	10	1530	0	0.53
B	2.85	3.75	Limo húmedo color café claro.	30	1490	0	0.24
C	3.75	4.30	Arena limosa (SM) café claro medio húmeda.	47	1810	33	0.0003
D	4.30	6.00	Limos café claro con poca humedad.	17	1590	0	0.22

Tabla 04.- Estratigrafía encontrada en el S - 2.

Estrato (#)	Profundidad (m).-		Descripción	N	PVL Kg/m3	Ø	C
	De:	A:					
A	0.00	2.85	Arenas limosas (SM) humedad color café claro con poca humedad.	11	1650	28	0.0003
B	2.85	3.95	Arcillas húmedas (CL) café oscuro.	20	1430	0	0.58
C	3.95	4.80	Arenas limosas (SM) poca humedad color café oscuro.	16	1690	0	0.0003
D	4.80	5.85	Arcillas limosas (CL-ML) poca humedad color café claro.	50 +	1650	0	0.53
E	5.85	6.00	Arenas con limos (SP-SM) color café claro poca humedad.	41	1790	0	32

Tabla 05.- Estratigrafía encontrada en el S - 3.

Estrato (#)	Profundidad (m).-		Descripción	N	PVL Kg/m3	Ø	C
	De:	A:					
A	0.00	0.21	Arena arcillosa (SC) blanca densa con CaCO3.	5	1670	28	0
B	0.21	1.60	Arena limosa (SM) café clara húmeda densa, estratificada con arena arcillosa muy densa.	5	1780	28	0.0003
C	1.60	3.00	Arena limosa (SM) café rojizo, húmeda suelto.	50 +	1800	32	0.0003
D	3.00	6.45	Arena arcillosa (SC) café claro húmedo con limosa a los 3 m.	43	1680	32	0

Tabla 06.- Estratigrafía encontrada en el S - 4.

Estrato (#)	Profundidad (m).-		Descripción	N	PVL Kg/m3	Ø	C
	De:	A:					
A	0.00	0.75	Arcillas limosas (CL-ML) café claro.	21	1690	0	1.90
B	0.75	6.45	Arcillas limosas (CL-ML) café oscuro.	9	1700	0	0.48

Tabla 07.- Estratigrafía encontrada en el S - 5.

Estrato (#)	Profundidad (m).-		Descripción	N	PVL Kg/m3	Ø	C
	De:	A:					
A	0.00	2.05	Arenas limosas (SM) con rastros de gravilla color café claro	34	1790	32	0.0003
B	2.05	4.25	Arcilla café (CL), muy plástico, poco húmedo, rígido.	30	1440	0	1.95
C	4.25	4.90	Arena limosa (SM), café claro, seca, muy densa, grano fino.	44	1780	32	0.0003

Tabla 08.- Estratigrafía encontrada en el S - 6.

Estrato (#)	Profundidad (m).-		Descripción	N	PVL Kg/m3	Ø	C
	De:	A:					
A	0.00	0.20	Arcilla arenosa (CL), café clara, baja plasticidad, media, seca con al parecer rastros de CaCO3.	39	1670	0	1.95
B	0.20	3.40	Arcilla café (CL), plástica, poco húmeda, muy rígida, con pequeños grumos de CaCO3, (muchos pero pequeños),	16	1650	0	1.22
C	3.40	4.00	Arena limosa (SM), café clara, poco húmeda, grano fino, medio densa, con leve grumos de CaCO3.	15	1790	29	0.0003
D	4.00	4.75	Arena limosa (SM), café clara, húmeda, grano fino, medio densa, interestratificado con arcilla café, plástica (lentes de 2", 3 encontrados).	13	1750	28	0.0003
E	4.75	5.20	Arcilla con arena (CL), café, húmeda, media plasticidad y rígida.	12	1590	0	0.58
F	5.20	6.60	Arcilla arenosa, café (CL), plástica, húmeda, rígida, interestratificada con arena limosa, café clara, húmeda y medio densa.	13	1600	0	0.53

Tabla 09.- Estratigrafía encontrada en el S - 7.

Estrato (#)	Profundidad (m).-		Descripción	N	PVL Kg/m3	Ø	C
	De:	A:					
A	0.00	0.20	Arcilla arenosa (CL), media plasticidad, café claro, seco, con posible material calcáreo y muy rígido.	27	1550	0	0.97
B	0.20	1.65	Arcilla arenosa (CL), baja plasticidad, café, poco húmedo, muy rígido.	27	1550	0	0.97
C	1.65	1.85	Arena limosa (SM), café claro, poco húmeda, medio densa, grano fino.	31	1760	32	0.0003
D	1.85	3.60	Arcilla café (CL), plástica, poco húmedo, con grumos de CaCO3 de arcilla pero muy claro y seca.	19	1540	0	1.02
E	3.60	5.85	Arcilla arenosa (CL), café, poco húmeda, media plasticidad, muy rígida con rastros de CaCO3.	30	1560	0	1.95

Tabla 10.- Estratigrafía encontrada en el S - 8.

Estrato (#)	Profundidad (m).-		Descripción	N	PVL Kg/m3	Ø	C
	De:	A:					
A	0.00	0.70	Arena arcillosa (SC), baja plasticidad, seca, café clara, con manchas blancas, con leves grumos de caliche, grano fino.	26	1600	28	0
B	0.70	1.40	Arcilla con arena (CL), café media plástica, seca, con muy leves grumos de caliche.	24	1510	0	1.07
C	1.40	4.40	Arcilla café (CH), plástica, pero húmeda con mancha blanca, rígida.	12	1540	0	0.48
D	4.40	5.85	Arcilla con arena (CL), café con muy leves y pequeños manchas blancas, media plasticidad, seca.	30	1550	0	1.95
E	5.85	6.00	Arena arcillosa (SC), café clara, baja plasticidad, grano fino, seca densa.	33	1580	32	0

Tabla 11. Estratigrafía encontrada en el S - 9.

Estrato (#)	Profundidad (m).-		Descripción	N	PVL Kg/m3	Ø	C
	De:	A:					
A	0.00	0.88	Arcilla arenosa (SC), café, seca, media plasticidad, con leve CaCO3 y leves grumos de ¼".	21	1680	0	1.02
B	0.88	1.40	Arena limo-arcillosa (SM), café clara, seca.	26	1790	28	0.0003
C	1.40	2.90	Arcilla con arena (CL), café, húmeda, con manchas blancas, medio plástica,	9	1590	0	0.48
D	2.90	3.60	Arcilla café (CL), plástica con manchas blancas, poca húmeda.	41	1610	0	1.95
E	3.60	5.30	Arcilla con arena (CL), café, seca, con manchas blancas (leves), plástica.	47	1720	0	1.95
F	5.30	6.00	Arena arcillosa (SC), café clara, poco plástica, grano fino, seca, densa.	34	1600	32	0

Tabla 12. Estratigrafía encontrada en el S - 10.

Estrato (#)	Profundidad (m).-		Descripción	N	PVL Kg/m3	Ø	C
	De:	A:					
A	0.00	0.70	Arcilla con arena (CL), café clara, poco/medio plástica seca, con CaCO3.	27	1540	0	1.22
B	0.70	0.72	Lente de grava (GP) a los 0.75 m de profundidad de 1" de ancho.	46	1800	32	0
C	0.72	2.20	Arcilla con arena (CL), café con muy leves grumos de CaCO3, medio plástica.	12	1500	0	0.53
D	2.20	4.70	Arcilla café (CH), húmeda, con leves manchas blancas (muy leves), plástica y rígida.	11	1530	0	0.53
E	4.70	5.00	Arena arcillosa (SC), café clara, poco húmeda, media plasticidad, grano fino.	18	1450	28	0
F	5.00	7.15	Arena limosa (SM), café clara, poco húmeda, medio densa, grano fino.	24	1700	28	0.0003
G	7.15	7.35	Arcilla arenosa (CL), café, media plasticidad, poco húmeda y muy rigida.	33	1670	0	1.95

Tabla 13. Estratigrafía encontrada en el S - 11.

Estrato (#)	Profundidad (m).-		Descripción	N	PVL Kg/m3	Ø	C
	De:	A:					
A	0.00	0.20	Arcilla arenosa (CL), café clara, seca, medio/poco plástica, con grumos de CaCO3.	26	1550	0	1.12
B	0.20	2.85	Arcilla café (CL), poco húmeda, plástica, muy rígida, con leves manchas (grumos) blancas.	20	1520	0	0.97
C	2.85	4.40	Arcilla limosa (CL) con arena, café, húmeda, con lentes de grava de hasta ½" de 2" a los 2.65 – 2.70 m, plástica intermezclado con carbonatos de calcio, firme.	7	1480	0	0.39
D	4.40	6.00	Arena limosa (SM), suelta, húmeda, grano fino, café.	8	1690	28	0.0003

El análisis y valoración de las principales características de los materiales extraídos en cada sondeo exploratorio, se realizó en dos etapas: la primera en campo, contando el ***Número de Golpes*** (***N***) necesarios para penetrar los tramos de suelo muestreados; y la segunda en laboratorio, sometiendo a dichas muestras a diversas pruebas estandarizadas de mecánica de suelos.

Como se describió anteriormente, el conteo del ***Número de Golpes*** (***N***), es uno de los primeros instrumentos con el que se pueden determinar ciertas características cualitativas de los materiales que componen el subsuelo.

En la práctica común y en el presente estudio, para tomar cada una de las muestras en el sondeo, se hincó la *cuchara* de acero en el subsuelo mediante un sistema de martillo en caída libre, contándose el número de golpes necesarios para alcanzar 12 pulgadas.

XIV.3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En general se observan estratos competentes, densos y de medianamente a bien conformados con ángulos de fricción interna y cohesiones altas. Sin embargo, en algunos sondeos se observan estratos de arena limosa de mas de 1 m de espesor que pudieran comprometer la operación del bordo una vez sometido a carga hidráulica.

Se recomienda realizar pruebas triaxales en la parte Noroeste del bordo y en la zona donde los desarrollos habitacionales están localizados a menos de 40 m de distancia del bordo. Con los resultados de estas pruebas se validaran los ángulos de fricción y cohesion con una mayor certidumbre.

De igual manera se recomienda también realzar al menos una prueba de permeabilidad tipo Lefranc para dispones de un valor de permeabilidad directo de campo.

ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE TALUD EN EL BORDO MIGUEL DE LA MADRID HURTADO

XIV. ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE TALUD DEL BORDO MIGUEL DE LA MADRID HURTADO

XIV.1. INTRODUCCIÓN

En base a los estudios de geotecnia en el Bordo Miguel de la Madrid Hurtado, se busca determinar las características físicas y mecánicas bajo las cuales operará el bordo, principalmente bajo condiciones extremas (obra con embalse y esfuerzos acontecidos en este lapso), tiempo durante el cual podrían presentarse fenómenos estructurales diferentes a los esperados en condiciones de operación sin embalse (condiciones secas), además de los posibles asentamientos diferenciales en la zona de cimentación.

Los criterios tomados en cuenta, tanto para la localización como características de las pruebas propuestas, se basan en las recomendaciones de consideración geotécnica documentados en la literatura existente (Department of Civil Engineering, University of Kentucky; Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y GEO-SLOPE International Ltd.), en la ubicación geográfica de los anomalías y resultados más significativos, así como la cercanía a posibles bancos de préstamo; buscando con ello, atender el aspecto económico sin detrimento de la calidad en la información y características idóneas de los materiales a obtener.

XIV.2. METODOLOGÍA

Conductividad Hidráulica: Se realiza esta prueba con el objetivo de conocer la velocidad de transporte del frente húmedo a través del suelo una vez presentando embalse la obra de proyecto; los datos aportados por esta prueba ayudarán a determinar si es necesario el diseño y construcción de una barrera impermeable en la base de la obra (Figura XIV.2.1 y Figura XIV.2.2).

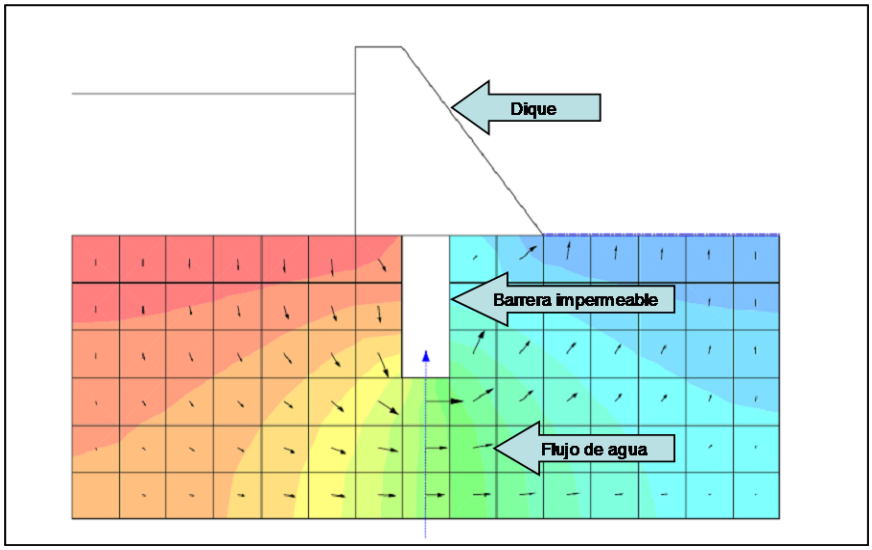


Figura XIV.2.1. Modelo teórico del flujo del agua a través de la cimentación de un dique (GEO-SLOPE International Ltd., 2007).

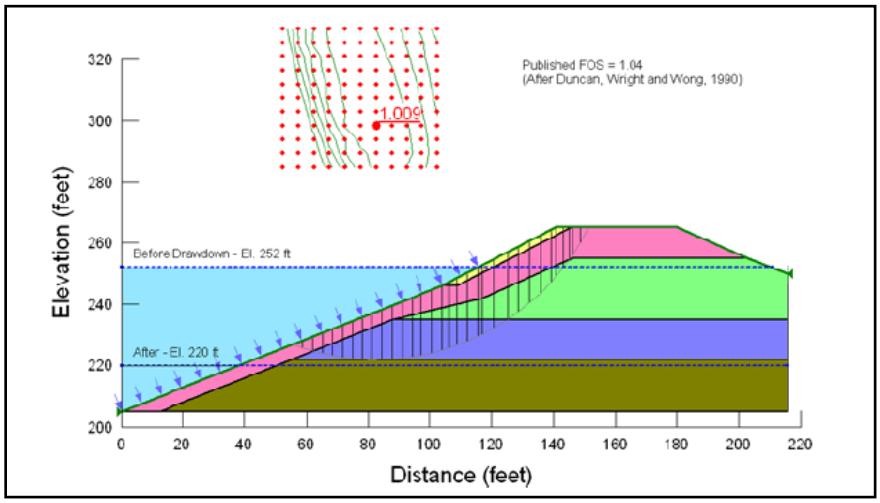


Figura XIV.2.2 Modelo teórico de las condiciones de seguridad de un dique con embalse (GEO-SLOPE International Ltd., 2007).

Triaxial Consolidada: Se recomienda esta prueba debido a que al formar parte del corazón impermeable, este material al tener contacto con la humedad cambiará sus propiedades mecánicas en comparación con su estado seco, además que esta prueba ayudará a determinar el tiempo de migración del frente húmedo a través del material cuando embalse el proyecto y diseñar adecuadamente sus dimensiones (Figura XIV.2.3).

Triaxial No Consolidada: Se recomienda debido a que al igual que la prueba anterior, ayudará a definir los parámetros de factor de seguridad del proyecto en condiciones secas y precisar de mejor manera la geometría del proyecto (Figura XIV.2.4).

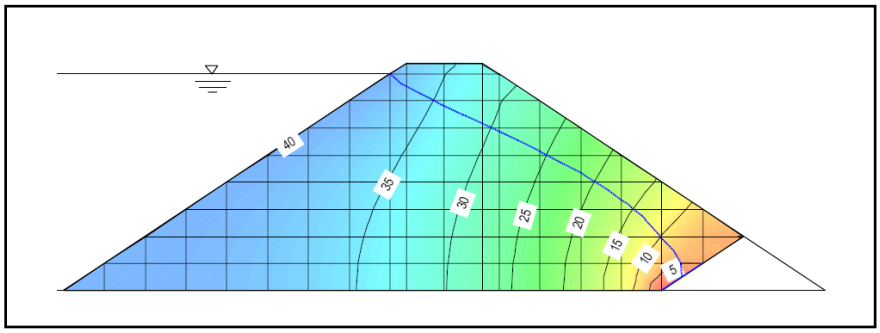


Figura XIV. 2.3. Modelo teórico de migración del frente húmedo a través del cuerpo de un dique (GEO-SLOPE International Ltd., 2007).

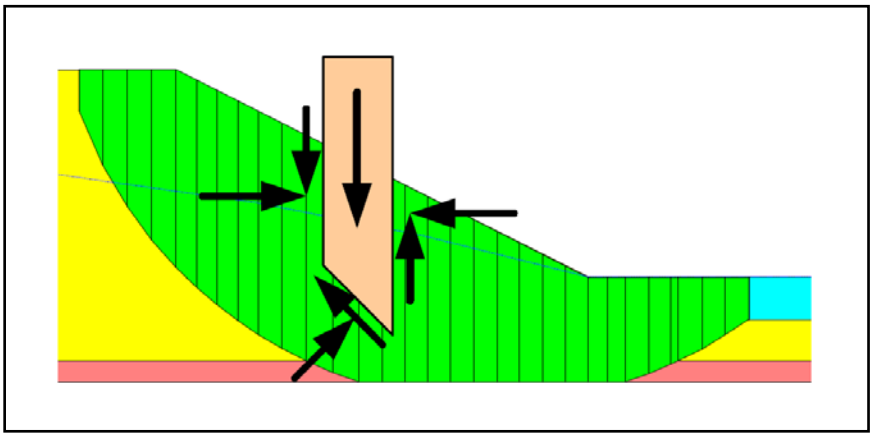


Figura XIV.2.4. Análisis de la estabilidad de un talud de dique mediante el método de las Dovelas (GEO-SLOPE International Ltd., 2007).

Para la obtención de los parámetros de campo se realizaron 12 sondeos exploratorios a lo largo del bordo MMH. Los sondeos se localizaron en puntos que los métodos geofísicos indirectos de Tomografía Eléctrica Resistiva, Georadar y sísmica mostraron presencia de anomalías asociadas con heterogeneidades dentro del cuerpo del bordo MMH. Así mismo se realizó un sondeo en una zona interpretada como homogénea y conformada

litológicamente por arcillas. La localización de los sondeos (Figura XIV.2.5) muestra la presencia de las principales anomalías geofísicas, en total se realizaron 72 m de exploración directa.

Figura XIV.2.5. Localización de sondeos geotécnicos.

El análisis de talud se realizó en la sección tipo de la TER 24, que muestra la presencia de una capa de limos de 1 m de espesor, a la cual le subyace una capa de arcilla de 3 m de espesor, la cual sin embargo no es homogénea a lo largo de la sección geoeléctrica. Por ello se modelaron escenarios de falla con las litologías observadas en los estudios geoeléctricos y validados por la exploración directa. Los parámetros de ángulo de fricción interna, peso volumétrico, e índice de permeabilidad en base a curva granulométrica.

La sección tipo (Figura XIV.2.6) muestra que el bordo, conforme a un control topográfico está por encima de la cota de 1186.74 m.s.n.m.m requerida para contener el tirante hidráulico asociado con una tormenta de diseño con periodo de retorno de 500 años. Estos estudios de elevación del bordo, obedecen al requerimiento del CENAPRED en su oficio XXXXXXX en que se solicita una simulación bidimensional para establecer la altura de diseño de un bordo de contención para un periodo de retorno de 100 años con bordo libre a 500 años, corresponden, respectivamente, a las cotas de 1186.123 y 1186.74 m.s.n.m.m. (Figura XIV.2.7). Los resultados correspondientes a esta simulación se entregaron al CENAPRED a inicios del 2017.

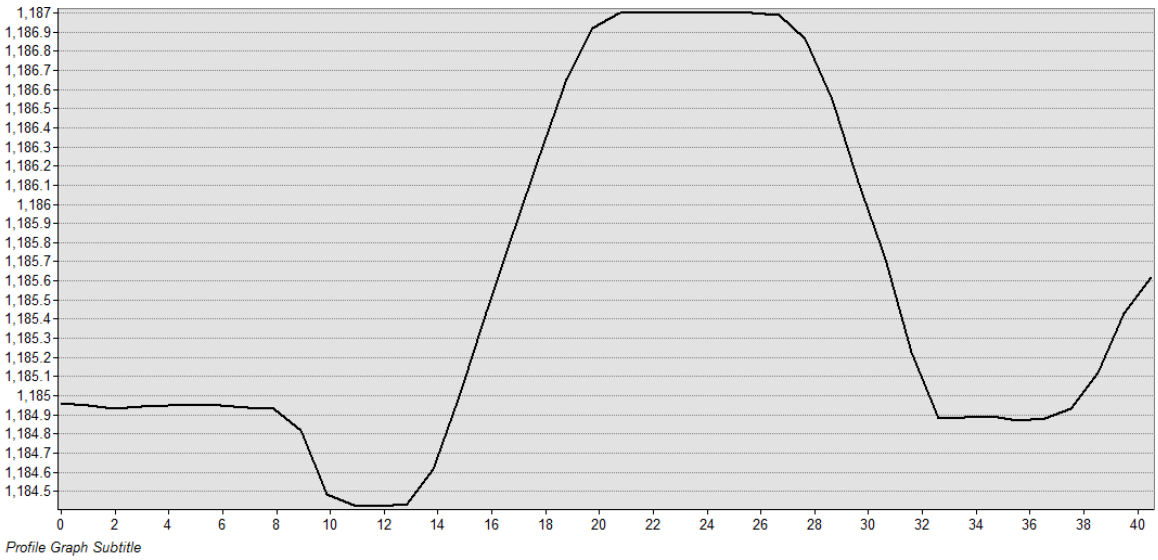


Figura XIV.2.6. Localización de sondeos geotécnicos.

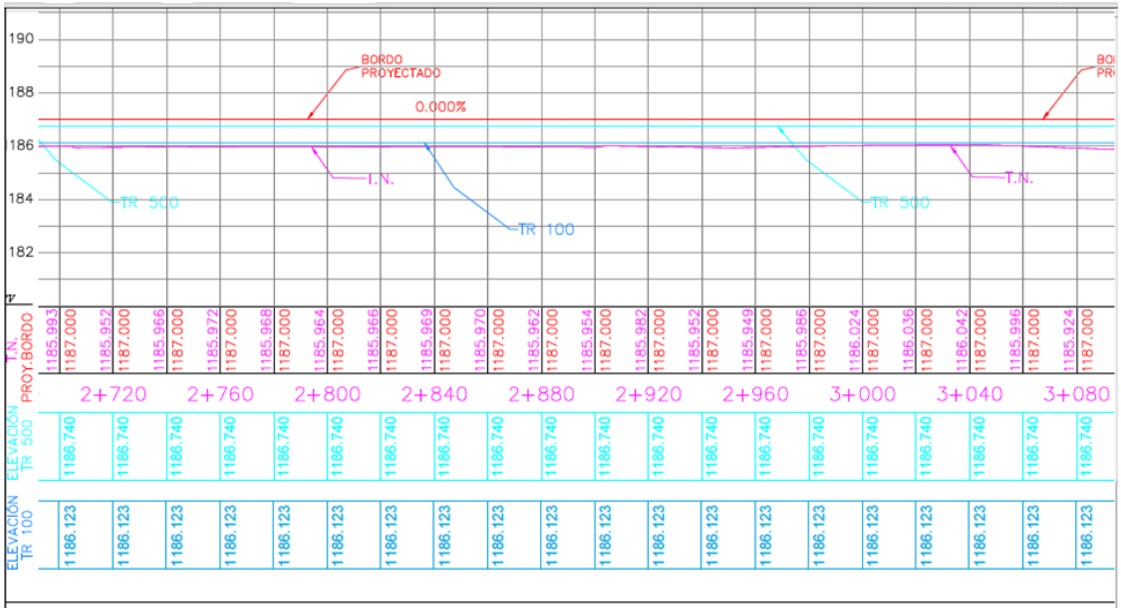


Figura XIV.2.7. Perfil de diseño del BMMH en base al estudio a la COESVI, 2016.

XIV.3. RESULTADOS, CONDICIONES DE SEGURIDAD DEL BMMH

A continuación se enlista los diferentes escenarios en los cuales se modeló de acuerdo a los análisis de talud para material arcilloso, con condiciones de suelo seco (Figuras XIV.3.1.1 a la Figura XIV.3.1.3), con línea piezometrica a un periodo de retorno de 100 años (Figuras XIV.3.2.1 a la Figura XIV.3.2.6) y de un TR de 500 años (Figuras XIV.3.3.1 a la Figura XIV.3.3.6). Además un análisis de talud para material con limo y arcilla, con condiciones de suelo seco (Figuras XIV.3.4.1 a la Figura XIV.3.4.6), con línea piezometrica a un periodo de retorno de 100 años (Figuras XIV.3.5.1 a la Figura XIV.3.5.6) y de un TR de 500 años (Figuras XIV.3.6.1 a la Figura XIV.3.6.6).

XIV.3.1. Talud con material Arcilloso: Suelo seco, TR 100 y 500 años

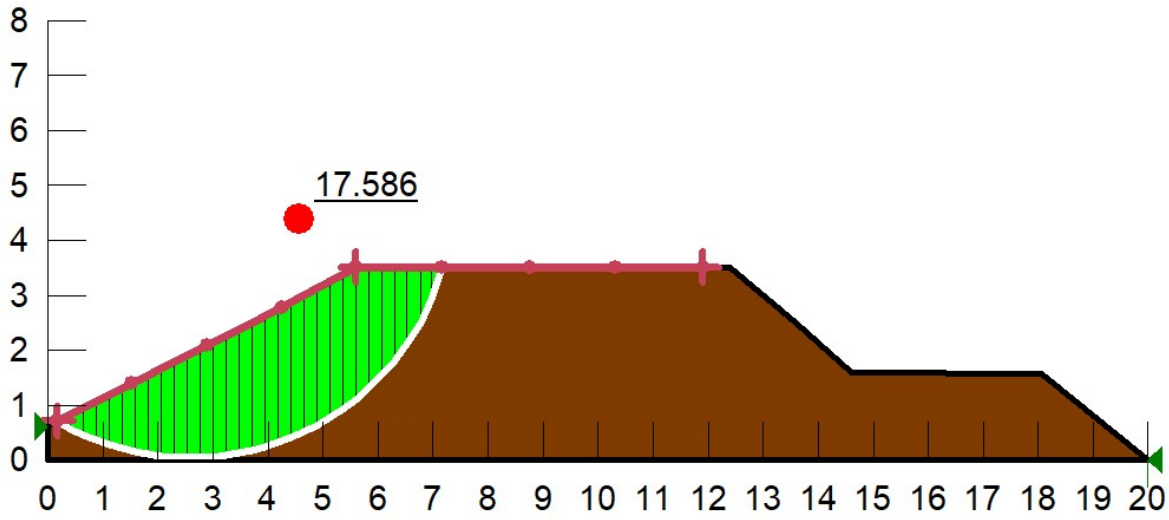


Figura XIV.3.1.1. Modelo teórico Falla de Base con suelo seco.

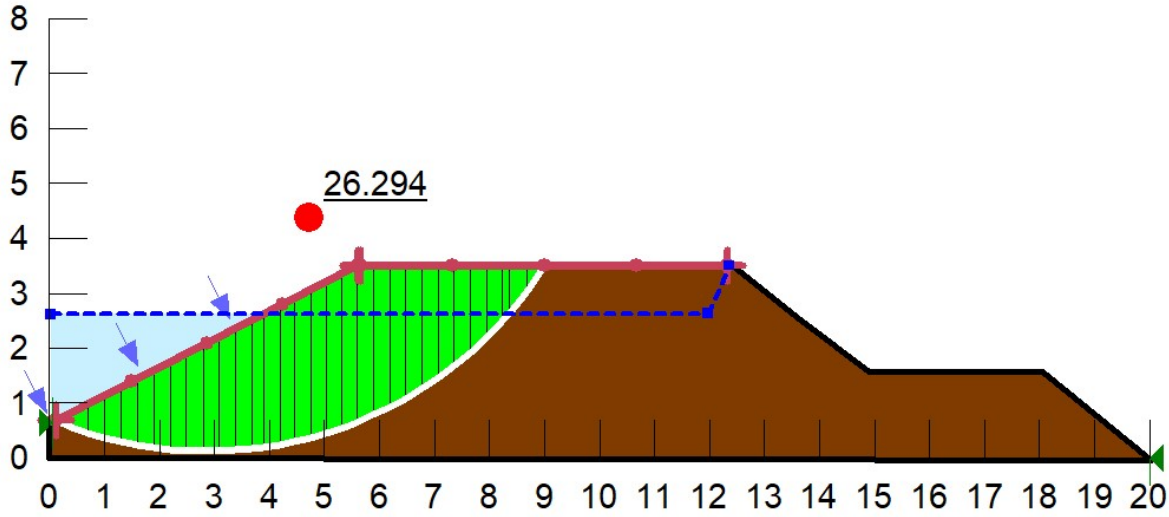


Figura XIV.3.1.2. Modelo teórico Falla de Base, TR 100 años.

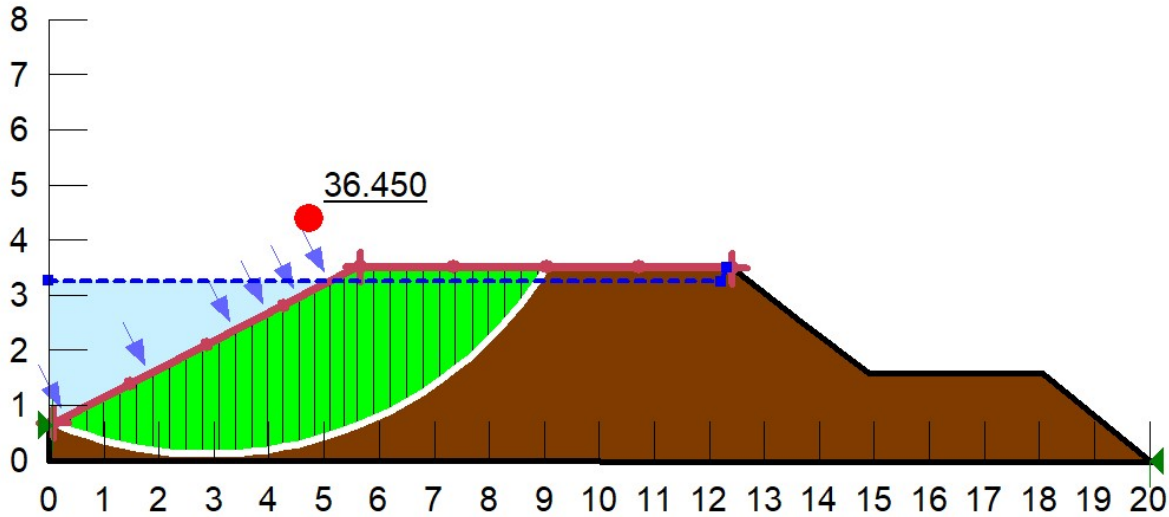


Figura XIV.3.1.3. Modelo teórico Falla Base, TR 500 años.

XIV.3.2. Talud con material Limo y Arcilla: Suelo seco, TR 100 y 500 años

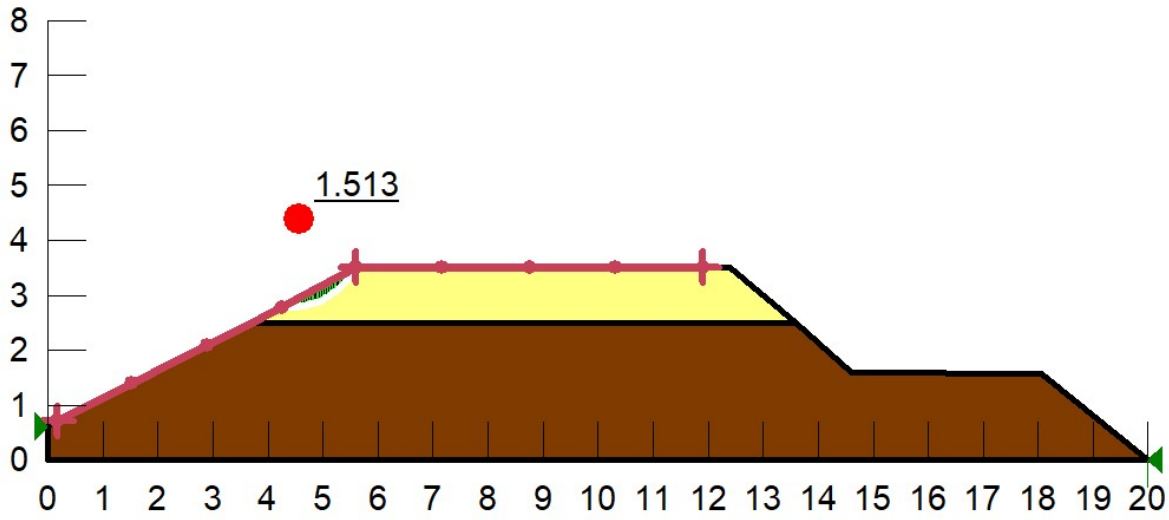


Figura XIV.3.4.1. Modelo teórico Falla de Base, suelo seco con 1 m de limos.

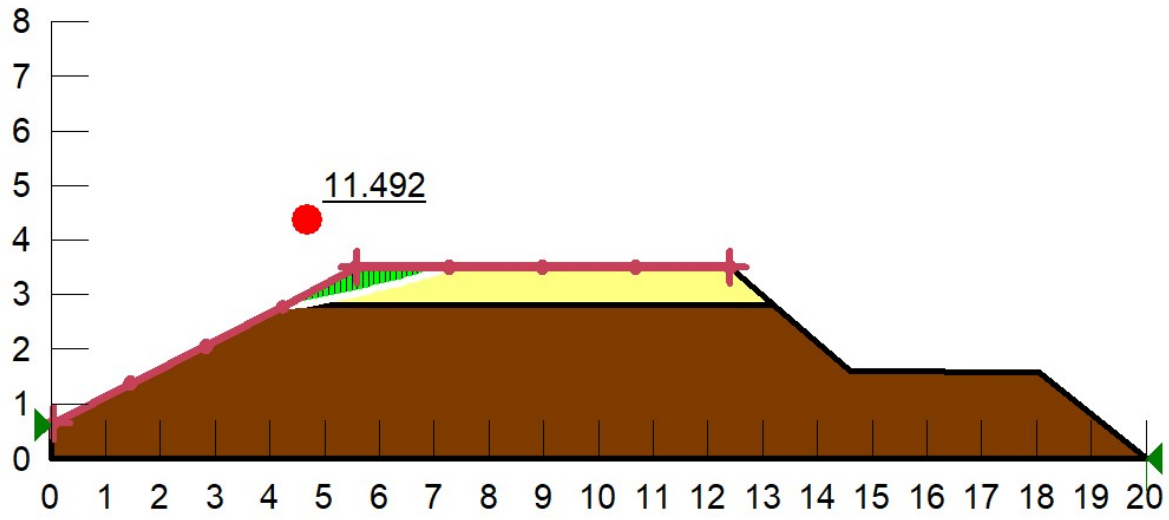


Figura XIV.3.4.2. Modelo teórico Falla de Base, suelo seco con 0.7 m de limos.

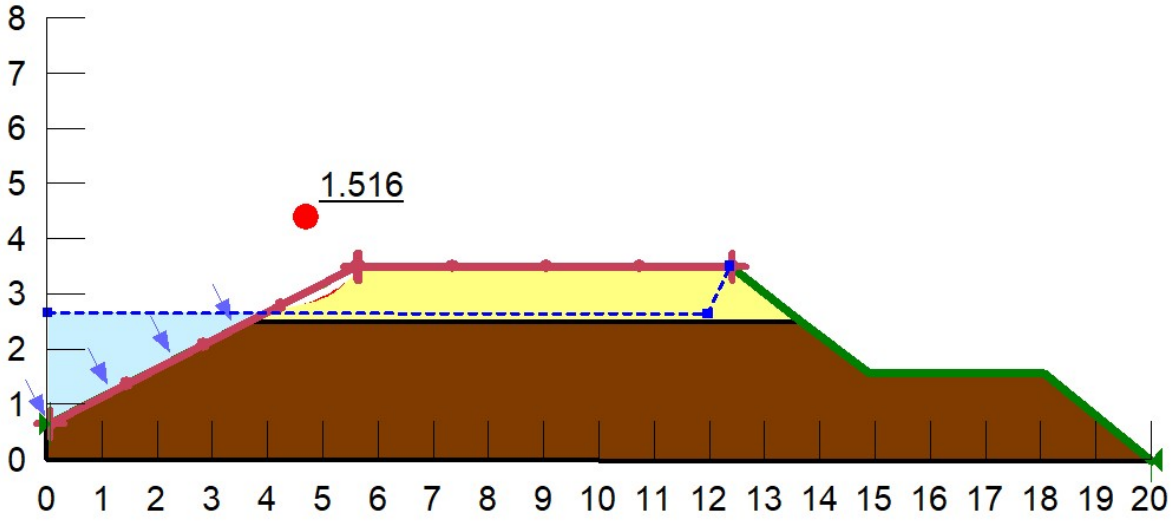


Figura XIV.3.4.3. Modelo teórico Falla de Base, a TR 100 años con 1.5 m de limos.

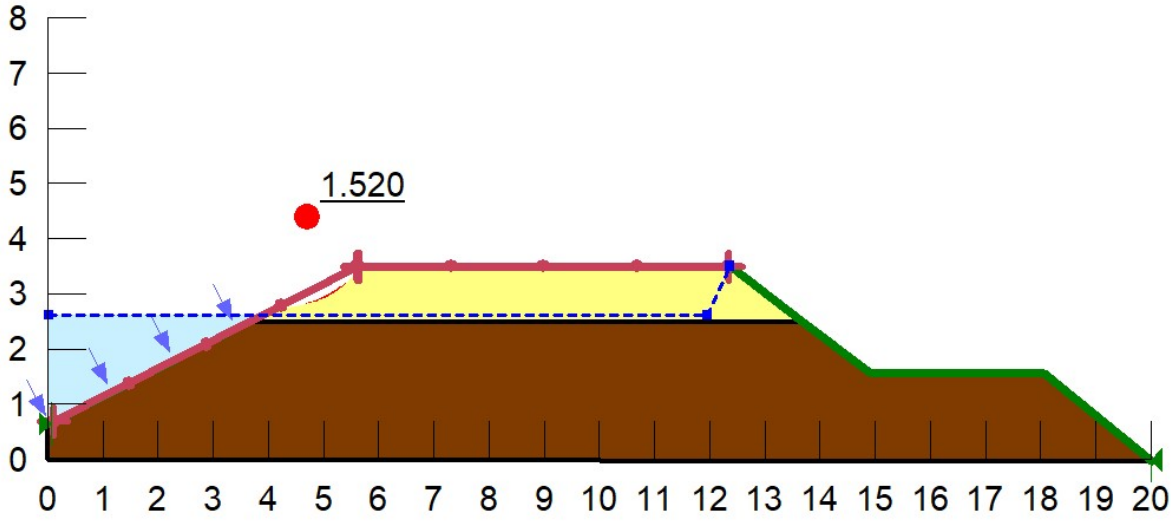


Figura XIV.3.4.4. Modelo teórico Falla de Base, a TR 100 años con 1.0 m de limos.

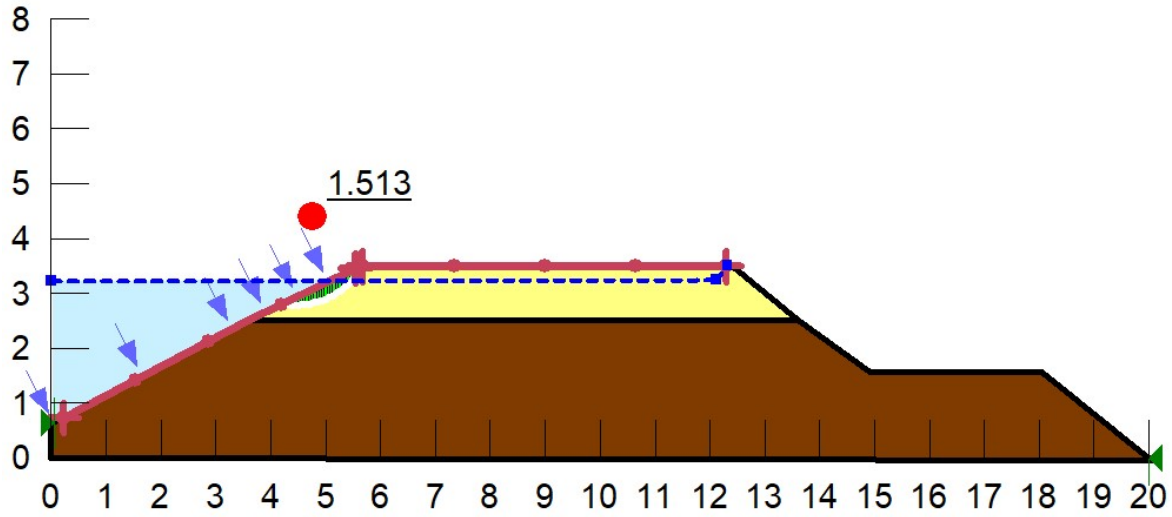


Figura XIV.3.4.5. Modelo teórico Falla de Base, a TR 500 años con 1.0 m de limos.

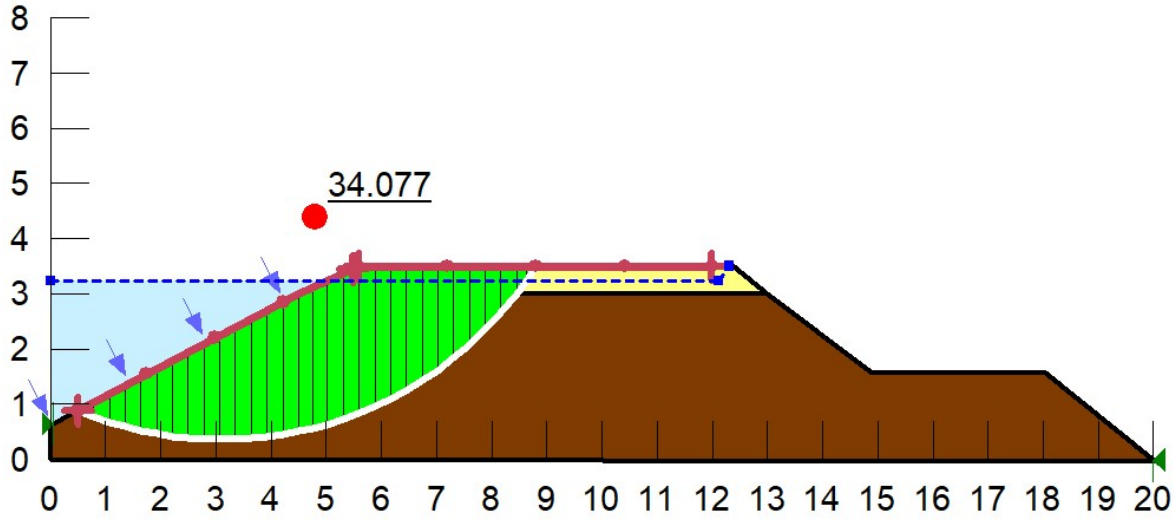


Figura XIV.3.4.6. Modelo teórico Falla de Base, a TR 500 años con 0.5 m de limos.

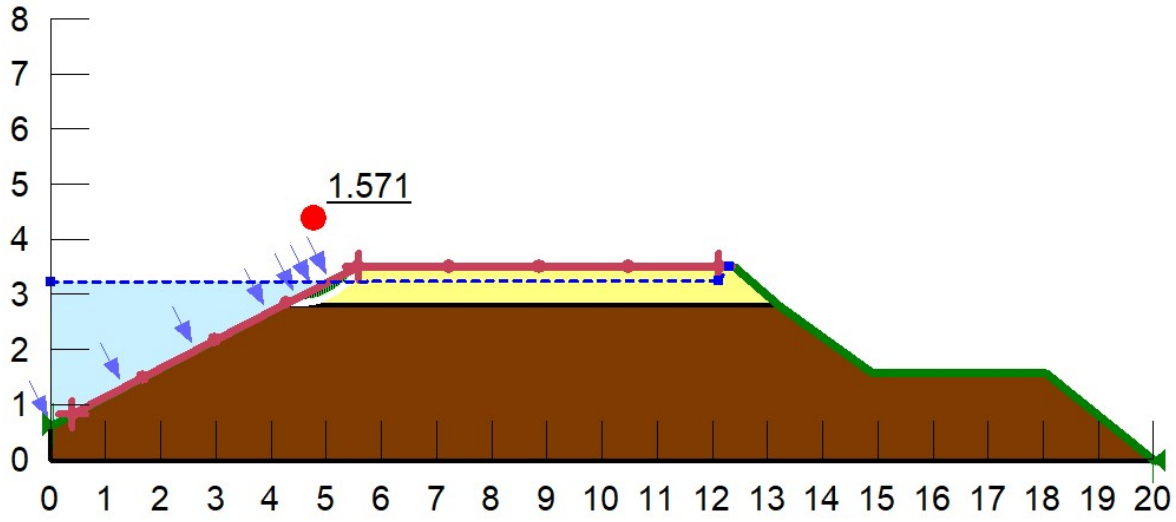


Figura XIV.3.4.6. Modelo teórico Falla de Base, a TR 500 años con 0.7 m de limos.

Como los reflejan los análisis de Estabilidad de Talud, el bordo presenta, bajo los diferentes escenarios de fallas calculados, que los factores de seguridad para los escenarios tipos se pueden resumir de la siguiente manera:

I. Si el cuerpo del dique está conformado por pura arcilla, el escenario de falla esta siempre muy por encima del valor de 1.5 del Factor de Seguridad (F.S).
II. Si el espesor del limo es menor de 1 m el factor de seguridad incrementa a valores por encima de 1.5 (F.S.)
III. Si el espesor de la capa de arenas limosas es de 1 m. el factor de seguridad es de 1.513 (F.S.).

IV. Si el espesor de la capa de arenas limosas es mayor a 1 m el factor de seguridad es menor al valor de umbral de 1.5 considerándose que el talud entra en falla.

XV. CONCLUSIONES FINALES

En base a la integración de toda la información geofísica y geotécnica y los escenarios de falla resultantes se concluye que el bordo presenta dos zonas con escenario posible de riesgo de falla estructural al estar sometido al tirante hidráulico asociado con la tormenta de 500 años de periodo de retorno:

I. Zona de corte: Esta zona, localizada a los extremos Noroeste del Bordo en la localización de las TER´s 1 y 2, se observa que el cuerpo del bordo fue alterado mecánicamente. El radargrama de esta zona es muy evidente a este respecto (Figura XV.1).

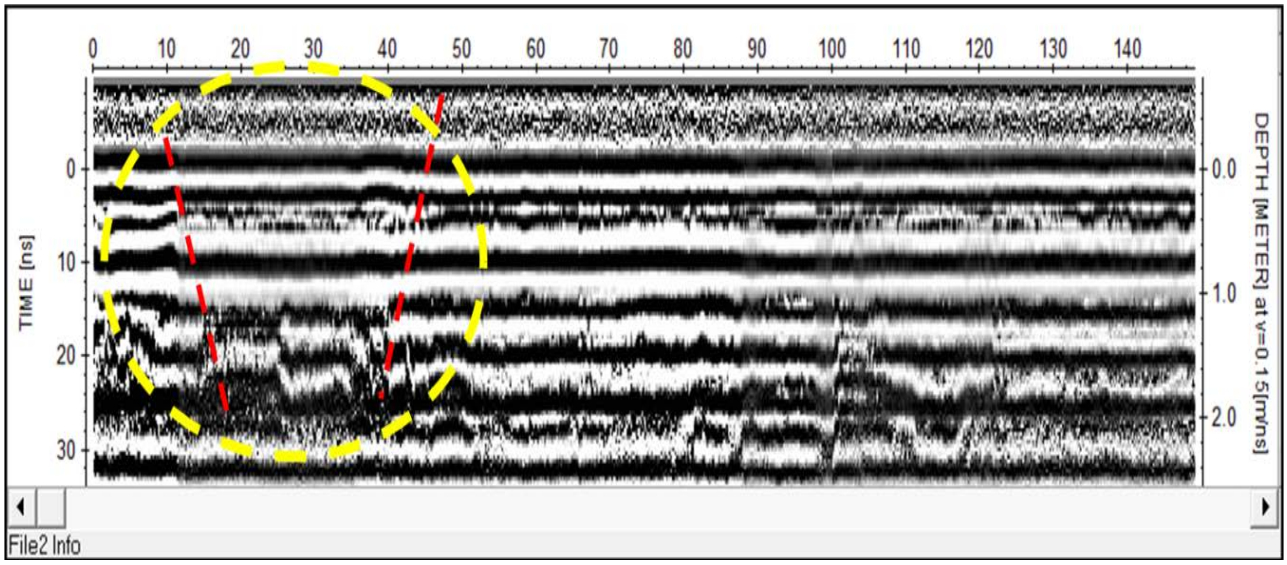


Figura XV. Radargrama de la zona del corte al noroeste del BMMH

II. Zonas Noroeste (A), localizada entre las TER´s 39 y 43. En esta zona se observa el mayor cambio de pendiente de la corona del bordo, y es aquí donde los flujos de la corrida hidráulica muestran muy alta velocidad lateral en su trayectoria hacia el centroide de la nueva zona de restitución lagunar definida por la presencia del Bordo MMH. En esta zona las TERs revelan espesores de materiales areno-limosos de más 1 m de espesor.

III. Zona central (B), localizada entre las TER´s 23 a la 27. En esta zona, la geofísica y geotecnia revelan perdida de continuidad lateral evidenciada por el acuñamiento del cuerpo de arcillas. Esta zona está en espesores de 1 m de litologías de arena limosa. Es decir en el límite del umbral de seguridad.

IV. Zona de la TER 09 (C) donde se observa la presencia de una estructura vertical de materiales arenosos irrumpiendo la continuidad del paquete de arcillas.

V. Zona de la TER 06, con notable pérdida de continuidad lateral del cuerpo de arcillas como consecuencia de la presencia de arenas limosas con poca cohesión.

VI. La localización de las zonas con condición precaria de integridad estructural tal muestran en la Figura XV.2.

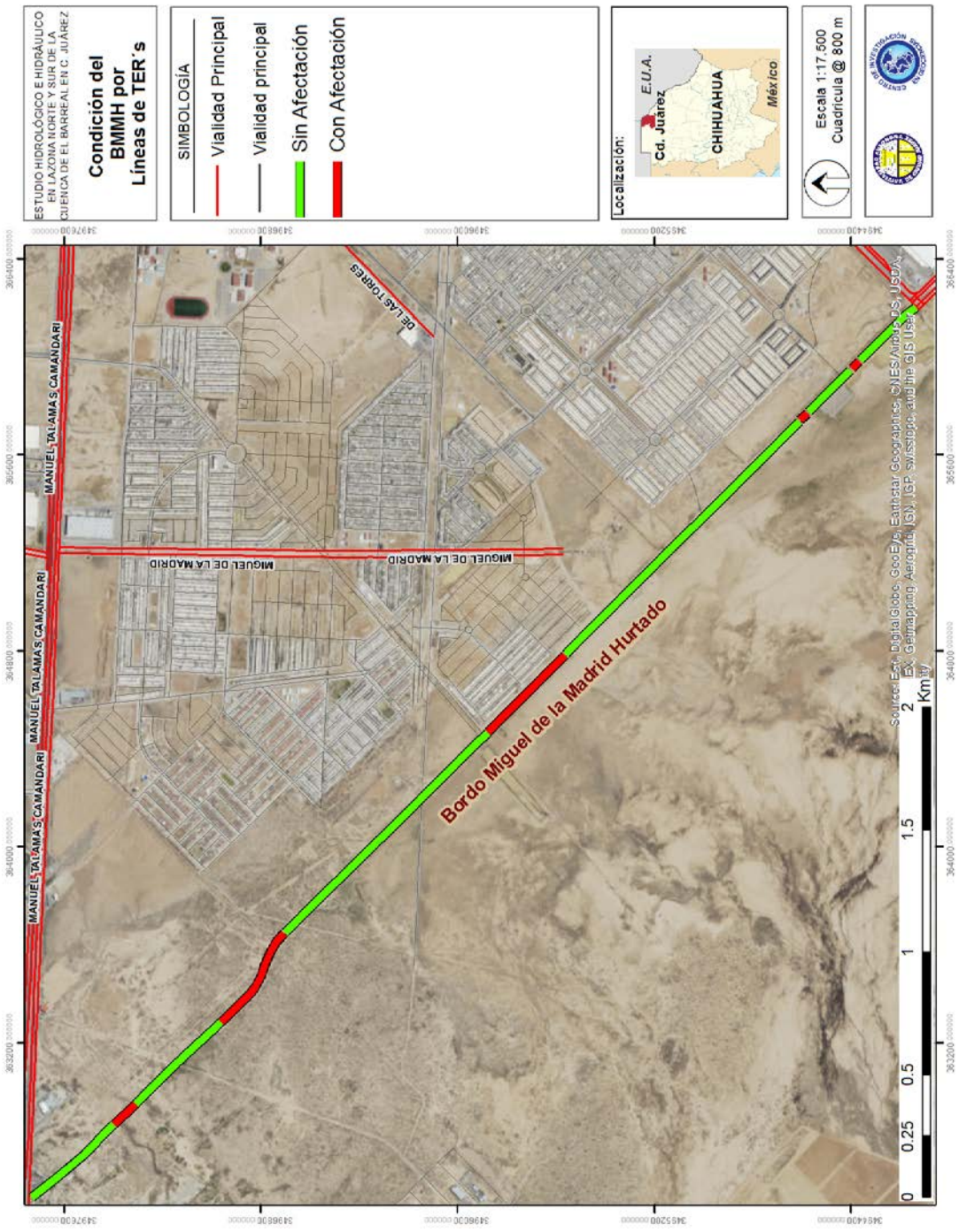


Figura XV.2. Zonas con condición precaria de estabilidad estructural.

XVI. RECOMENDACIONES

I. Dado que las funciones de falla presentan valores límite en el umbral de 1.5, se recomienda el realizar pruebas Triaxales en las zonas con potencial de falla para validar con mayor certeza los parámetros de los estratos que conforma el bordo y poder precisar con mucho más detalle y certidumbre el riesgo de falla estructural.

II. Realizar al menos un ensaye Lefranc sobre la corona del bordo para obtener una permeabilidad directa y no inferida por condiciones granulométricas. Esta recomendación se emite en función de la cercanía del bordo MMH en la zona de las TER 24 y 25 a desarrollos habitacionales, localizados a tan solo 40 m de distancia. De esta manera se podrá evaluar con mayor certidumbre el posible escenario de falla por erosión interna de la estructura.

XVII. BIBLIOGRAFÍA

1) Loke M.H, Akworth I. and Dhalin, T., 2003, A comparison of smooth and blokcy inversions methods in 2D electrical imaging surveys, Exploration Geophysics, 32, 182-187.

2) Palacky, G. I., 1987, Resistivity characteristics of geological targets. In: M. Nabighian, Editor, Electromagnetic Methods in Applied Geophysics-Theory, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, pp.53-129.

3) Sharma P., 1997. Environmental and engineering geophysics, Cambridge University Press, pp. 500, ISBN: 0521576326.

INSTITUTO DEL FONDO NACIONAL DE LA VIVIENDA PAR LOS TRABAJADORES

I N F O N A V I T

“ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO EN LA ZONA NORTE Y SUR DE LA CUENCA DE EL BARREAL EN CIUDAD JUAREZ, CHIHUAHUA”

REPORTE

ANÁLISIS HIDRÁULICO DE LAS ZONAS DE PELIGRO MEDIO, ALTO O MUY ALTO DE INUNDACIÓN

INDICE

I. INTRODUCCION 3
II. METODOLOGÍA DE MODELACIÓN 4
III. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA DE SUBCUENCAS ... 20
IV. CONCLUSIONES 48

I. INTRODUCCION

La modelación hidráulica es el elemento clave en la consecución del objetivo global del presente estudio: definición de las zonas inundables dentro del área de estudio. El resultado de la modelación matemática bidimensional consiste entonces en la generación de mapas de área inundable, también conocidos como mapas de peligrosidad, el cual ya es un concepto asociado a la probabilidad de ocurrencia o excedencia de un evento hidrometeorológico. Es decir, no solo se calcula la extensión geoespacial de la zona de inundación, sino que además se asocia está a una probabilidad de excedencia o tiempo de retorno, por lo que la tormenta de diseño para un periodo de retorno determinado es un insumo fundamental en la fase de modelación hidráulica bidimensional.

En términos más técnicos, la zona de inundación está definida por los tirantes o profundidades de inundación correspondiente a tormentas o lluvias de diseño asociada a probabilidades de excedencia. El software o paquete computacional utilizado en este estudio es el IBER, cuya metodología basada en elementos de volumen, le permite simular regímenes de flujo turbulento, laminar o a superficie libre. Este software es un estándar en la modelación y se aplica en hidrodinámica fluvial, definición de zonas inundables, transporte de sedimentos y rotura de presas entre otros.

Para este caso se utilizó el modulo hidrodinámico, trabajando con una malla no estructurada de elementos de volumen finitos (no elementos finitos) conformada por elementos triangulares.

Matemáticamente este paquete resuelve las ecuaciones de St. Venant en 2 dimensiones, asumiendo distribución uniforme de velocidades y de presión hidrostática.

II. METODOLOGÍA DE MODELACIÓN

El proceso de modelación 2D consiste en la utilización de los sistemas de información geográfica (SIG) y el software iBER. El diagrama de flujo (Figura II.1) muestra las etapas que metodológicamente se siguen en estudios de modelación hidráulica.

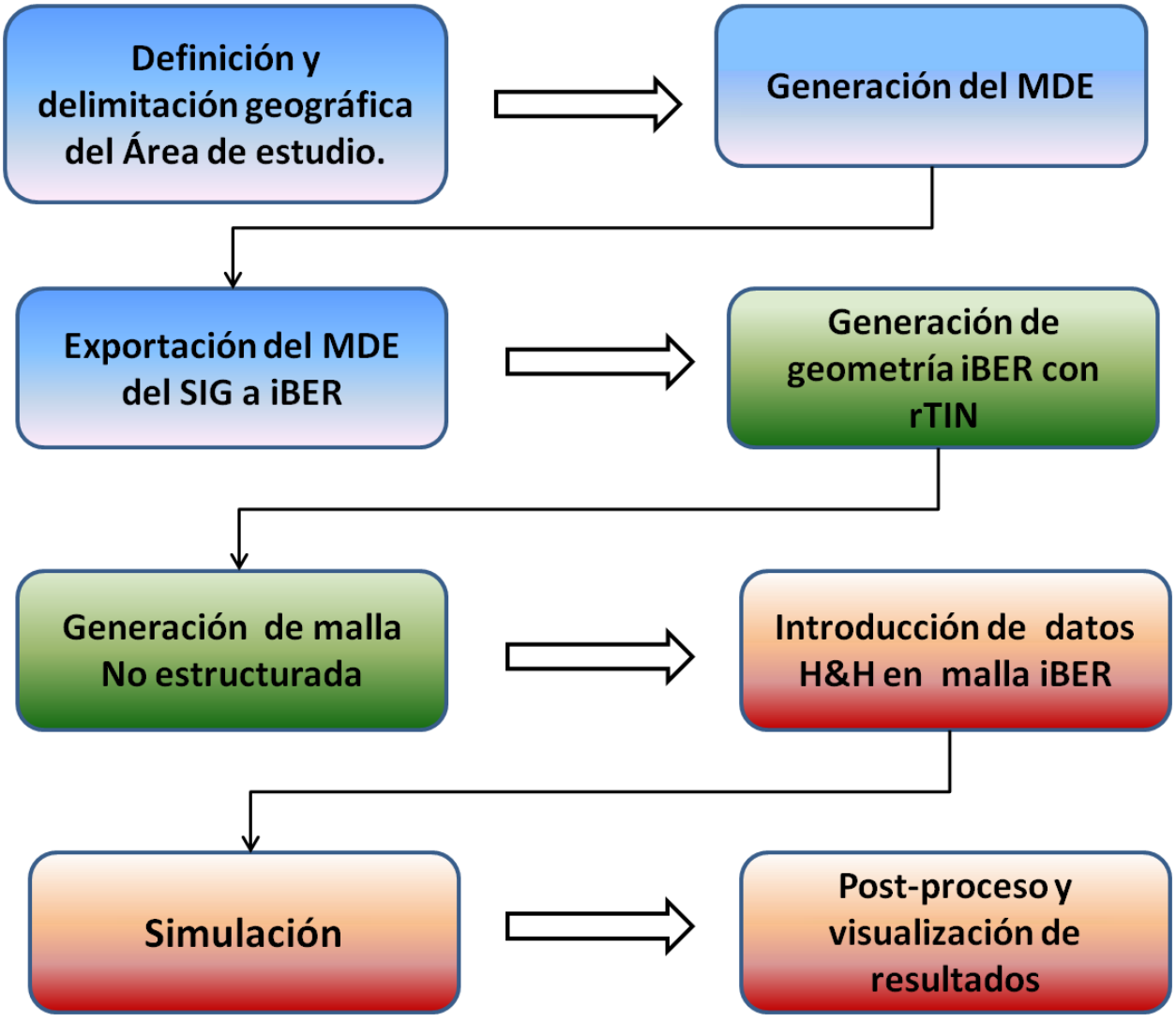


Figura II.1 Diagrama de flujo del procesamiento y resultados.

i. Definición del Área de Estudio

En la plataforma de SIG, se delimita el área de estudio para dar lugar a la generación del modelo Digital de Elevación (MDE) con datos topográficos. En este estudio el área de estudio es un polígono de 100 Km^2 que cubre la zona urbanizada de la cuenca del Barreal (Figura II.i.1).

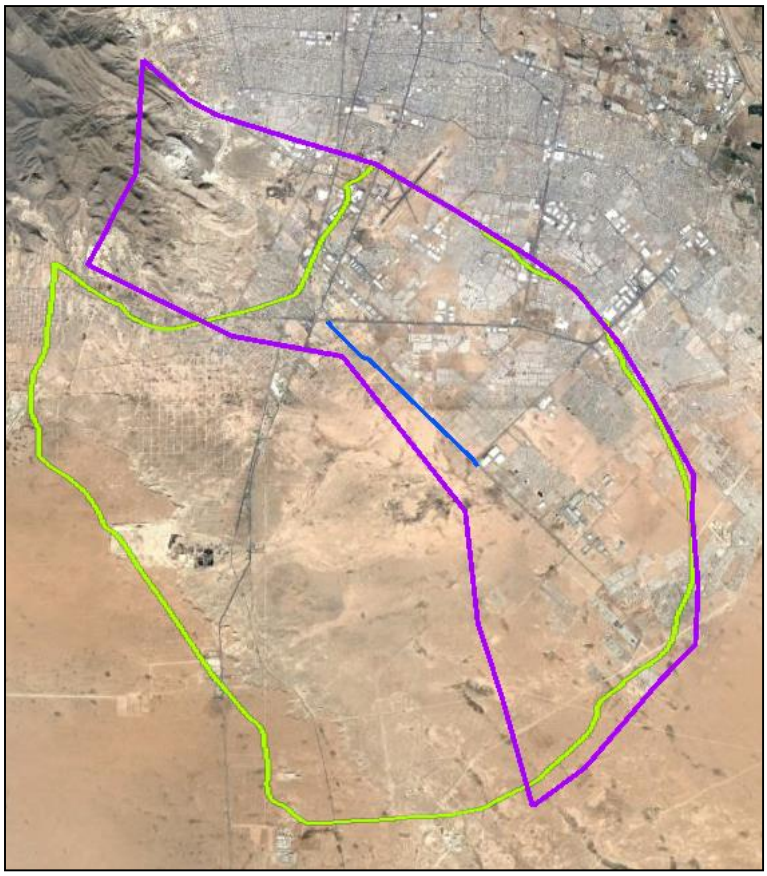


Figura II.i.1 Polígono de estudio.

Esta cobertura deja fuera del presente estudio un área de aproximadamente 95 Km^2 de la porción este de la cuenca. La razón de esta exclusión es que el presente estudio está enfocado a evaluar la peligrosidad hidrología en la zona urbana, además de que en el 2016 se realizó un estudio de la parte este del barreal para calcular el volumen escurrió y tirantes de inundación con el objetivo de presentar un diseño geométrico para la sobre-elevación del Bordo Miguel de la Madrid Hurtado para un periodo de retorno de 100 años con bordo libre a 500 años. Este estudio fue solicitado por el CENAPRED en el 2016 al municipio de Ciudad Juárez y los resultados se entregaron a CENAPRED en Marzo del

2017. Es decir, ya existía una cobertura de casi 100 km^2 modelados, incluyendo el bordo MMH. Por lo que se decidió en conjunto con CENAPRED acotar el presente estudio a solo la parte urbanizada de la cuenca.

ii. Generación del DEM

Aun y cuando el área de estudio era de solo 100 km^2 conforme a los Términos de Referencia, se generó de un DEM hibrido de 200 km^2, con tamaño de celda de 1mx 1m y resolución vertical menor a los 20 cm. El CENAPRED solicito esta adecuación metodológica con el objetivo de generar un DEM más resolutivo. Este producto se utilizó tanto para la modelación hidrológica como hidráulica, y consiste de datos actualizados al 2017 por restitución fotogramétrica en la zona urbanizada y por topografía con sistema GPS de doble frecuencia en las zonas no cubiertas y LiDAR en la zona no urbana o sin cambio en el desarrollo urbano (Figura III.1.4). Este modelo presenta dos zonas de sutura, una al norte y otra al poniente, en los extremos de la fotogrametría, hay siempre distorsiones que se corrigieron con el empate con LiDAR, y con levantamiento terrestre. Esto es principalmente importante para estructuras hidráulicas localizada en la frontera o límite del levantamiento fotogramétrico. En este caso, el Bordo MMH y los vasos al norte fueron introducidos a partir de polígonos Acad para asegurar la fidedigna representación del terreno en los bordes.

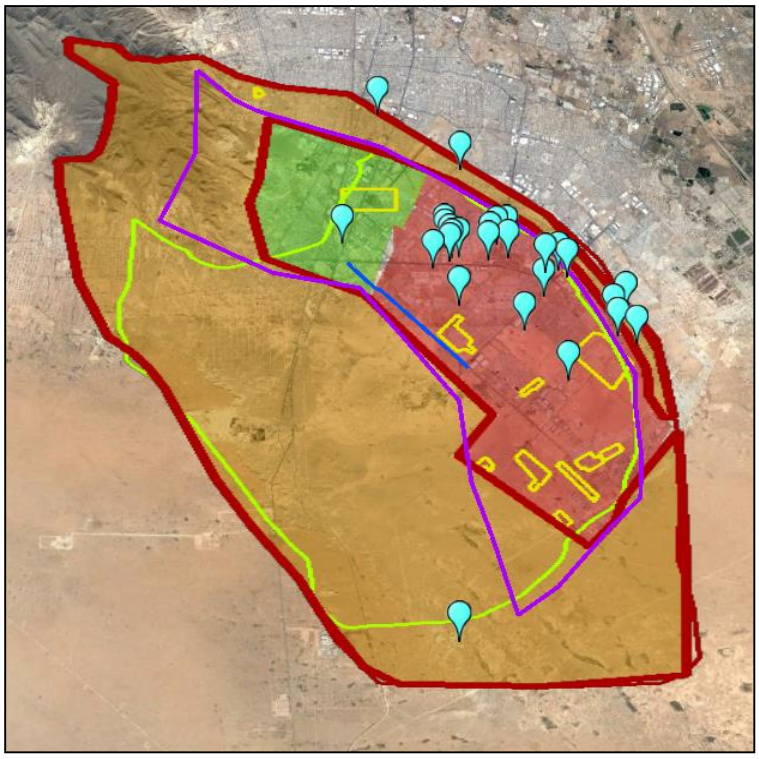


Figura III.1.4. Generación del DEM. El polígono sombreado marrón representa el área cubierta con LIDAR 2008, el purpura el área de estudio, el verde al área actualizada con topografía con GPS doble frecuencia y el polígono rojo el área actualizada con fotogrametría 2017.

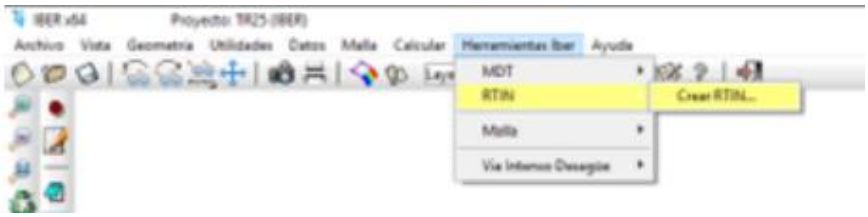
iii. DEM a iBER

El DEM se exporta en formato ASCII por medio de herramientas SIG. Posteriormente, ya en IBER se lee el DEM en formato ASCII para proceder a la fase de generación de la geometría o malla de volúmenes finitos.

iv. Generación de geometría con RTIN

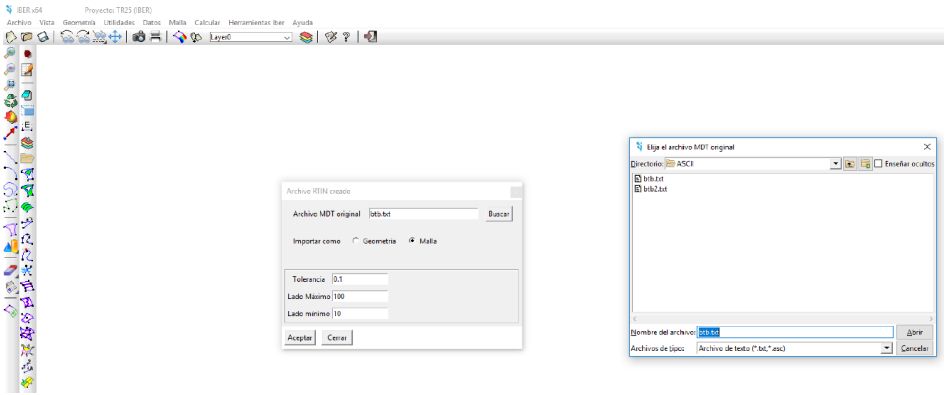
Dada la alta densidad de información (200 millones de celdas), se procedió a generar la geometría de las componentes espaciales X y Y utilizando la herramienta RTIN que determina el tamaño de los elementos de modelo en función de los cambios de pendiente observados en el terreno. Este método de aproximación cordal observa los gradientes topográficos en el terreno y aproxima a este linealmente restringiéndose a los límites de tamaño y error que el usuario imponga. Este método permite optimizar el mallado ya que

genera elementos de mayor tamaño en grandes planicies, como es el caso de El Barreal en su parte lagunar no urbanizada.

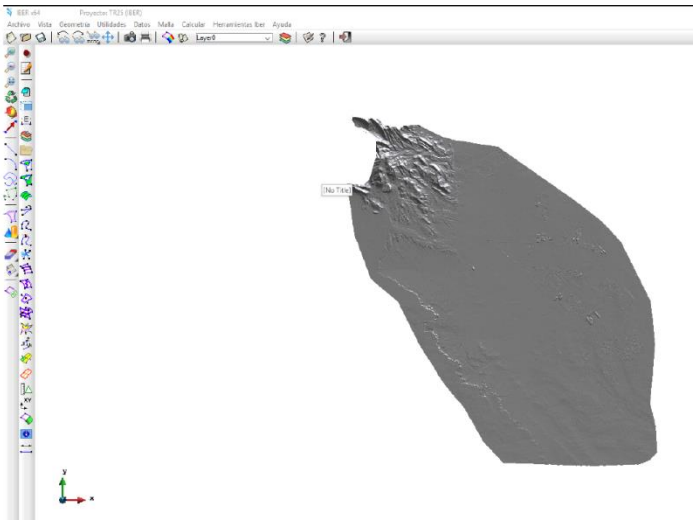


v. Generación de malla no estructurada

Una vez que el arreglo geoespacial XY fue generado, se procedió a asignar elevaciones a cada elemento o celda a partir de los valores del DEM. De esta manera se generaron los elementos de volumen triangular para la modelación hidráulica.



El paso anterior puede tardar minutos e incluso horas (llegando en casos a días), pero al final se debe de observar una malla con la elevación impactada en ella siendo esta entonces la geometría de trabajo.



vi. Introducción de datos H&H

En esta etapa se introducen los datos hidrológicos e hidráulicos. Hidrológicamente, los parámetros a ingresar son Hidrogramas, Hietogramas y modelos de pérdidas. En este caso se aplicó el modelo de lluvia de la lluvia de diseño adoptada en el estudio hidrológico. La conversión Precipitación-Intensidad (Tabla I) muestra la conversión de mm a mm/hora para un evento asociado a un determinado periodo de retorno de la lluvia de diseño.

Tabla I. Tabla de conversión.

TIEMPO T	PRECIPITACION P Milímetros acumulados en el tiempo de columna tiempo	T_HORAS TH Tiempo en Horas	T_segundos TS Tiempo en Segundos TS=(TH)*3600	DELTA DE TIEMPO DT Incremento de tiempo en horas DT=(DTN)-(DTN-1)	Intensidad I Intensidad en milímetros por hora
0 minutos	0	0	0	0	
5 minutos	22.43	0.083333333	300	0.083333333	269.16
15 minutos	44.87	0.25	900	0.166666667	269.22
1 hora	56.09	1	3600	0.75	74.78666667
2 horas	65.06	2	7200	1	65.06
3 horas	70.67	3	10800	1	70.67
6 horas	83.01	6	21600	3	27.67
12 horas	96.47	12	43200	6	16.07833333
24 horas	112.17	24	86400	12	9.3475

En este modelo se usó una lluvia más extrema la cual es una distribución Lognormal, el cual el 50% de la precipitación cae en la primera hora y el resto distribuida en las siguientes 23 horas.

Los hietogramas específicos para cada corrida hidráulica (Figuras X a Y) muestran e formato requerido por el paquete computacional IBER para llevar a cabo las modelaciones correspondientes a cada periodo de retorno (TR2, TR5, TR10, TR20, TR25, TR50, TR100, TR250 y TR500). El eje de las abscisas representa el periodo de tiempo en segundos y el eje de las ordenadas la intensidad en mm/hora. Los gráficos muestran también, la lluvia distribuida en 24 horas, a la cual le corresponde un total de 86401 segundos y la cantidad de mm por hora para cada probabilidad de excedencia o periodo de retorno.

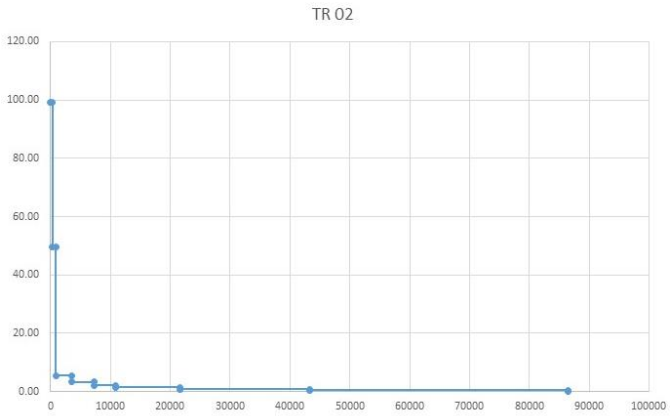


Figura vi.1 Hietograma y distribución de lluvia para 24 horas correspondiente al periodo de retorno de 2 años. (El tiempo (eje de las abscisas) en segundos, y la intensidad (eje de las ordenadas) en mm/hora)

HIETOGRAMA IBER	
TIEMPO	PRECIPITACION
0	142.32
300	142.32
301	71.10
900	71.10
901	7.91
3600	7.91
3601	4.74
7200	4.74
7201	2.97
10800	2.97
10801	2.17
21600	2.17
21601	1.19
43200	1.19
43201	0.69
86400	0.69
86401	0.00

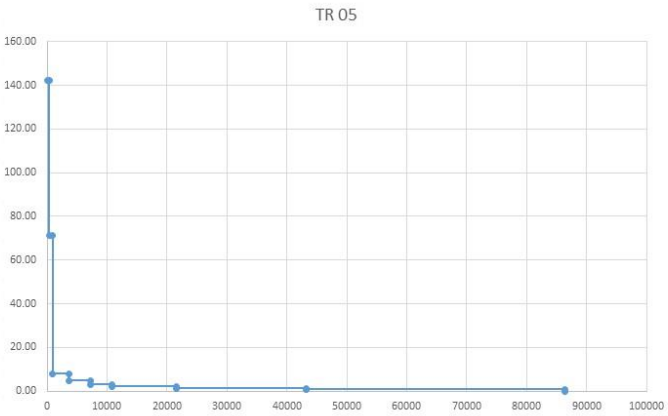


Figura vi.2 Hietograma y distribución de lluvia para 24 horas correspondiente al periodo de retorno de 5 años. (El tiempo (eje de las abscisas) en segundos, y la intensidad (eje de las ordenadas) en mm/hora)

HIETOGRAMA IBER	
TIEMPO	PRECIPITACION
0	171.72
300	171.72
301	85.86
900	85.86
901	9.55
3600	9.55
3601	5.72
7200	5.72
7201	3.58
10800	3.58
10801	2.62
21600	2.62
21601	1.43
43200	1.43
43201	0.84
86400	0.84
86401	0.00

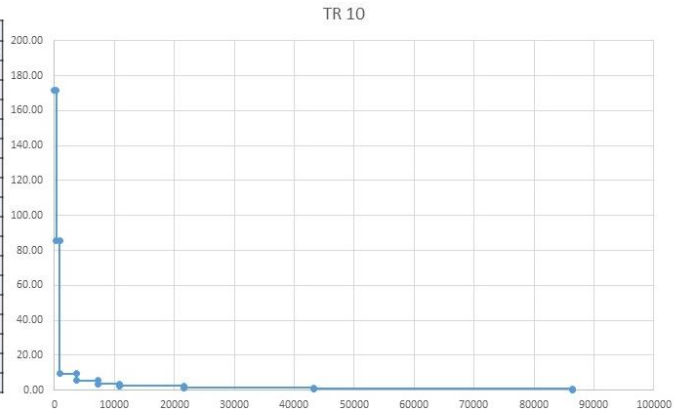


Figura vi.3 Hietograma y distribución de lluvia para 24 horas correspondiente al periodo de retorno de 5 años. (El tiempo (eje de las abscisas) en segundos, y la intensidad (eje de las ordenadas) en mm/hora)

HIETOGRAMA IBER	
TIEMPO	PRECIPITACION
0	200.40
300	200.40
301	100.14
900	100.14
901	11.13
3600	11.13
3601	6.68
7200	6.68
7201	4.17
10800	4.17
10801	3.06
21600	3.06
21601	1.67
43200	1.67
43201	0.97
86400	0.97
86401	0.00

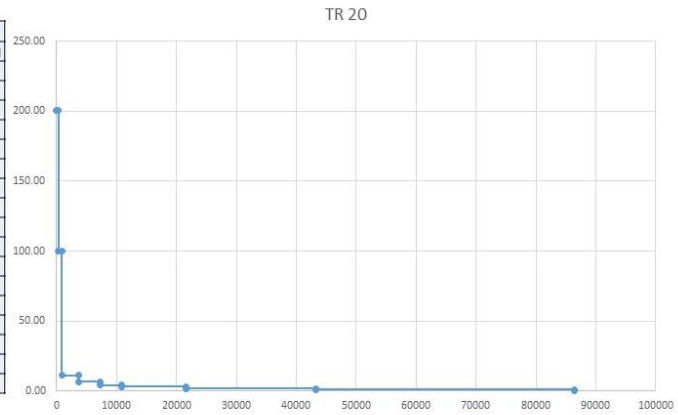


Figura vi.4 Hietograma y distribución de lluvia para 24 horas correspondiente al periodo de retorno de 10 años. (El tiempo (eje de las abscisas) en segundos, y la intensidad (eje de las ordenadas) en mm/hora)

HIETOGRAMA IBER	
TIEMPO	PRECIPITACION
0	210.00
300	210.00
301	105.00
900	105.00
901	11.68
3600	11.68
3601	7.00
7200	7.00
7201	4.37
10800	4.37
10801	3.21
21600	3.21
21601	1.75
43200	1.75
43201	1.02
86400	1.02
86401	0.00

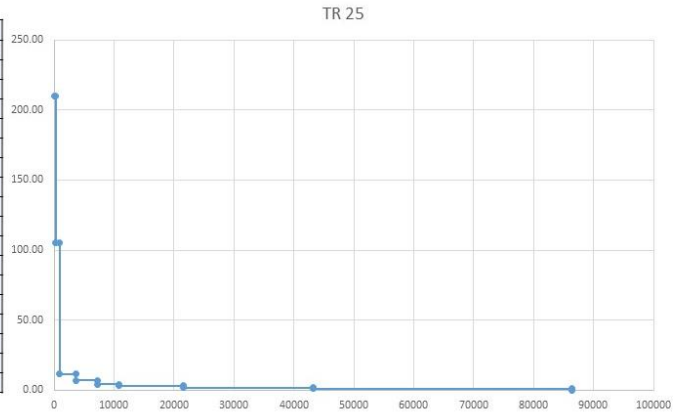


Figura vi.5 Hietograma y distribución de lluvia para 24 horas correspondiente al periodo de retorno de 25 años. (El tiempo (eje de las abscisas) en segundos, y la intensidad (eje de las ordenadas) en mm/hora)

HIETOGRAMA IBER	
TIEMPO	PRECIPITACION
0	238.80
300	238.80
301	119.40
900	119.40
901	13.27
3600	13.27
3601	7.95
7200	7.95
7201	4.98
10800	4.98
10801	3.65
21600	3.65
21601	1.99
43200	1.99
43201	1.16
86400	1.16
86401	0.00

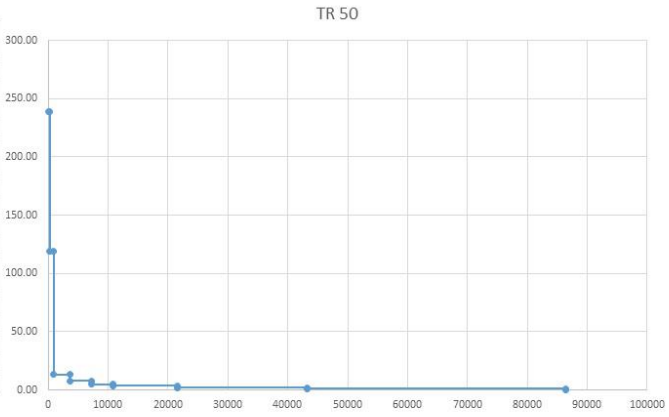


Figura vi.6 Hietograma y distribución de lluvia para 24 horas correspondiente al periodo de retorno de 50 años. (El tiempo (eje de las abscisas) en segundos, y la intensidad (eje de las ordenadas) en mm/hora)

HIETOGRAMA IBER	
TIEMPO	PRECIPITACION
0	269.16
300	269.16
301	134.64
900	134.64
901	14.96
3600	14.96
3601	8.97
7200	8.97
7201	5.61
10800	5.61
10801	4.11
21600	4.11
21601	2.24
43200	2.24
43201	1.31
86400	1.31
86401	0.00

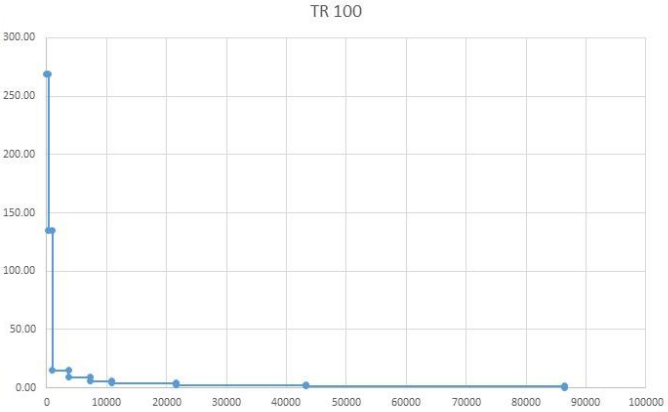


Figura vi.7 Hietograma y distribución de lluvia para 24 horas correspondiente al periodo de retorno de 100 años. (El tiempo (eje de las abscisas) en segundos, y la intensidad (eje de las ordenadas) en mm/hora)

HIETOGRAMA IBER	
TIEMPO	PRECIPITACION
0	313.60
300	313.60
301	156.80
900	156.80
901	17.42
3600	17.42
3601	10.45
7200	10.45
7201	6.53
10800	6.53
10801	4.79
21600	4.79
21601	2.61
43200	2.61
43201	1.52
86400	1.52
86401	0.00

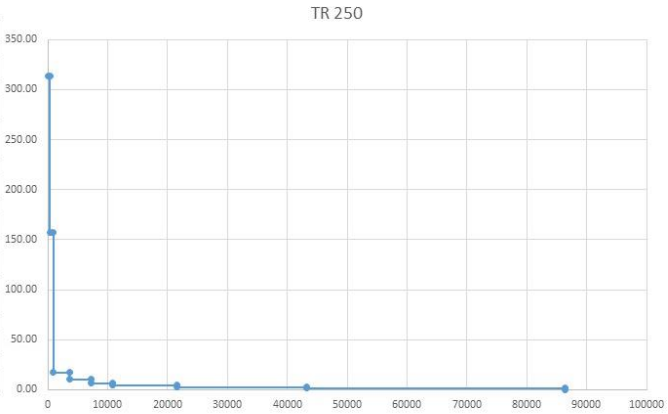


Figura vi.8 Hietograma y distribución de lluvia para 24 horas correspondiente al periodo de retorno de 250 años. (El tiempo (eje de las abscisas) en segundos, y la intensidad (eje de las ordenadas) en mm/hora)

HIETOGRAMA IBER	
TIEMPO	PRECIPITACION
0	342.12
300	342.12
301	171.06
900	171.06
901	19.01
3600	19.01
3601	11.40
7200	11.40
7201	7.13
10800	7.13
10801	5.23
21600	5.23
21601	2.85
43200	2.85
43201	1.66
86400	1.66
86401	0.00

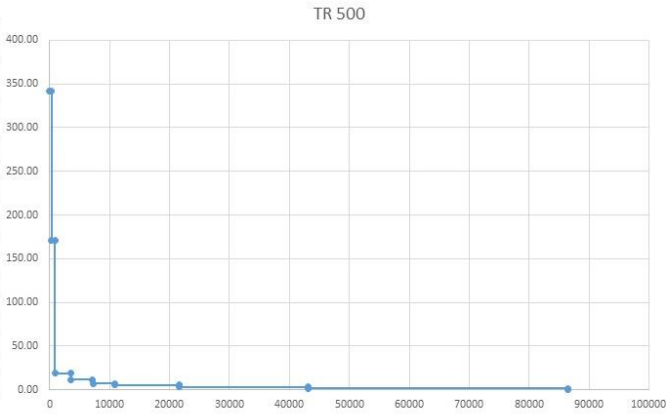


Figura vi.9 Hietograma y distribución de lluvia para 24 horas correspondiente al periodo de retorno de 500 años. (El tiempo (eje de las abscisas) en segundos, y la intensidad (eje de las ordenadas) en mm/hora)

El acceso de los datos a iber (Figura vi.10) muestra cómo se introduce el hietograma a al software para llevar a cabo la modelación.

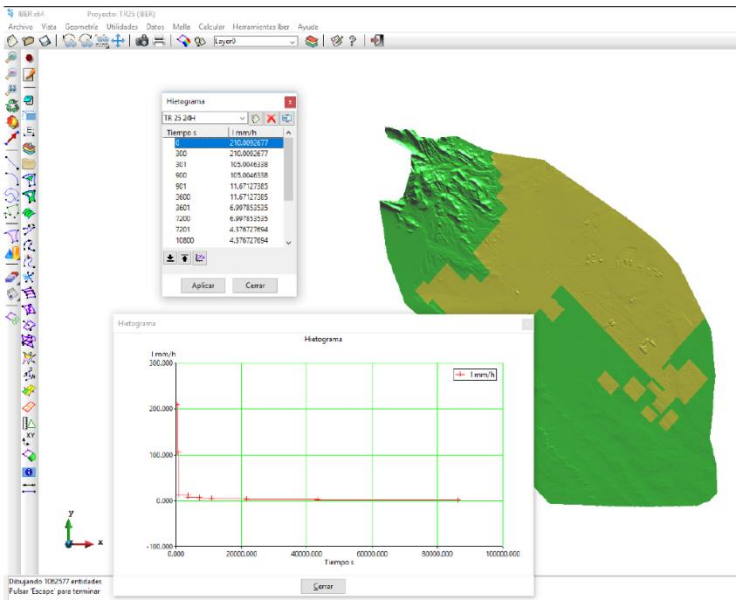
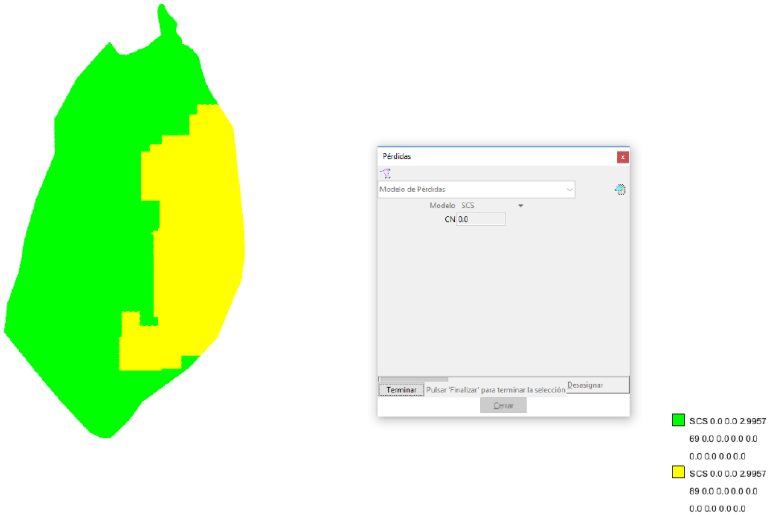
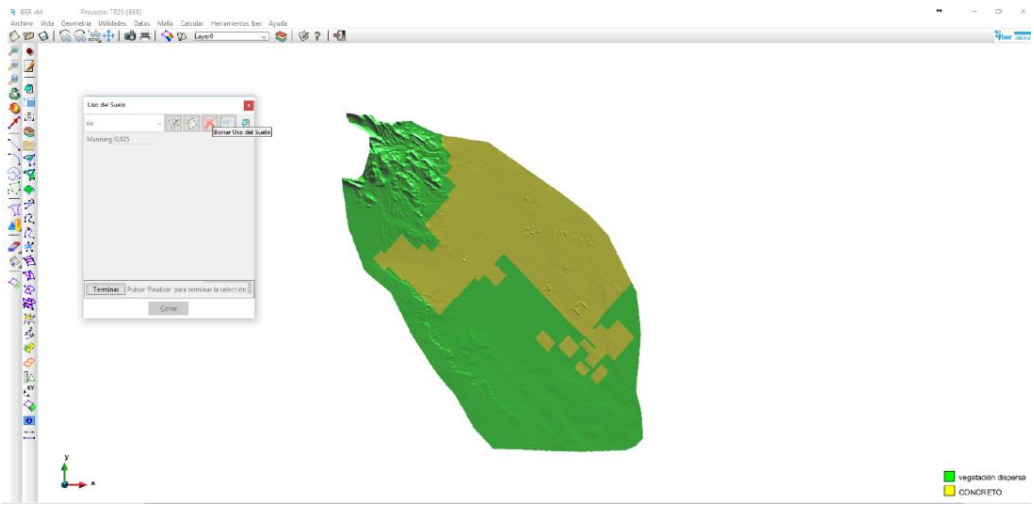


Figura vi.9 Ingreso del hietograma a IBER. (El tiempo (eje de las abscisas) en segundos, y la intensidad (eje de las ordenadas) en mm/hora)

El modelo de pérdidas de este estudio está basado en el método del número de curva, el cual asigna un valor en función de la condición hidrológica de la cuenca a modelar. En este caso se aplicó número de curva 69 para zona no urbana y 89 para la zona urbana.

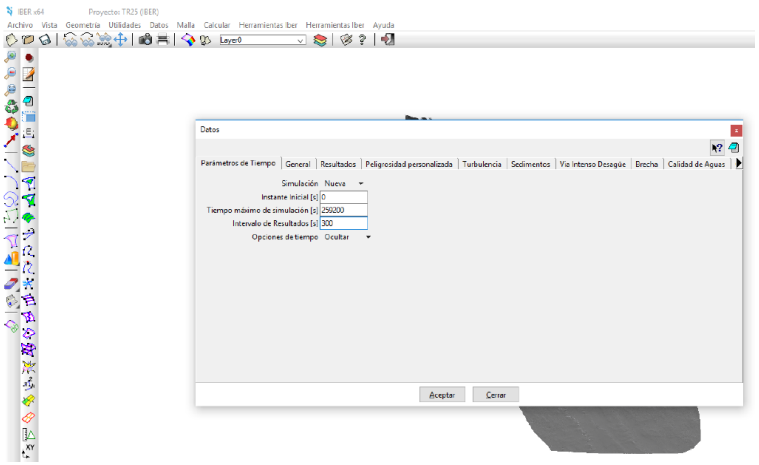


En cuanto a la hidráulica se asignaron las condiciones de rugosidad o número de Manning para las zonas a estudiar; para la zona urbana se aplicó concreto y para la zona no urbana vegetación dispersa.



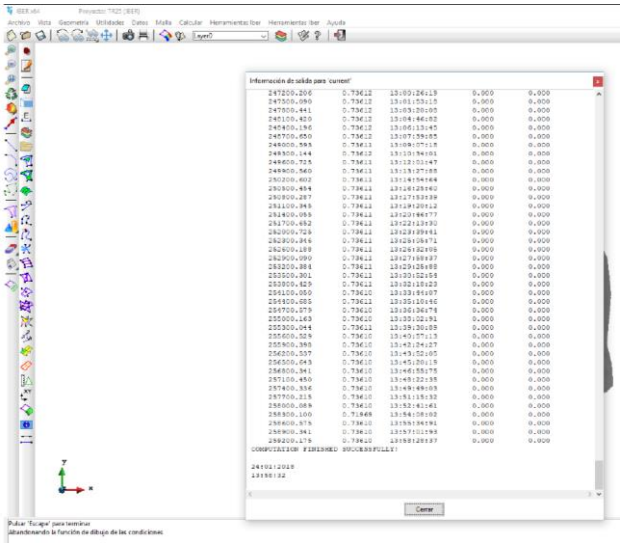
vii. Simulación

En esta etapa se introdujo la secuencia temporal o control del proceso de simulación. En este estudio se aplicó un tamaño de paso de 300 s con una duración en tiempo máquina de 622 000 segundos. Es decir, 3 días de simulación con intervalos de cálculo cada 5 min. Este tiempo permite ver la relajación hidrológica de la cuenca.

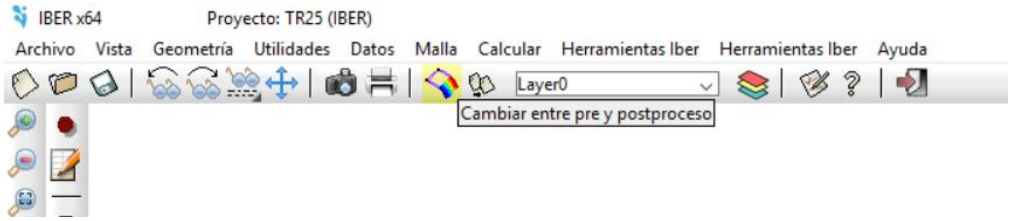


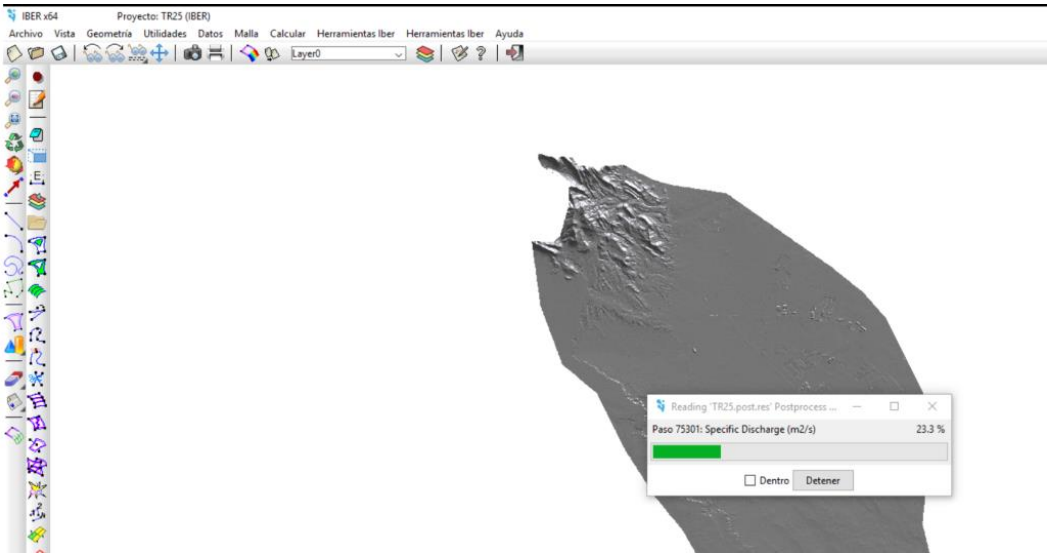
viii. Post-Proceso y visualización.

La corrida concluye una vez realizados todos los pasos o intervalos de modelación.

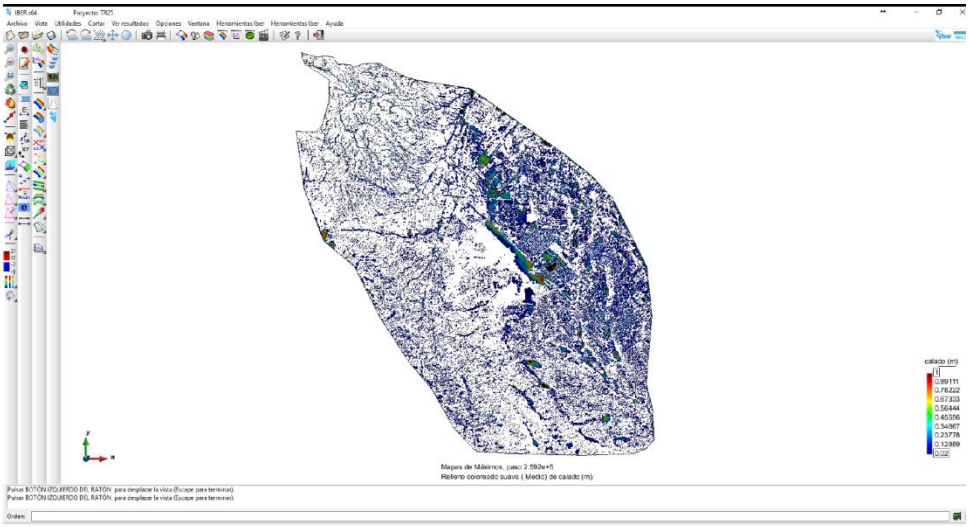


Se procede a analizar los resultados en la parte de Post proceso.

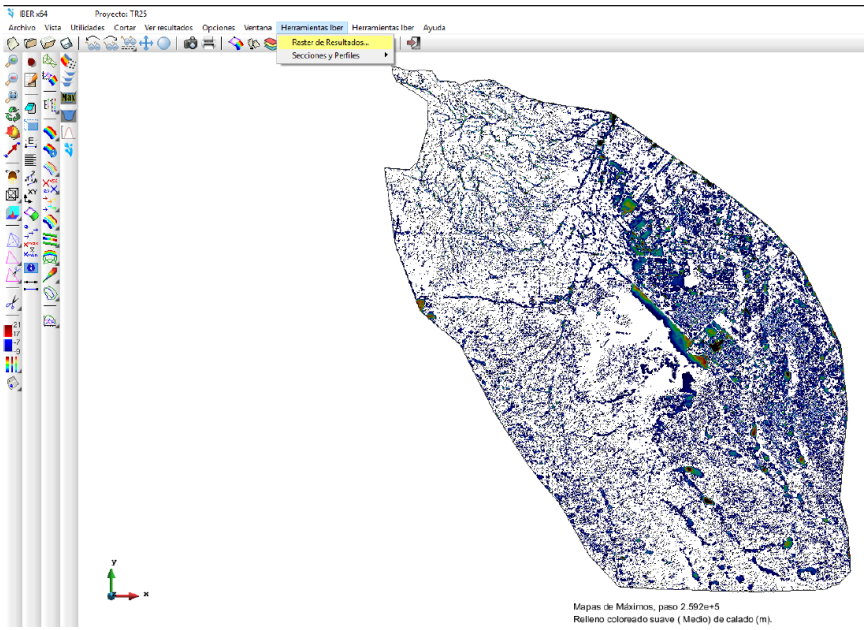




Se analiza la información del modelo resultante.



Se exportan los resultados para poderlos gestionar en diversos softwares de información geográfica.



III. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA DE SUBCUENCAS

El análisis hidráulico del volumen total se calculó para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500. Posteriormente se re proyectaron a Lambert Cónica Conformal (LCC) y se clasificaron conforme al esquema de colores proporcionado por el CENAPRED:

Los resultados de este análisis muestran los tirantes máximos, velocidades máximas y severidad correspondientes a la peligrosidad asociada con cada periodo de retorno.

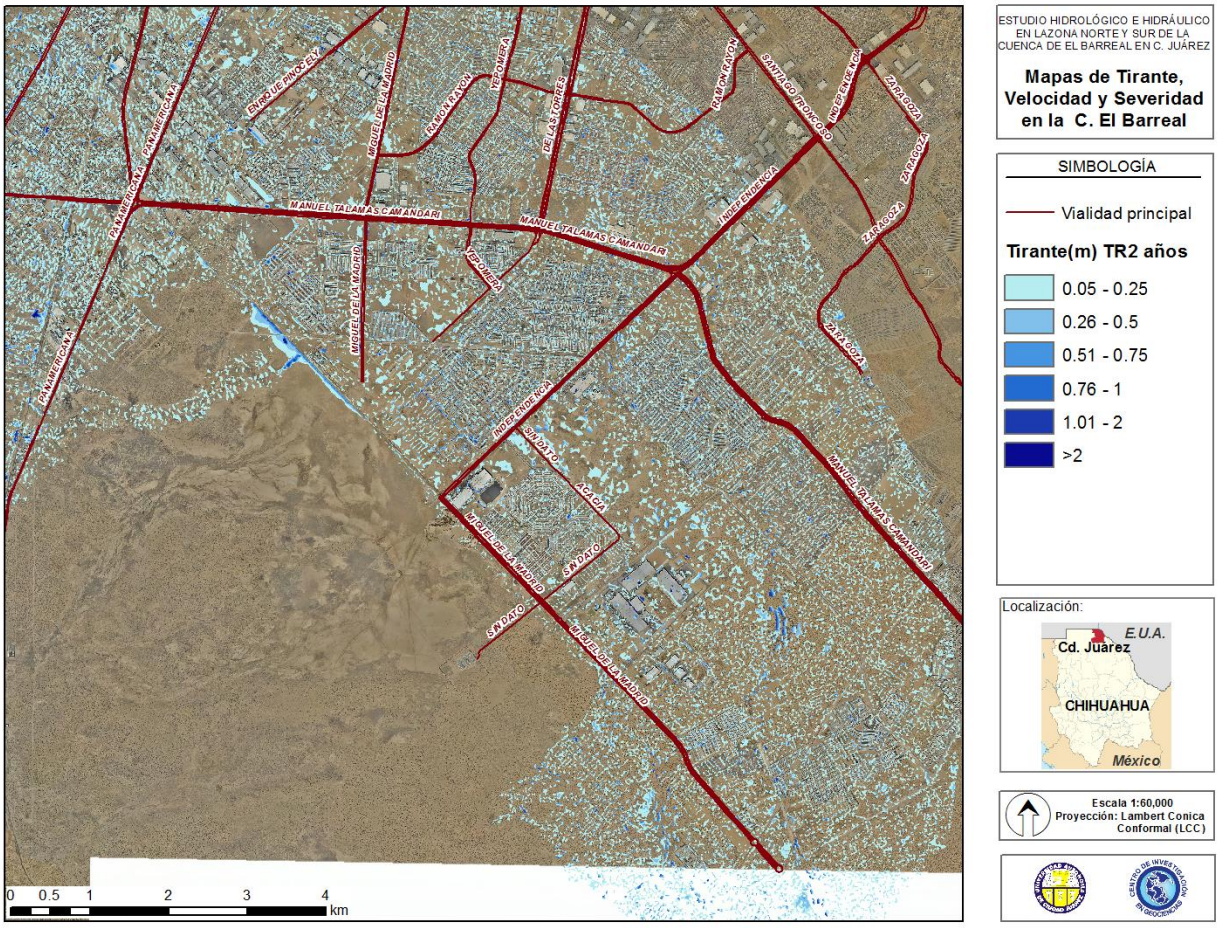


Figura III.1.1. Tirante a TR de 2 años.

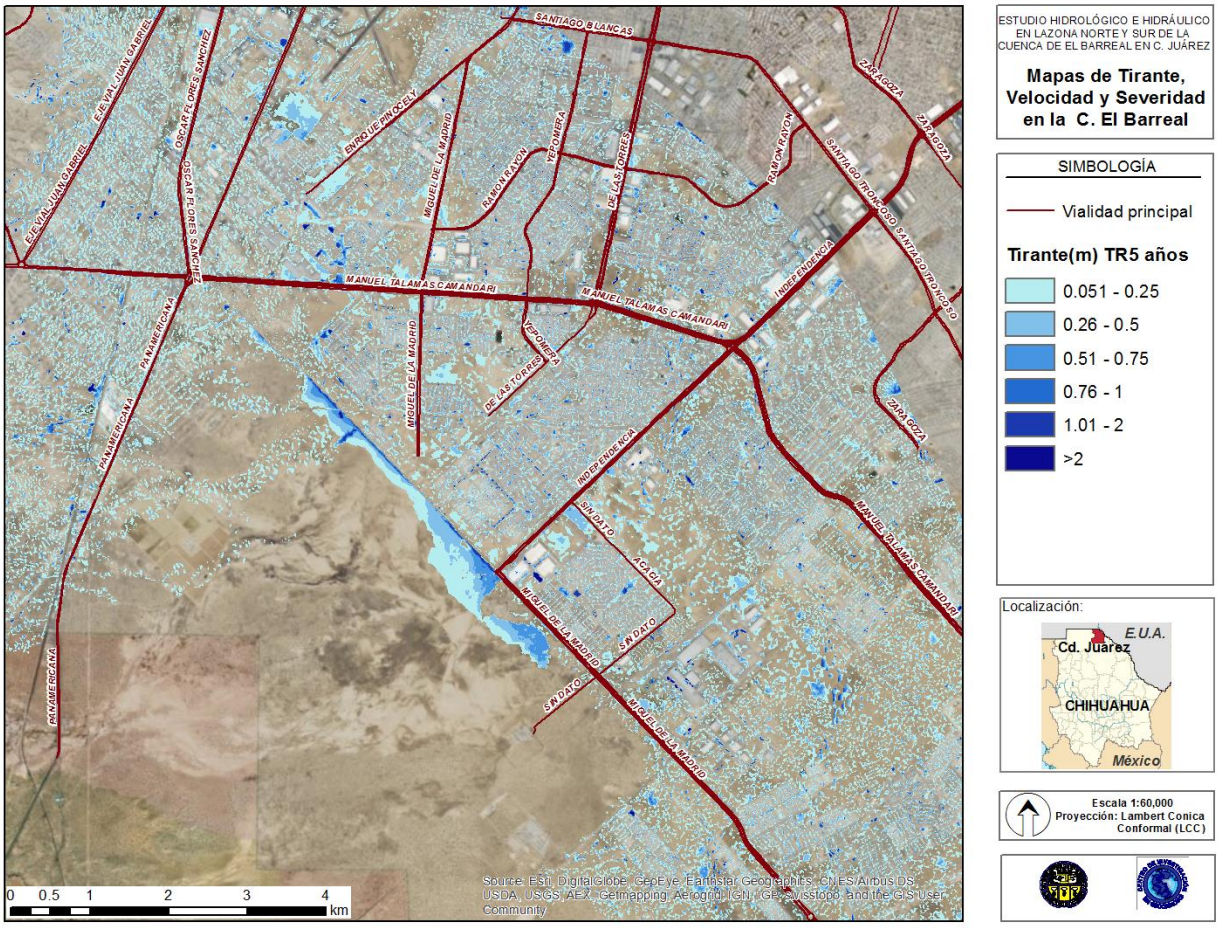


Figura III.1.2. Tirante a TR de 5 años.

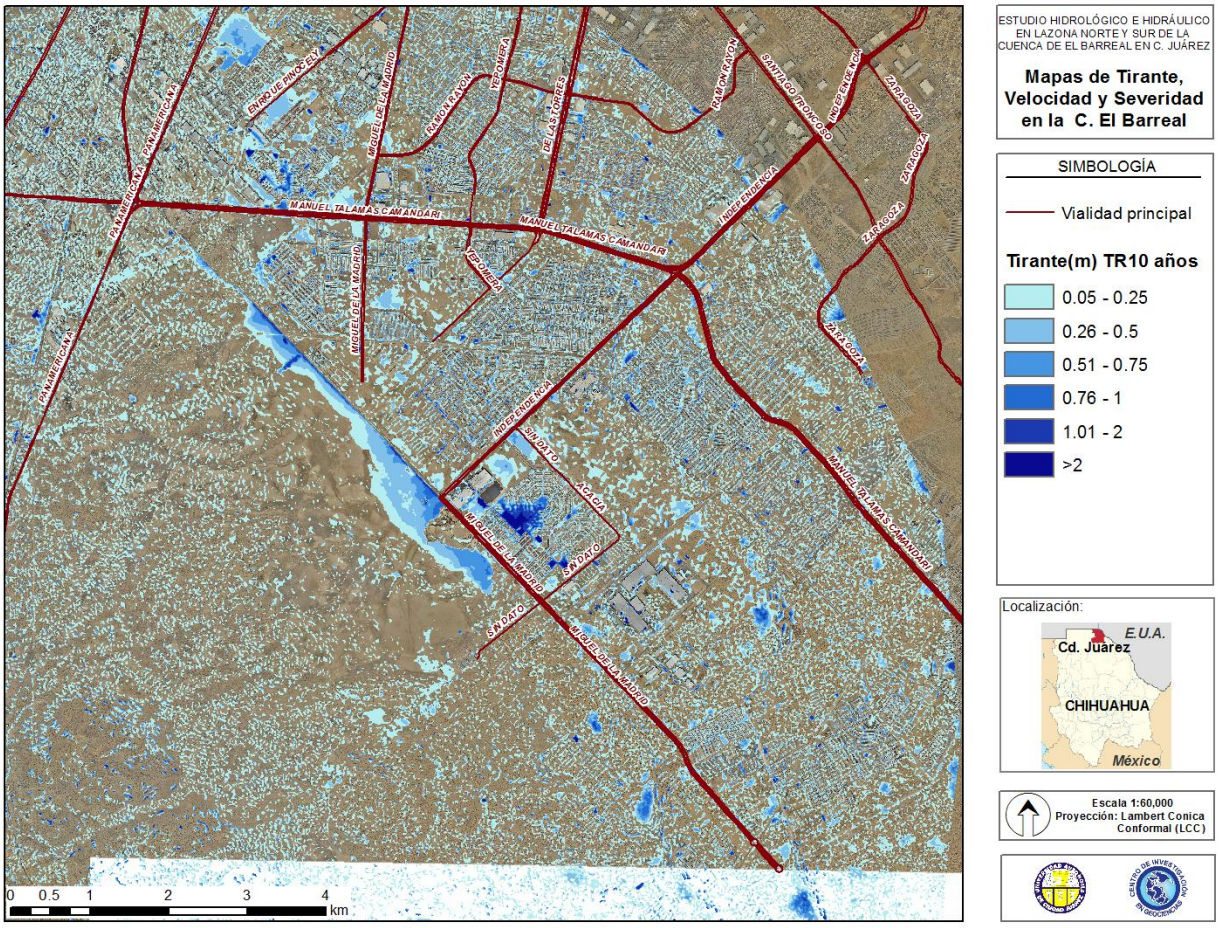


Figura III.1.3. Tirante a TR de 10 años.

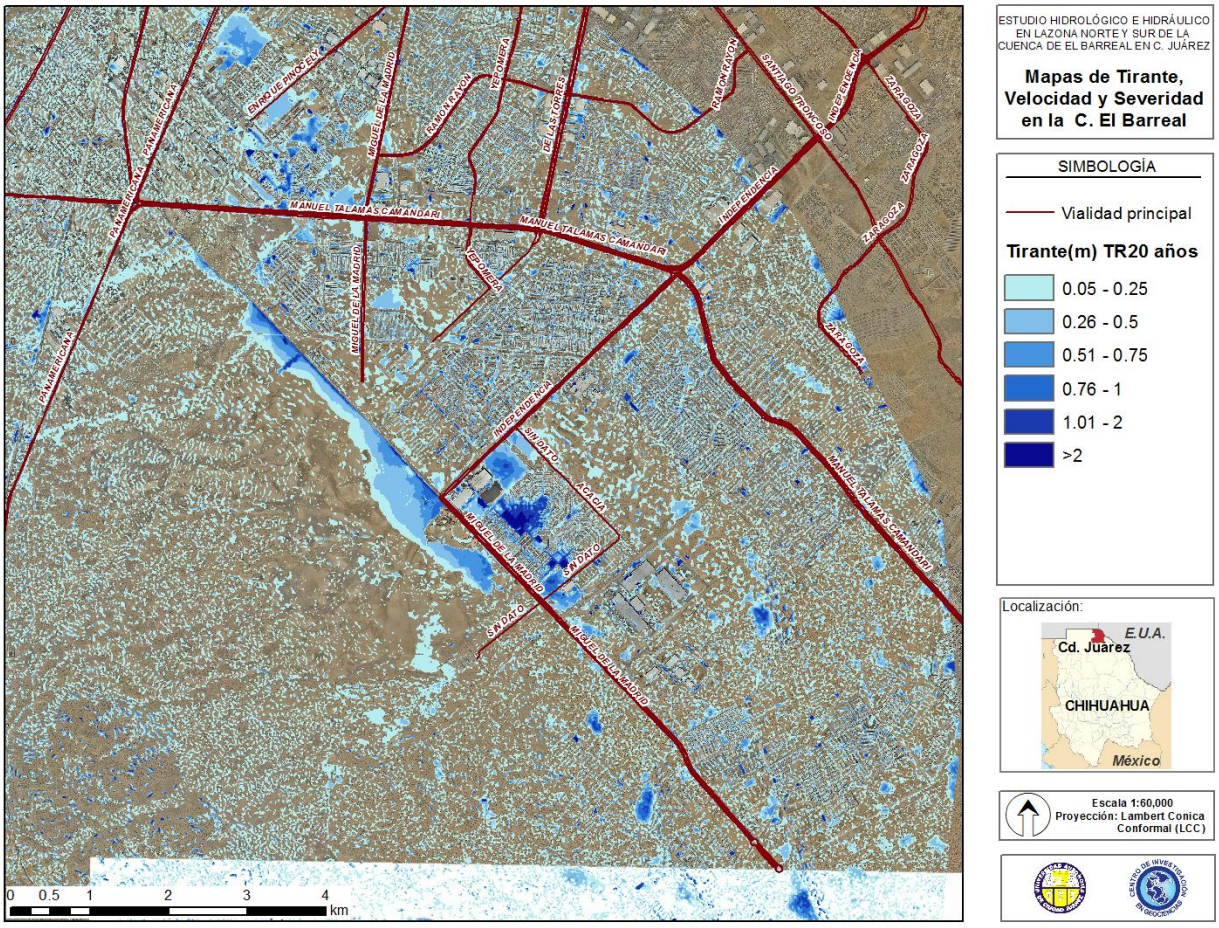


Figura III.1.4. Tirante a TR de 20 años.

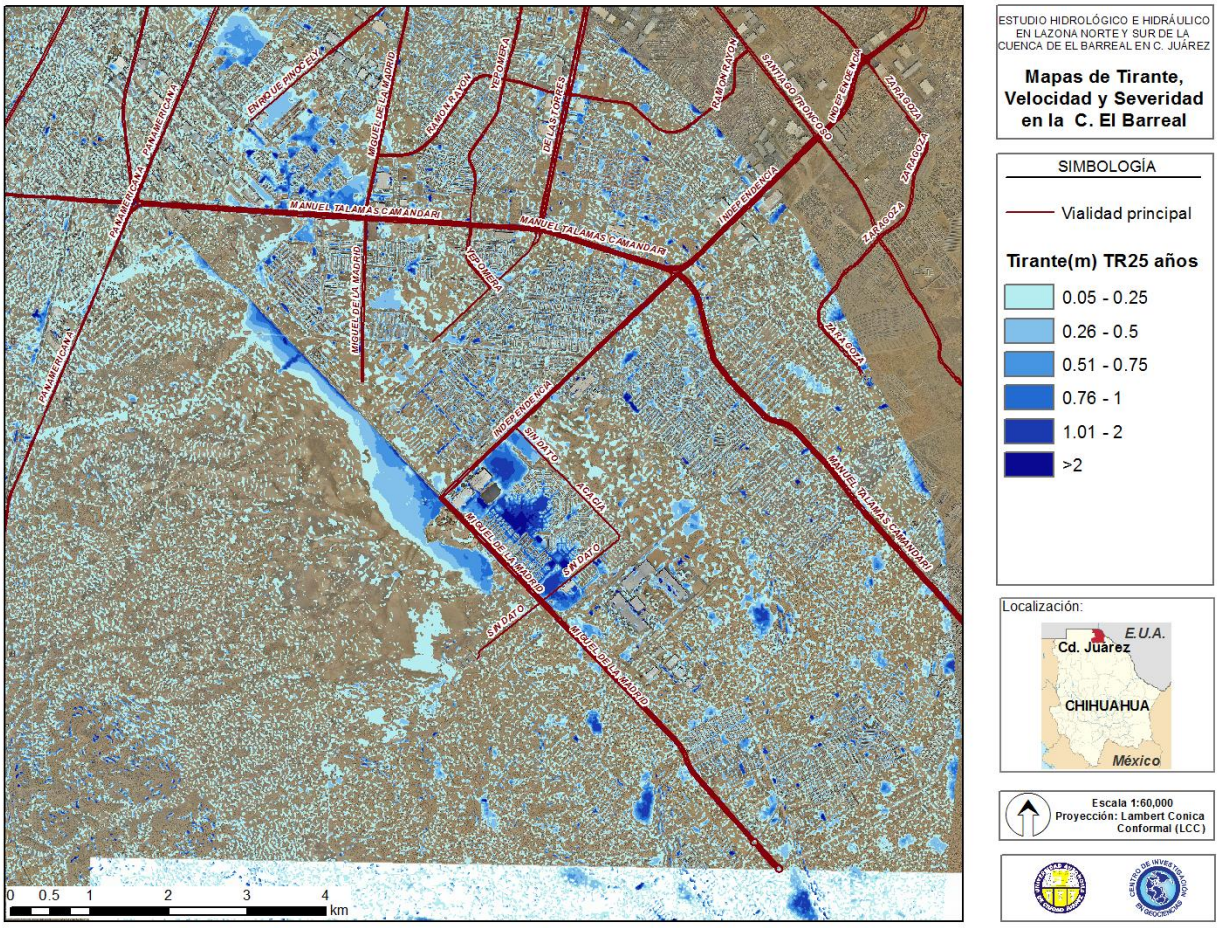


Figura III.1.4. Tirante a TR de 25 años.

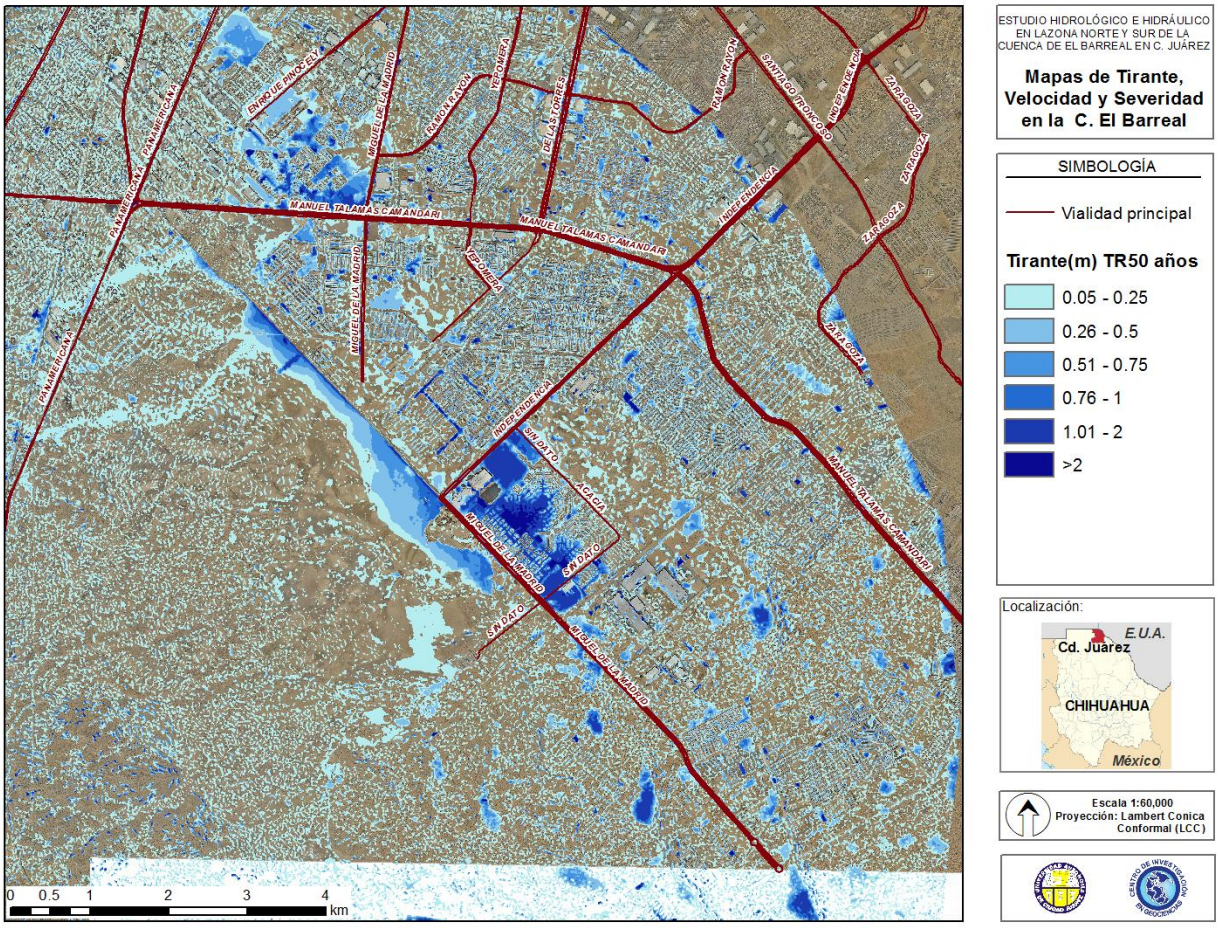


Figura III.1.5. Tirante a TR de 50 años.

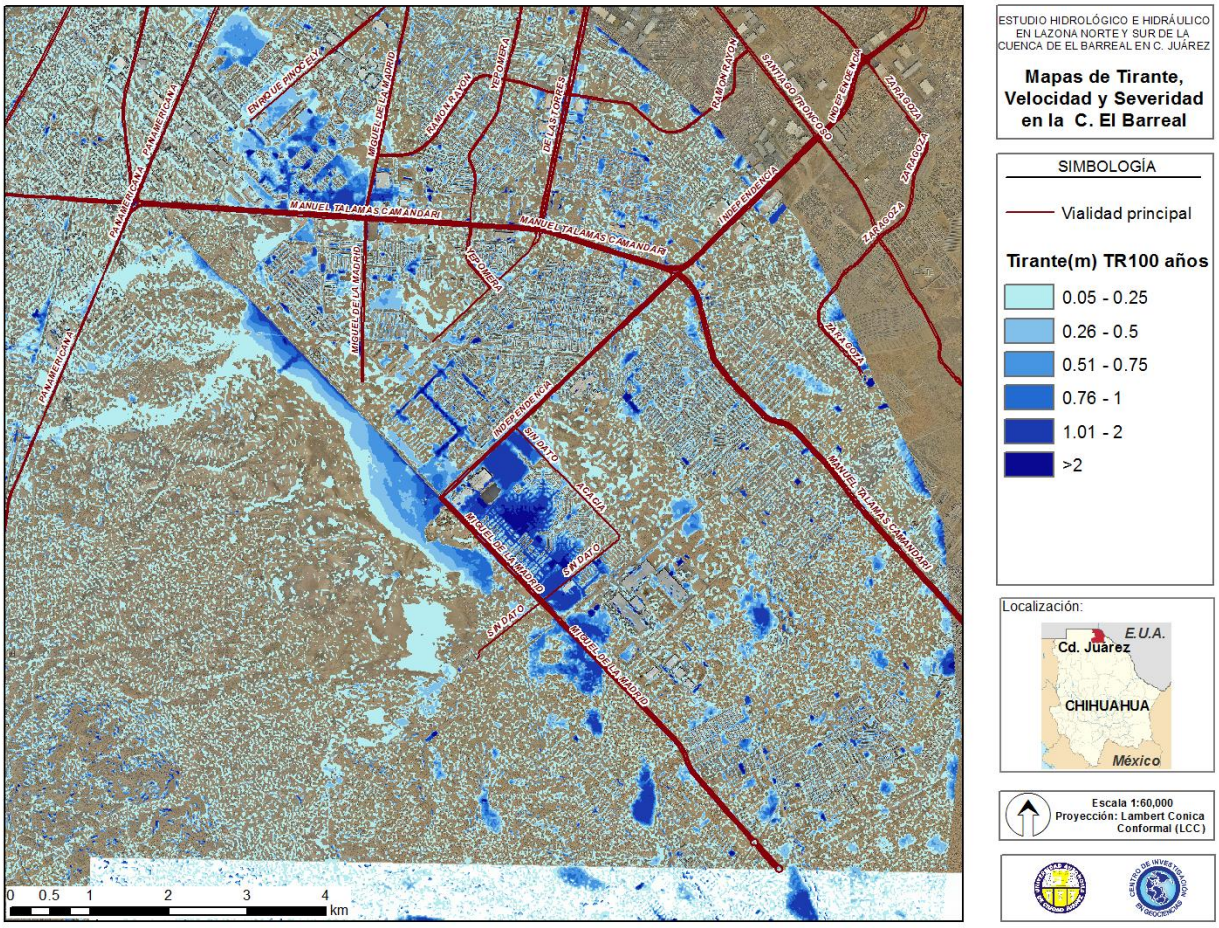


Figura III.1.6. Tirante a TR de 100 años.

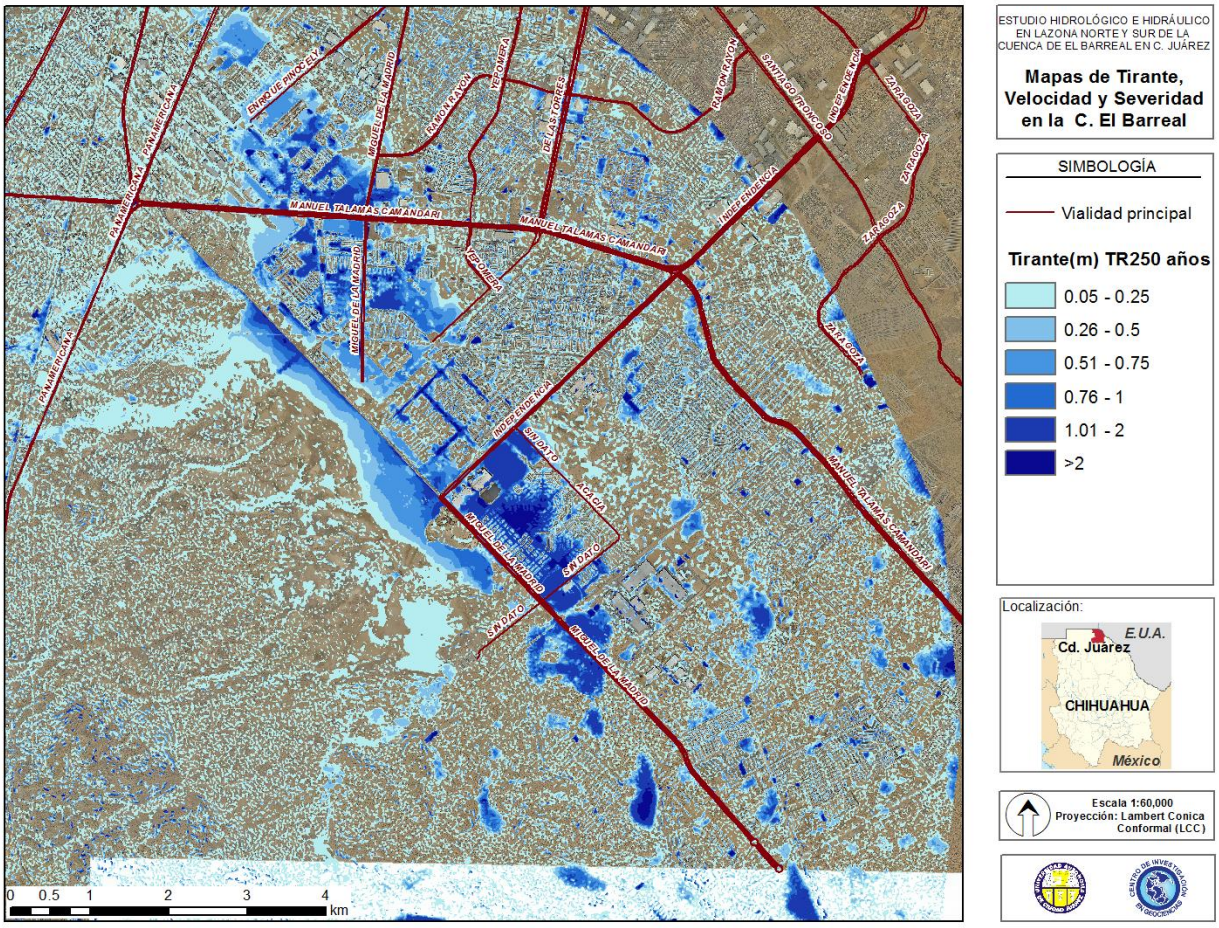


Figura III.1.7. Tirante a TR de 250 años.

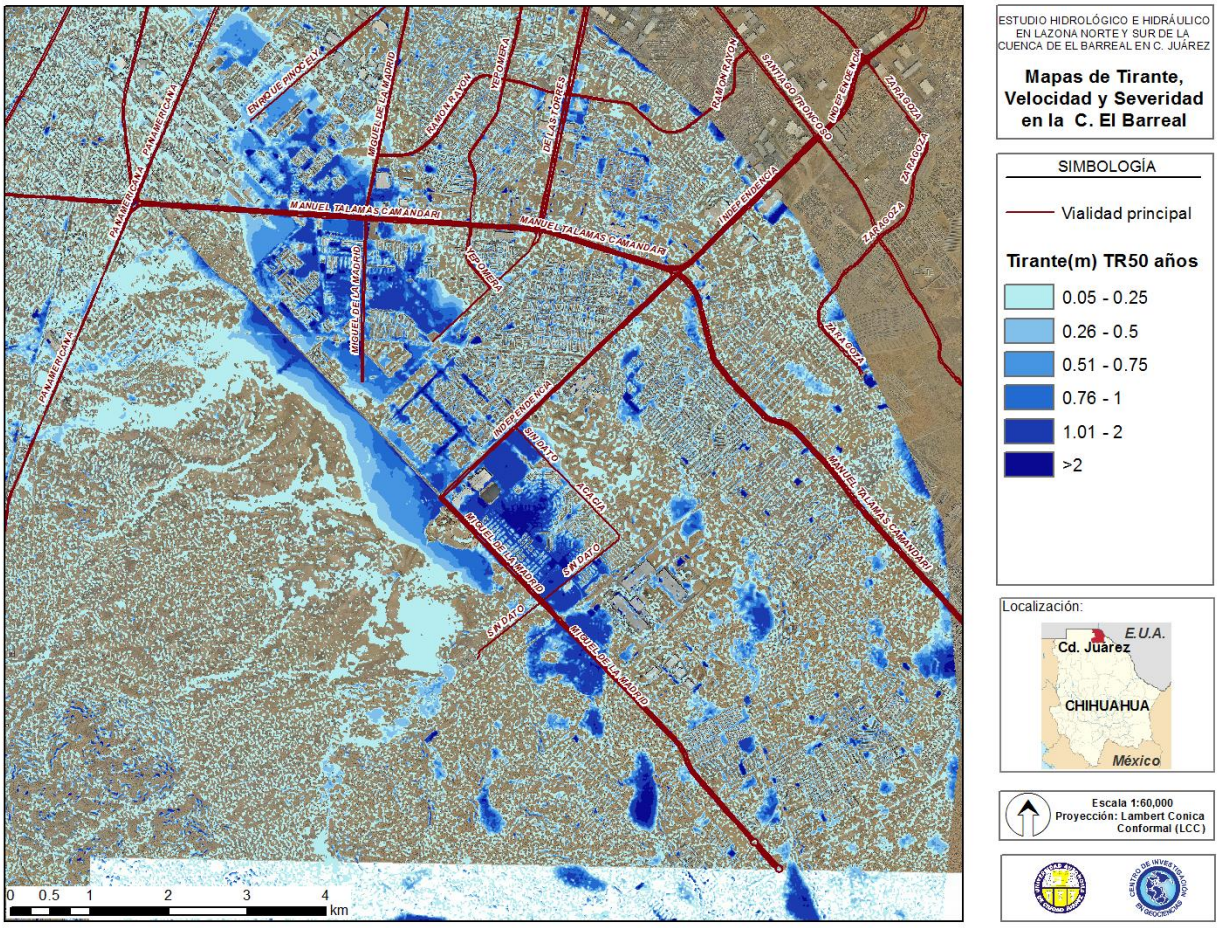


Figura III.1.7. Tirante a TR de 500 años.

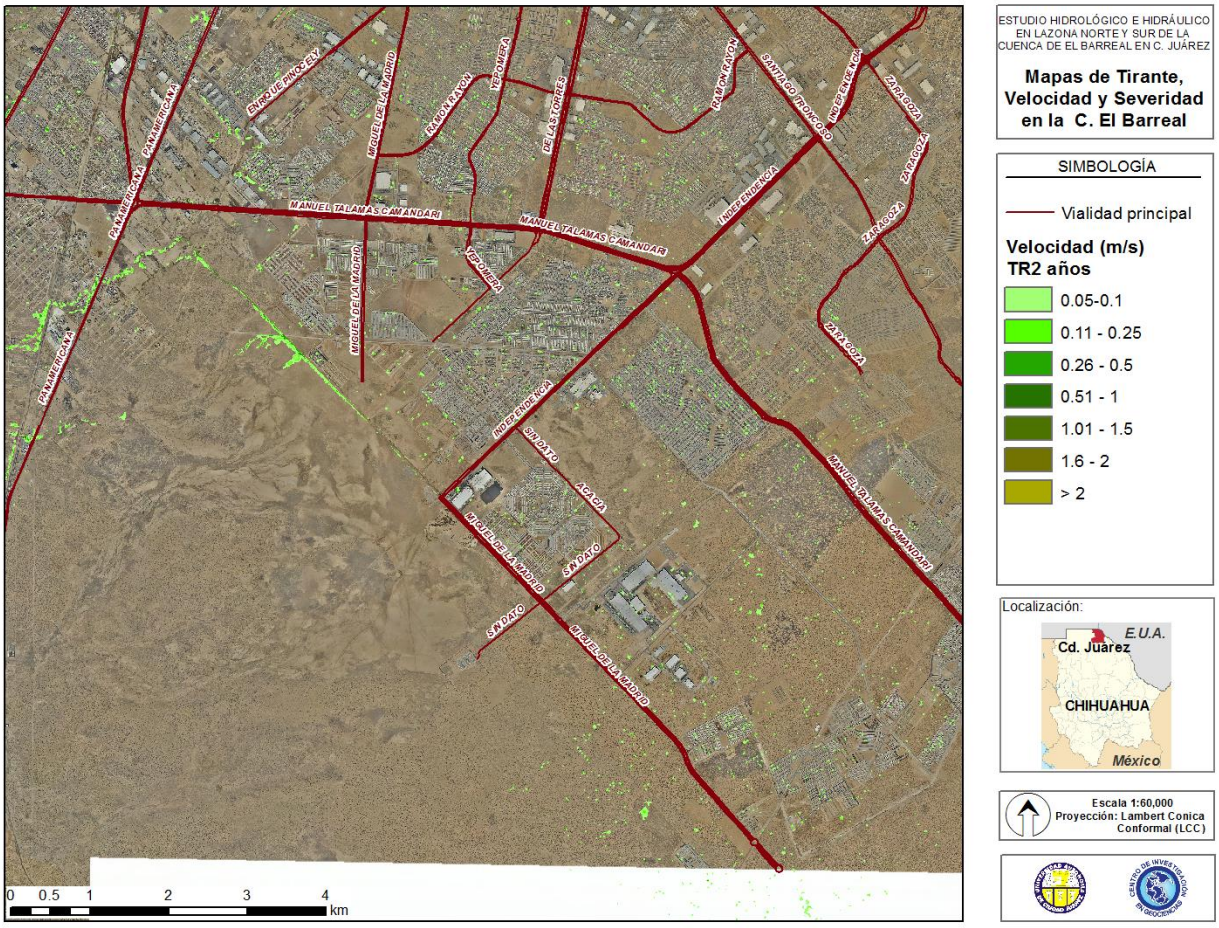


Figura III.1.8. Velocidad máxima a TR de 2 años.

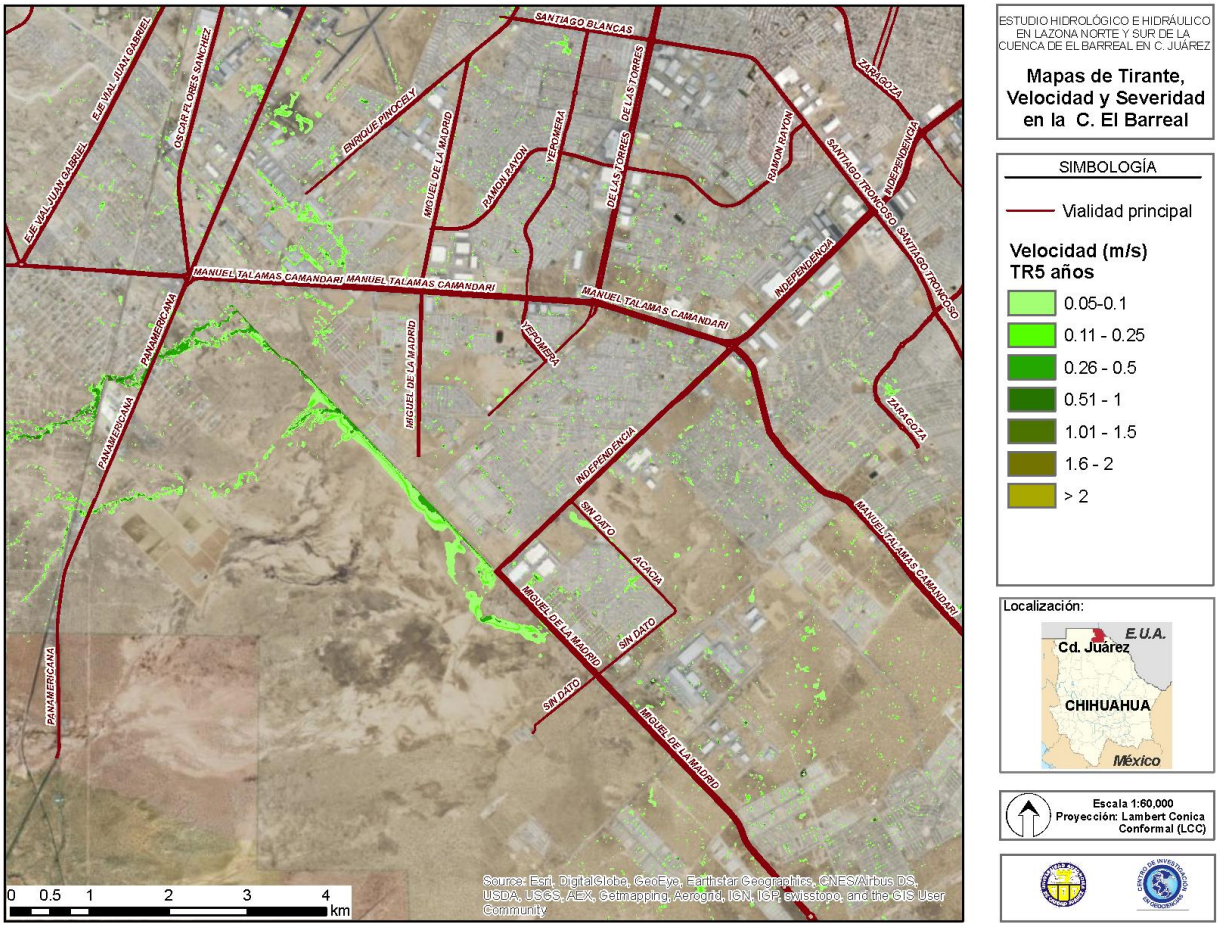


Figura III.1.9. Velocidad máxima a TR de 5 años.

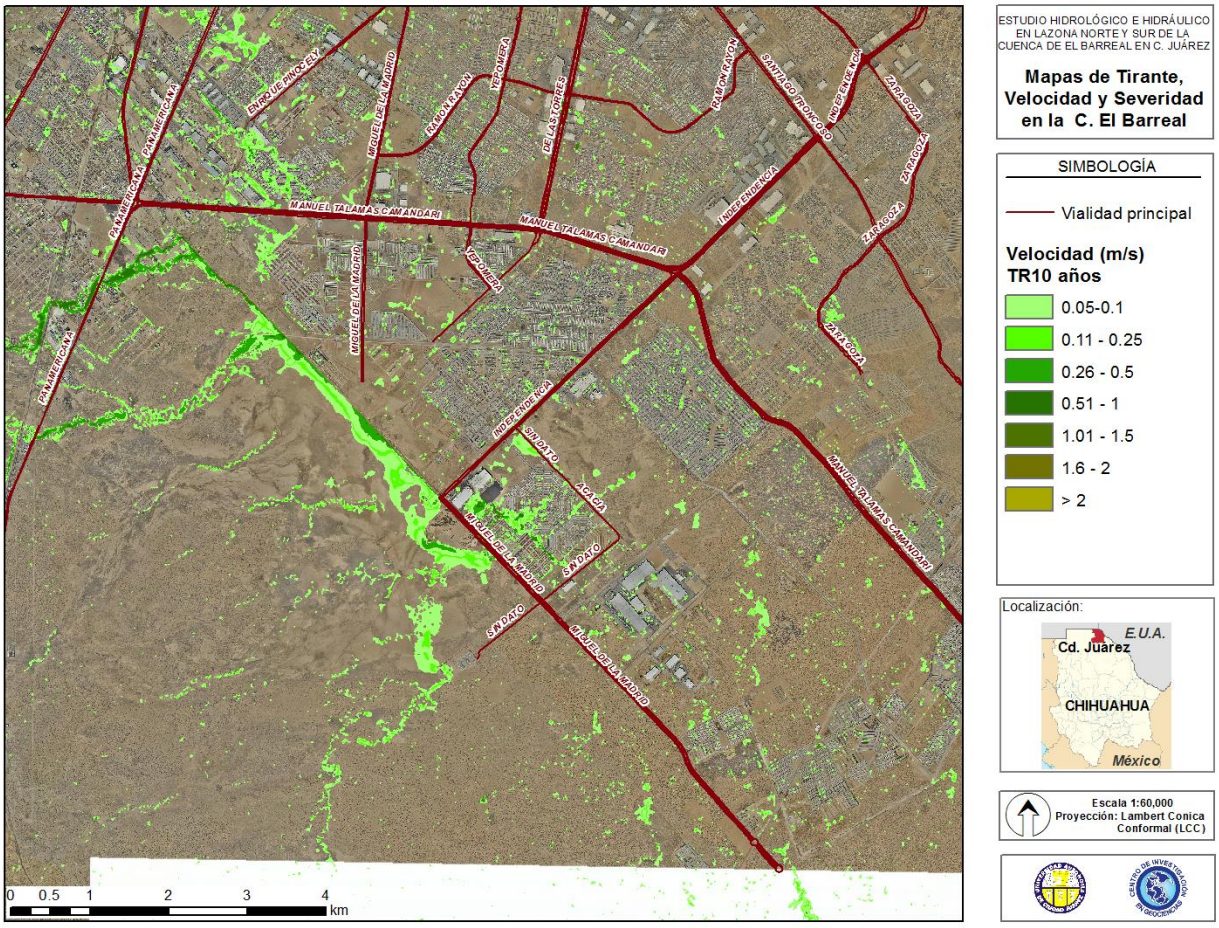


Figura III.1.10. Velocidad máxima a TR de 10 años.

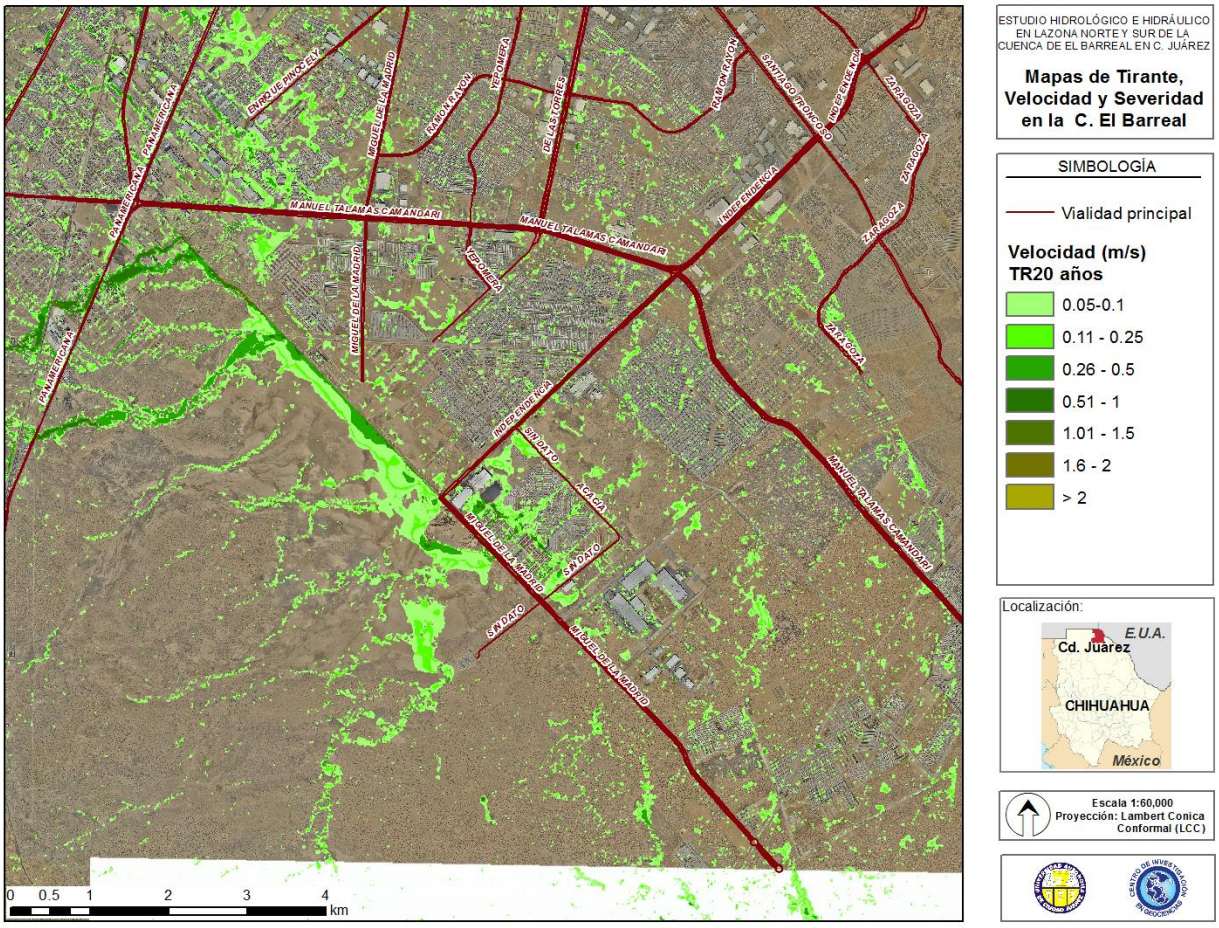


Figura III.1.11. Velocidad máxima a TR de 20 años.

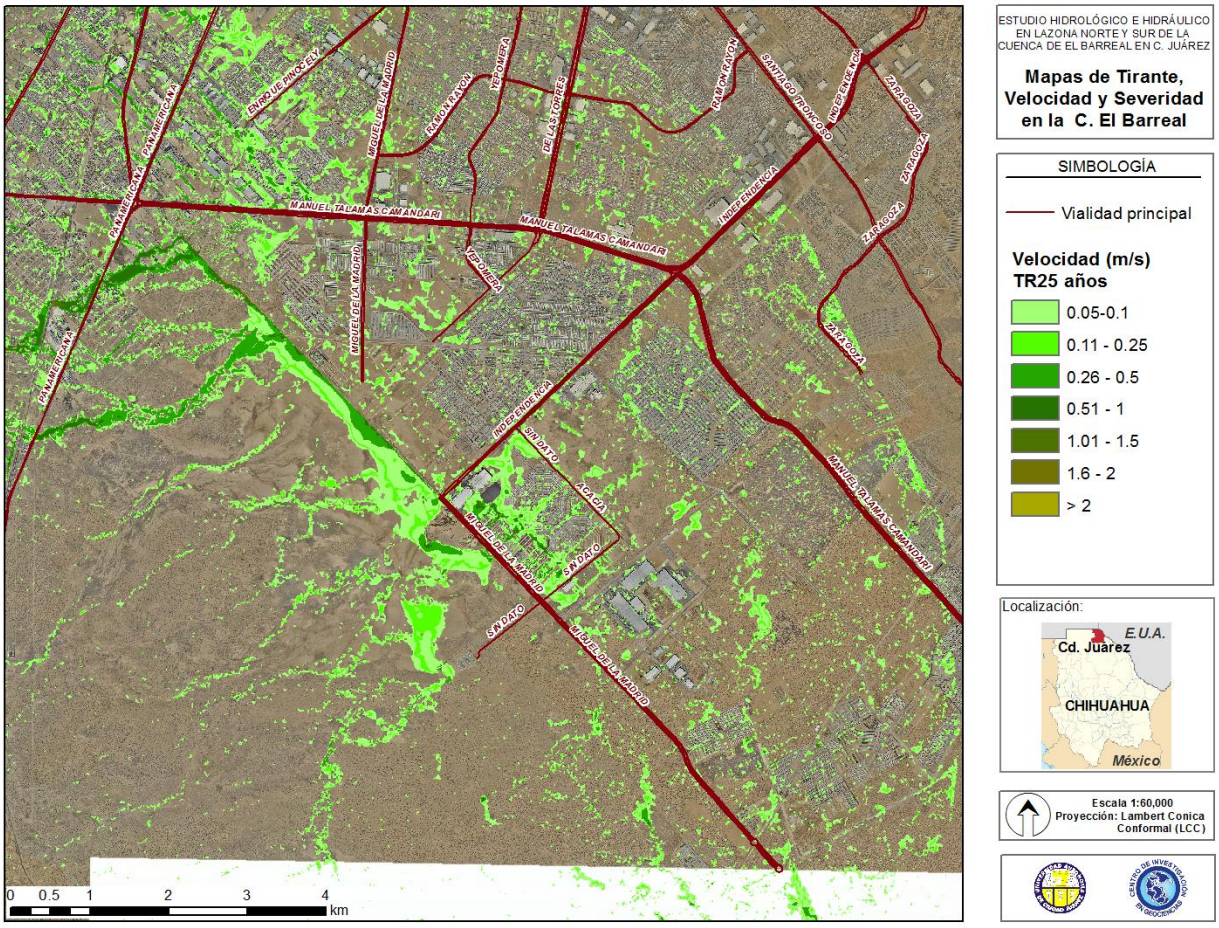


Figura III.1.11. Velocidad máxima a TR de 25 años.

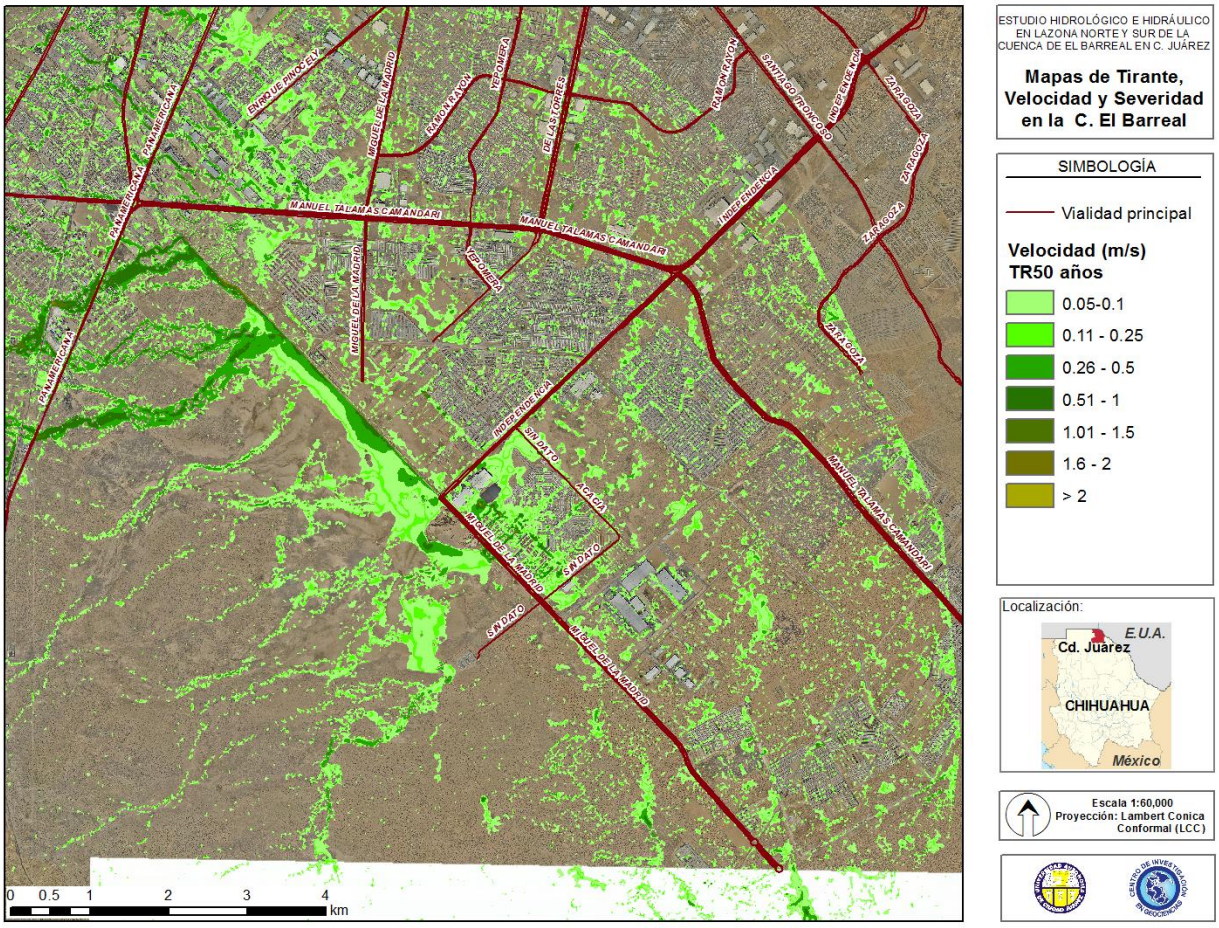


Figura III.1.12. Velocidad máxima a TR de 50 años.

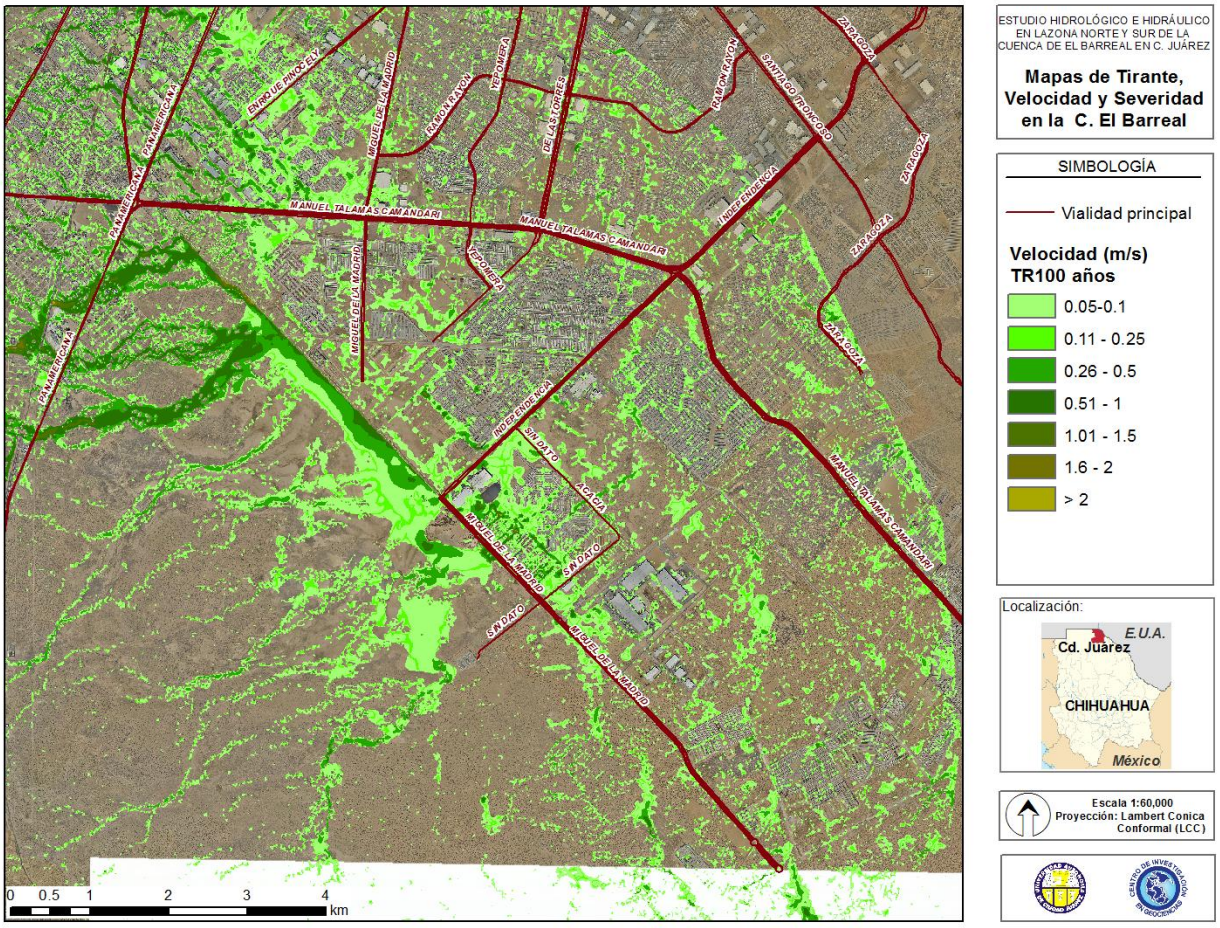


Figura III.1.13. Velocidad máxima a TR de 100 años.

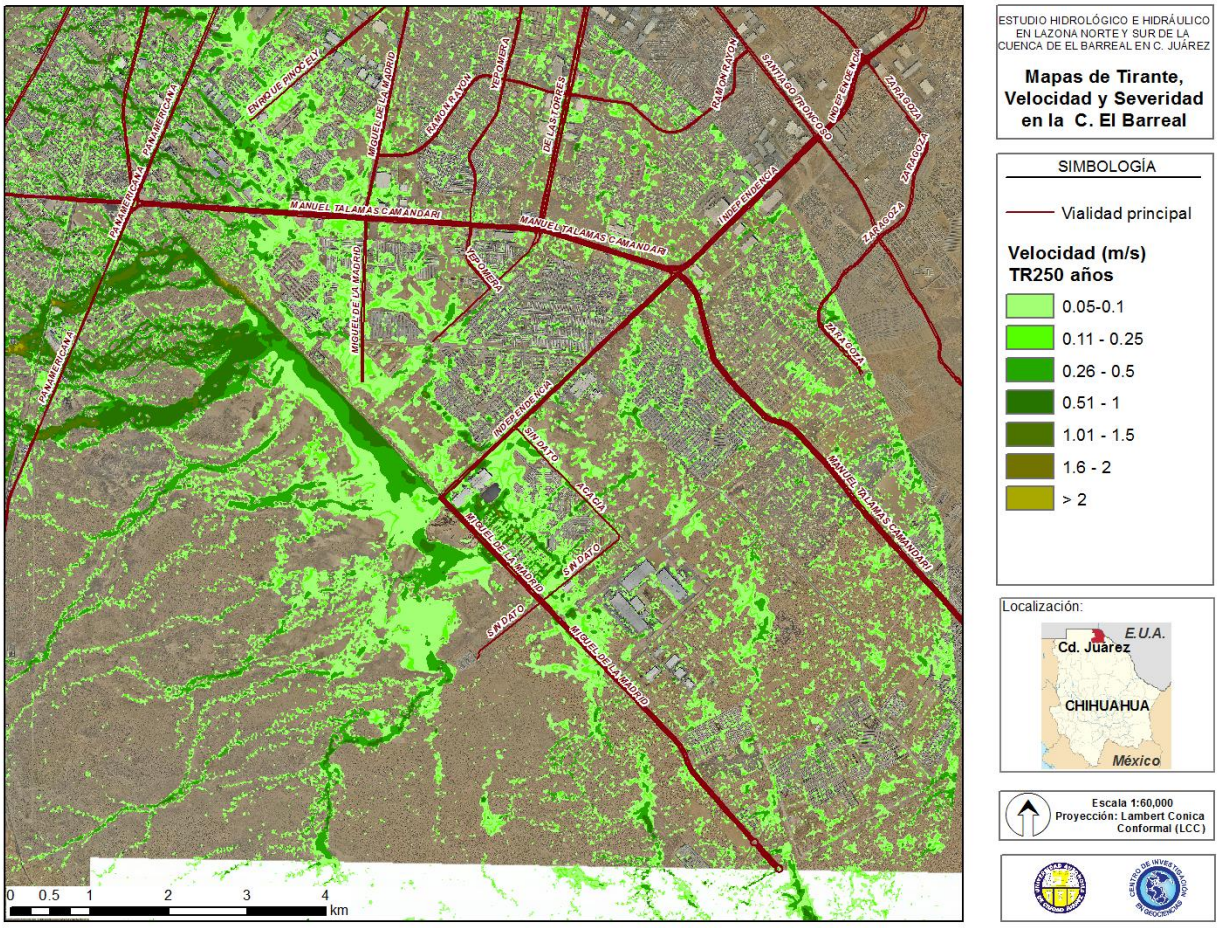


Figura III.1.14. Velocidad máxima a TR de 250 años.

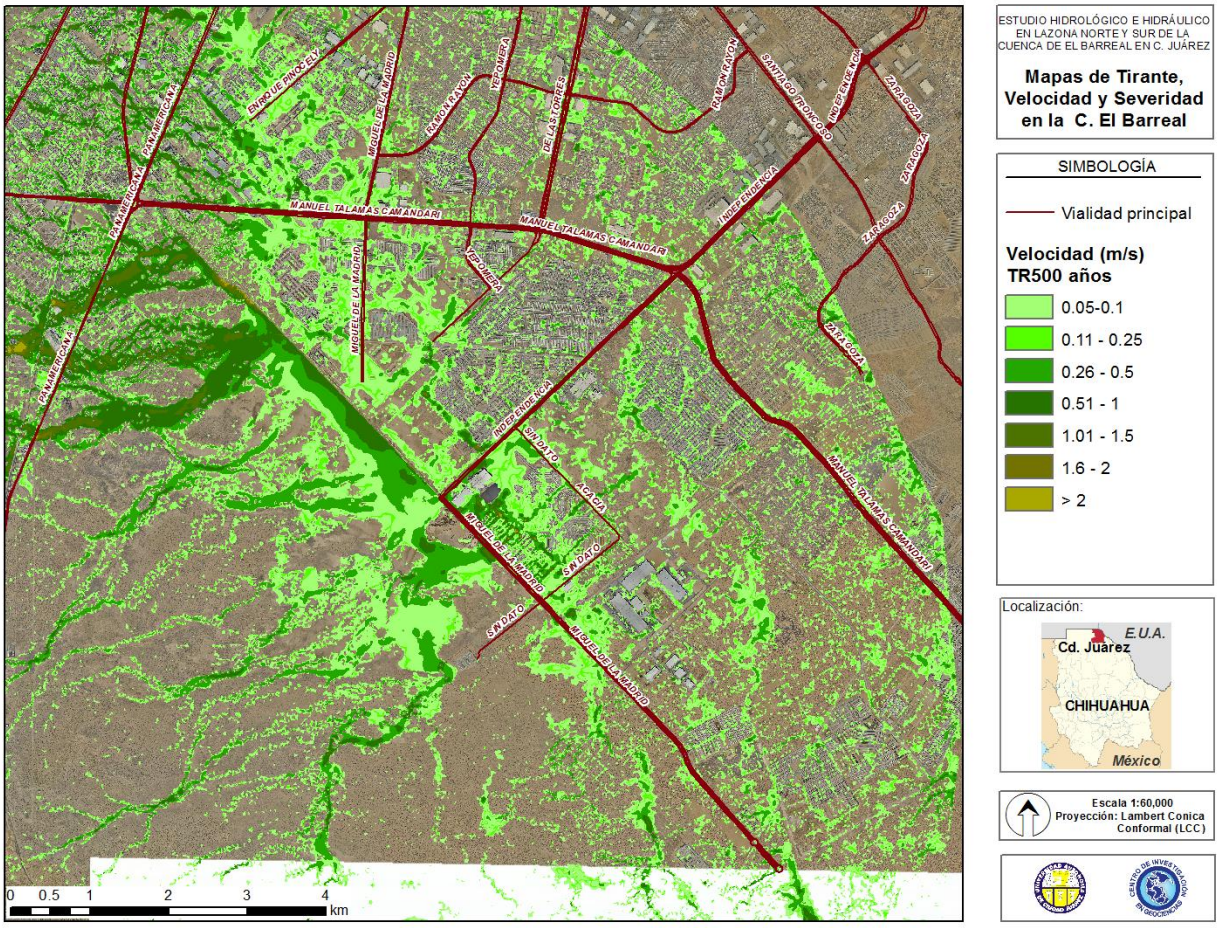


Figura III.1.14. Velocidad máxima a TR de 500 años

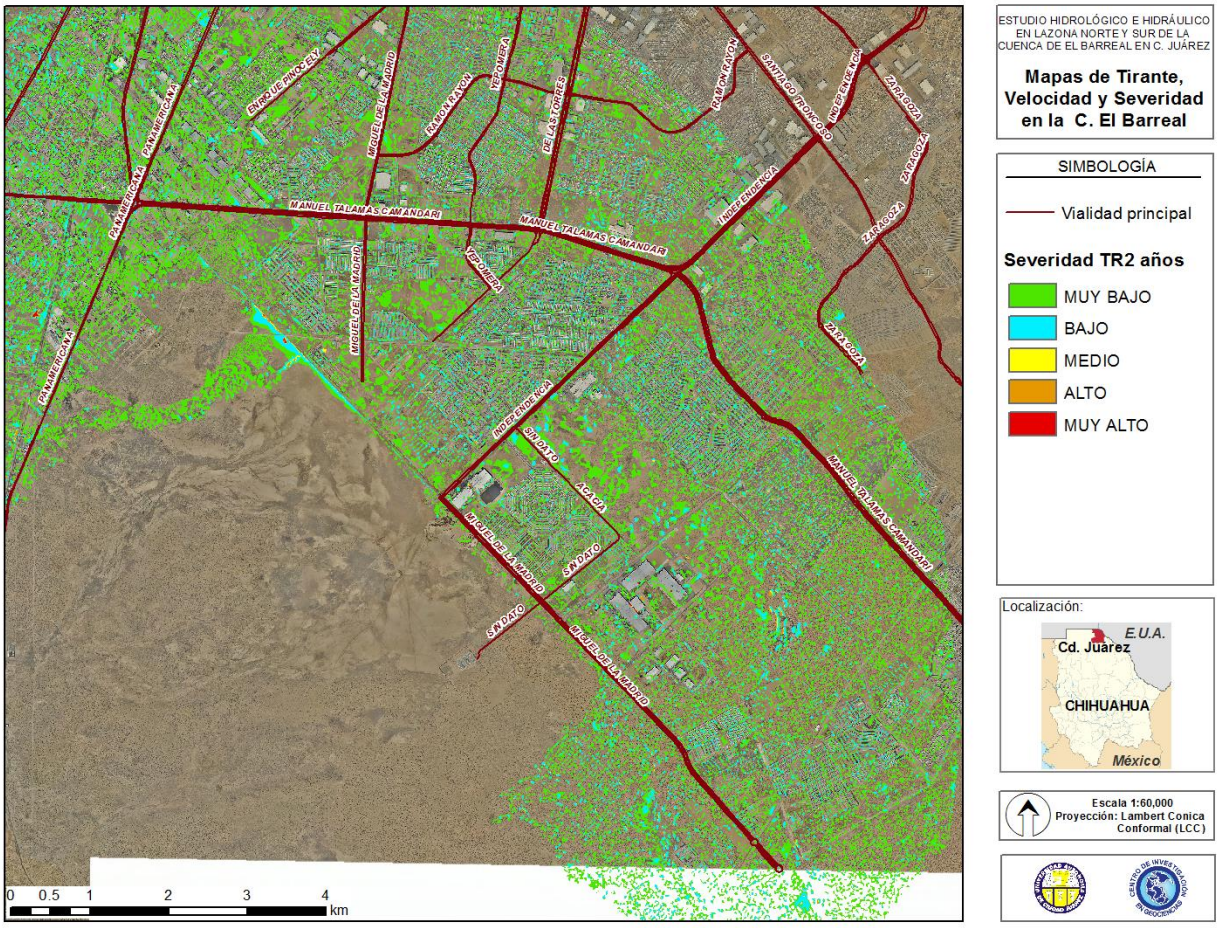


Figura III.1.15. Mapa de Severidad a TR de 2 años.

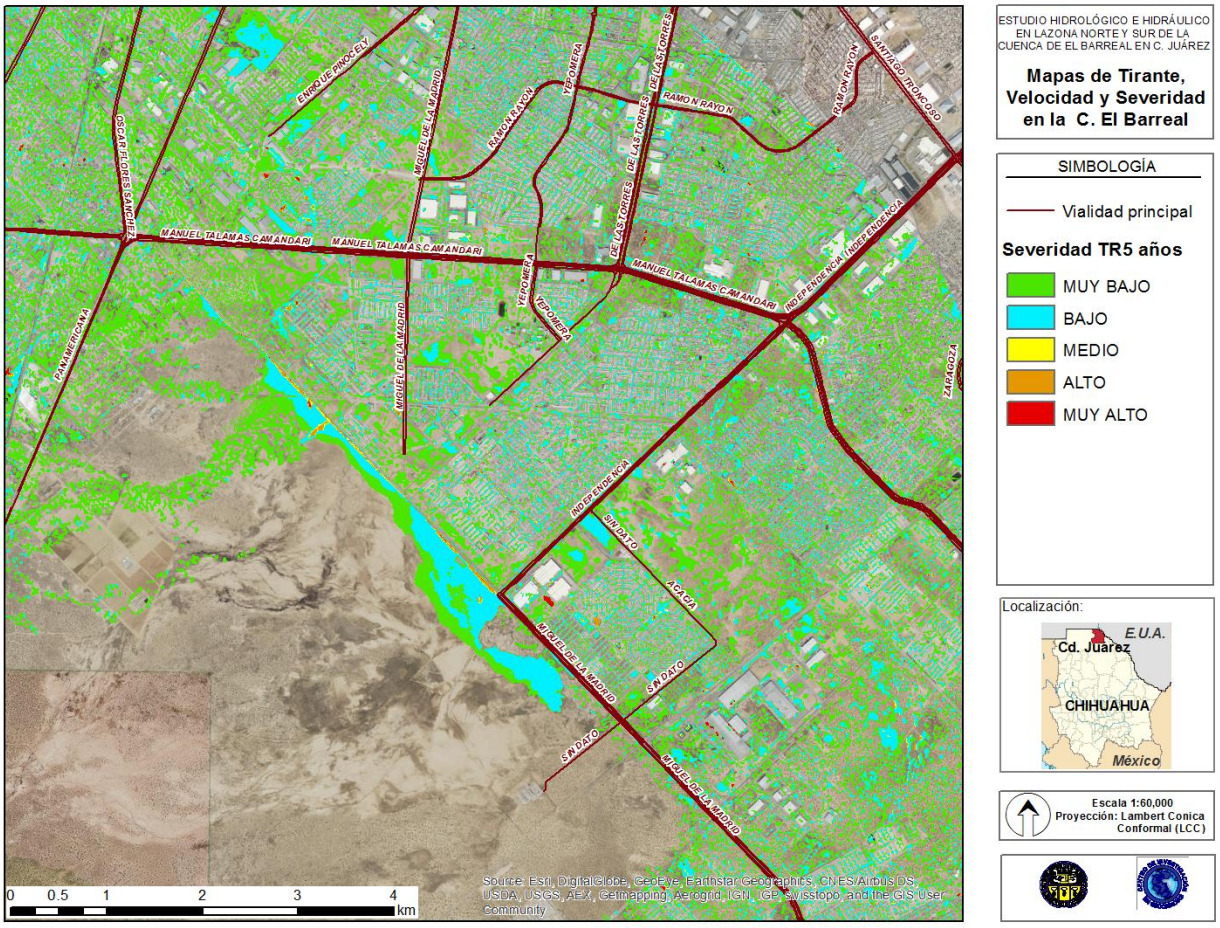


Figura III.1.16. Mapa de Severidad a TR de 5 años.

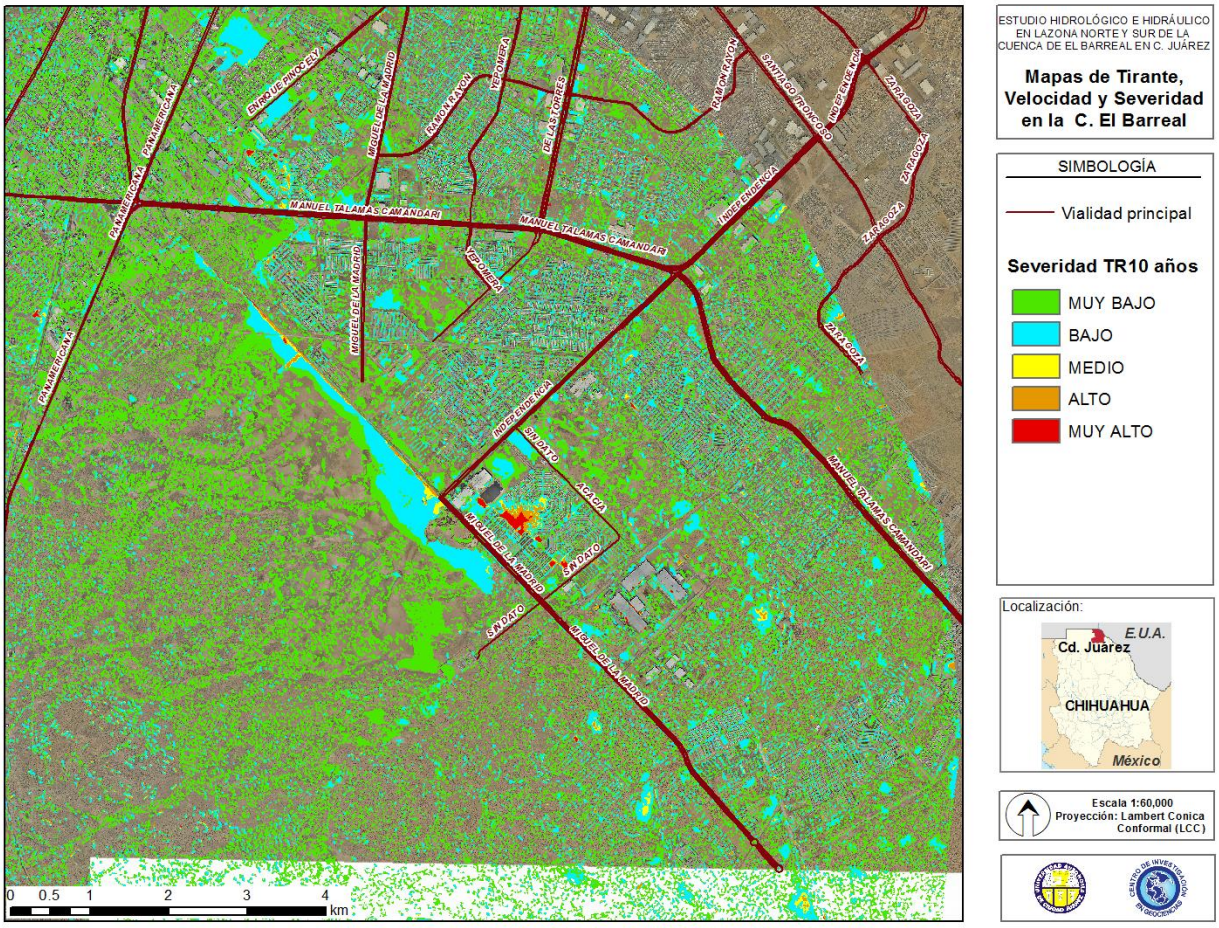


Figura III.1.17. Mapa de Severidad a TR de 10 años.

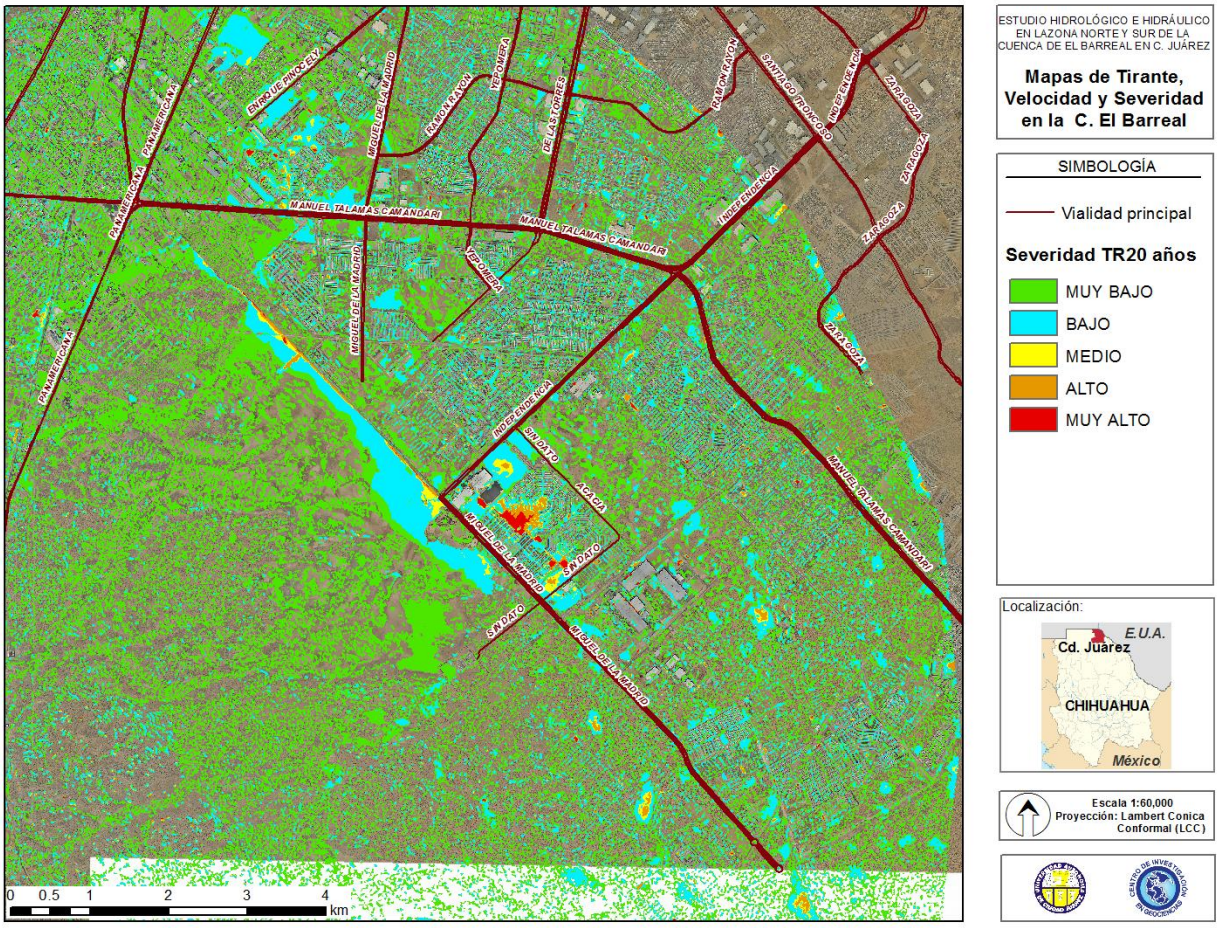


Figura III.1.18. Mapa de Severidad a TR de 20 años.

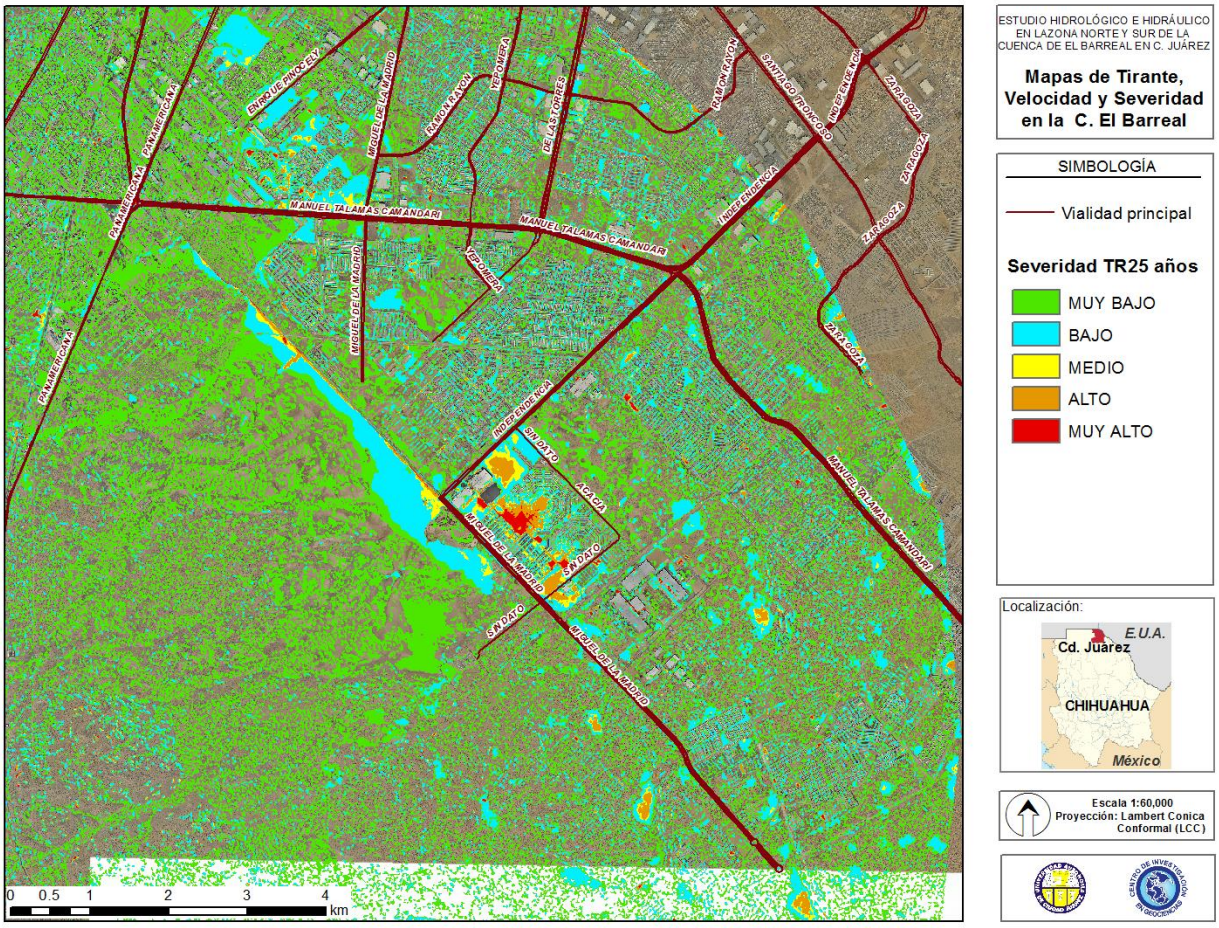


Figura III.1.18. Mapa de Severidad a TR de 25 años.

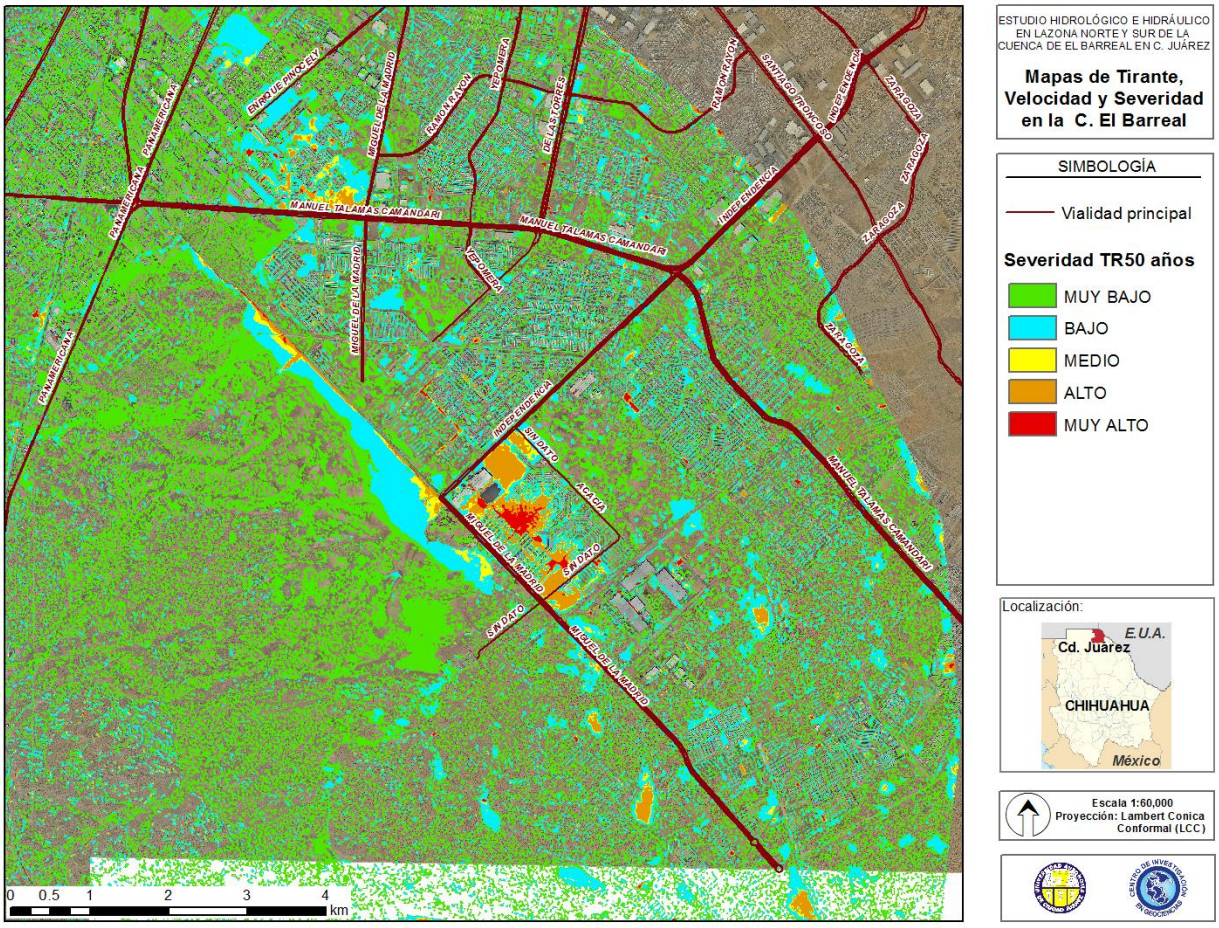


Figura III.1.19. Mapa de Severidad a TR de 50 años.

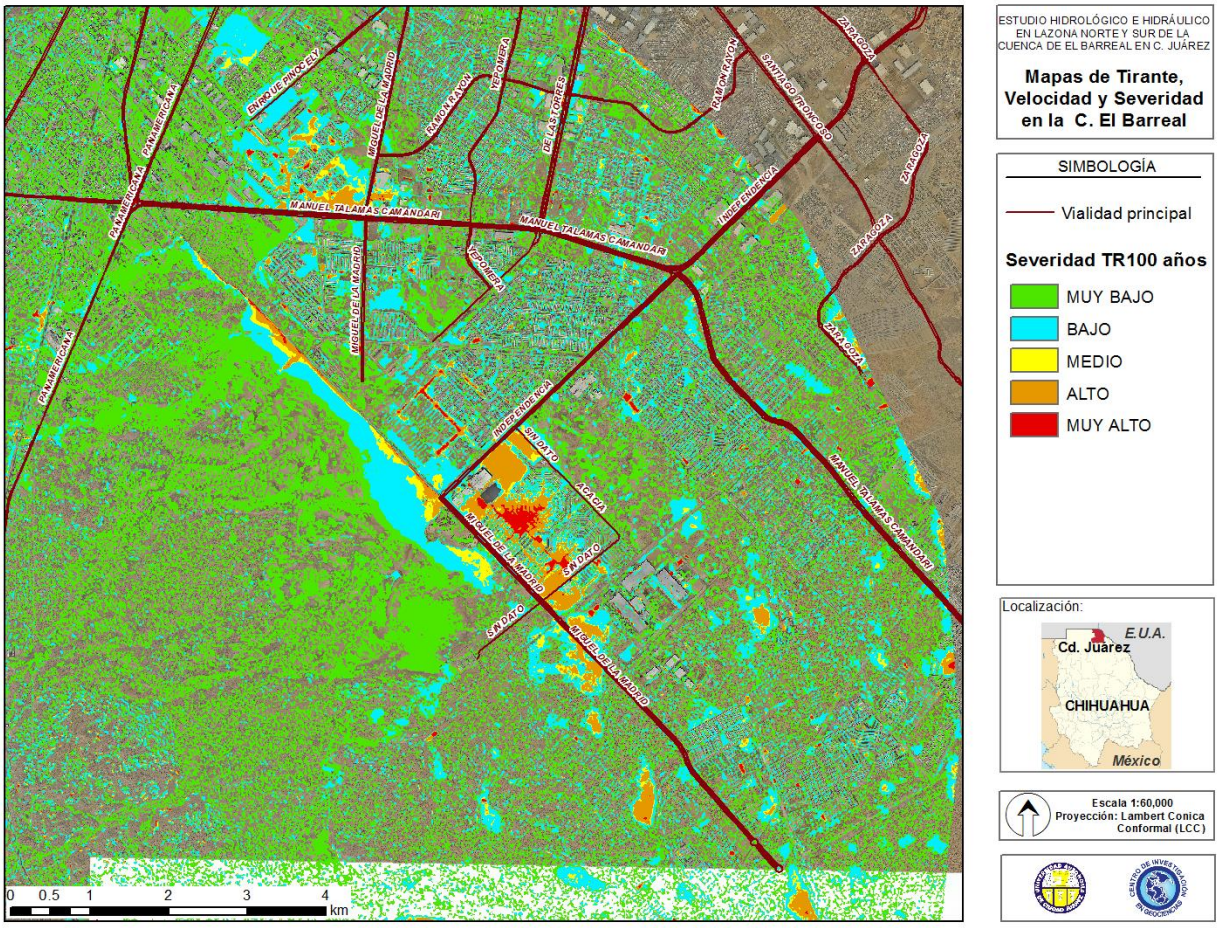


Figura III.1.20. Mapa de Severidad a TR de 100 años.

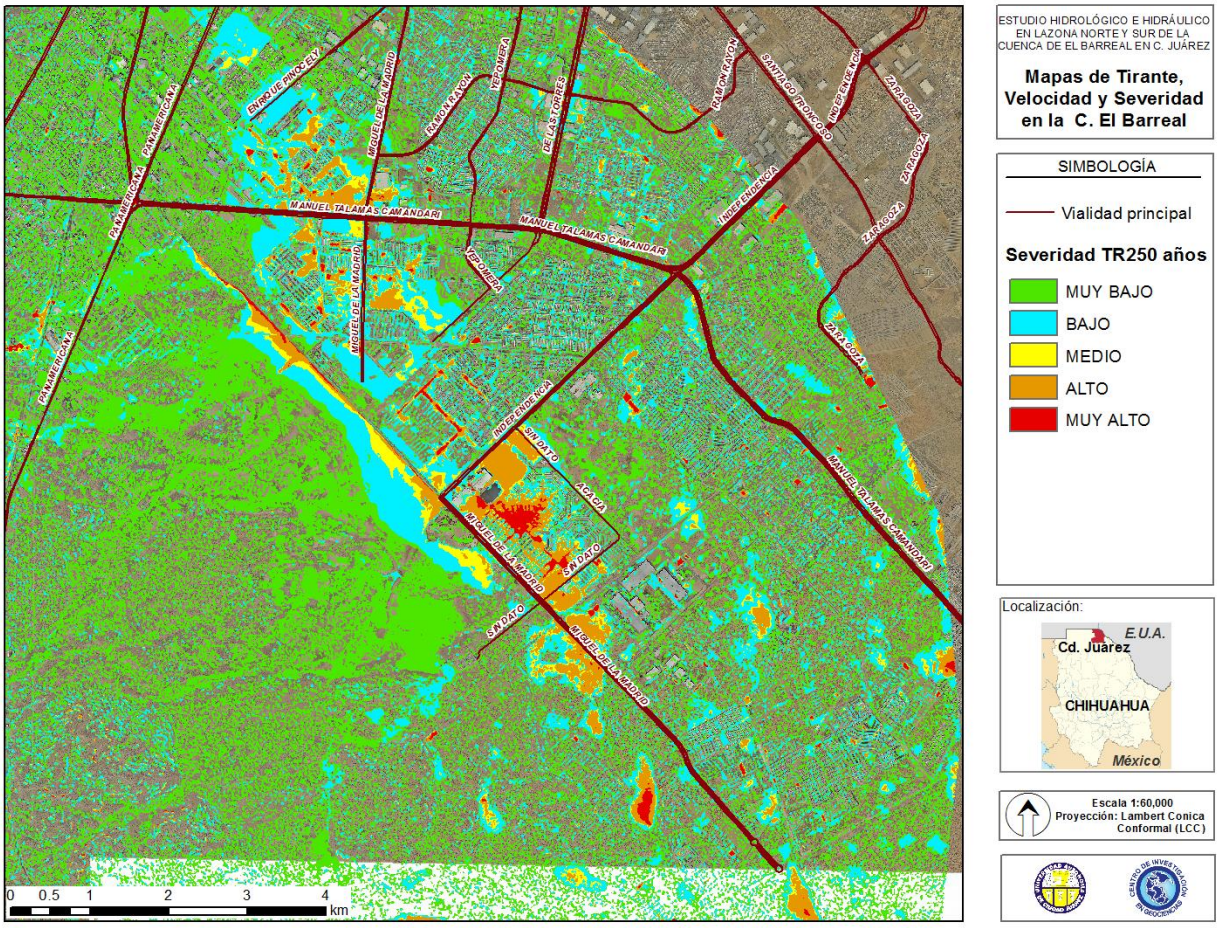


Figura III.1.20. Mapa de Severidad a TR de 250 años.

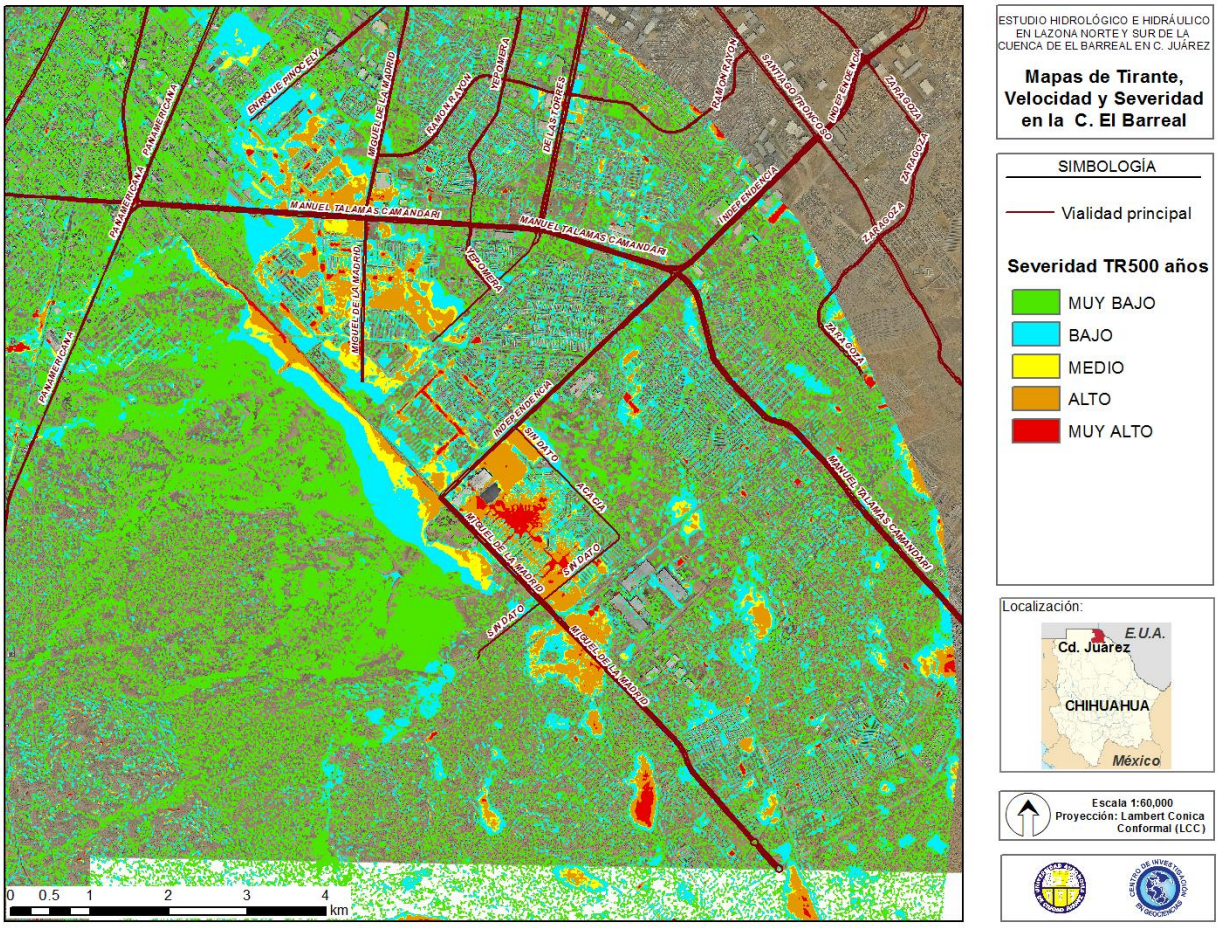


Figura III.1.21. Mapa de Severidad a TR de 500 años.

IV. CONCLUSIONES

V.1. ANALISIS HIDRAULICO BIDIMENSIONAL

En cuanto al análisis hidráulico, las conclusiones son las siguientes:

I. **Zona Centro**:

Para la parte centro de la cuenca del Barreal, identificada o etiquetada como Triangulo, el Bordo Miguel de La Madrid Hurtado, es la obra de infraestructura hidráulica actual más importante de contención de los flujos provenientes de la parte poniente, la cual carece de obras de regulación, al estar deshabilitados los diques Sta. Elena I y Sta. Elena II. De hecho, la única regulación existente aguas arriba de la carretera panamericana, es precisamente la carretera panamericana dada la presencia de alcantarillas no terminadas, u obstruidas, de forma que parte del volumen se retiene por el terraplén de esta vía de comunicación. Aun y cuando esta regulación está presente, la altura de operación y bordo libre, fueron calculados transitando el hidrograma sin perdidas hidráulicas, es decir, los tirantes de las láminas de agua a periodos de retorno de 100 y 500 años son con el volumen total de lluvia convertido a escurrimiento con una ponderación de pérdidas por condición hidráulica de terreno con numero de curva 69. En este mismo tenor, el bordo MMH opera satisfactoriamente, siempre y cuando la canaleta localizada aguas arriba no este azolvada y no se siga deprimiendo la corona de la obra como consecuencia del tráfico de vehículos. En cuanto a las veleidades de flujo, s e registran velocidades altas en la cuña norte definida por la carreta panamericana y el Bordo MMH. Además de velocidades de muy altas a lo largo de la parte aguas arriba de bordo MMH en dirección

sureste, lo cual consistente con la topografía, ya que el centroide de la cuenca está en esa dirección. Dentro del triángulo, las velocidades máximas registradas son de 1 m/s en la parte Este. El resto de la zona registra valores muy bajos consistentes con el flujo de tipo laminar. son de es El análisis detallado de la operación conjunta de elementos hidráulicos (tirante, velocidad), estructurales y de severidad se detallará en el entregable E correspondiente a Estrategias de solución.

II. Zona Norte:

En la zona Norte, la principal problemática revelada por la corrida hidráulica, es que para eventos hidrometeorológicos extremos, se registran aportaciones hidráulicas de la Cuenca Jarudo. Lo que significa que los desarrollos de esta zona no solo están haciendo manejo de escurrimientos por cuenca propia, sino que reciben aportaciones asociadas con la memoria hidráulica de la zona, dado que el sistema Jarudo drenaba de manera natural a la parte norte de la parte lagunar de la cuenca el Barreal. Aun así, se observa en la simulación la operación de los vasos de captación de cada desarrollo. En cuanto a velocidades de flujo, esta zona es la que mayores velocidades registra, principalmente en las estribaciones orientales de la Sierra de Juárez, las cuales sin embrago se concentran al oeste de la vialidad Oscar Flores, con registros en velocidad de hasta 2.5 m/s en zona urbana. Ya propiamente, en la cuenca el Barreal, o sea al Este de la avenida panamericana, las velocidades alcanzadas son de 1.7 m/s. El análisis a detalle de la forma sistémica, involucrando hidrología, hidráulica, geohidrología y capacidades de vasos corresponde a los resultados y recomendación es a ser emitidos en el Entregable F.

III. Zona Sur:

Para la zona sur, correspondiente al área urbanizada localizada al sureste y sur de la vialidad Boulevard Independencia, el análisis hidráulico refleja que las aportaciones de la cuenca surponiente son reguladas por la carencia de obra hidráulica, por lo que estos volúmenes se incorporan, aproximadamente, al sur de la intersección de la vialidad Independencia y Miguel de la Madrid, como consecuencia, precisamente de la que el bordo MMH se interrumpe abruptamente en ese punto. Este análisis refleja, además, a la necesidad de preservar el sistema de lagunas subsidiarias que actúan como sistema natural de amortiguación o regulación del escurrimiento proveniente del sur. En cuanto a velocidades de flujo, la velocidad en los desarrollos localizados al sureste del Blvd. Independencia es considerablemente alta, quizás como consecuencia el efecto de vertedor del terraplén de la vialidad Miguel de la Madrid. Esta zona requiere un análisis más detallado correspondiente al Entregable F: Estrategias y Medidas de Mitigación.

INSTITUTO DEL FONDO NACIONAL DE LA VIVIENDA PAR LOS TRABAJADORES

I N F O N A V I T

“ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO EN LA ZONA NORTE Y SUR DE LA CUENCA DE EL BARREAL EN CIUDAD JUAREZ, CHIHUAHUA”

ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LAS ZONAS DE PELIGRO MEDIO, ALTO O MUY ALTO DE INUNDACIÓN

INDICE

I. INTRODUCCIÓN 3
I.I Objetivo 3
II. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA HIDROLÓGICO 4
III. ACTIVIDADES REALIZADAS 8
III.1. Generación del Modelo Digital de Elevación 8
IV. ANÁLISIS CLIMATOLÓGICO 15
IV.2. ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE LA INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA 18
V. ANALISIS ESTADISTICO PROPIO DE LOS DATOS DISPONIBLES, COMPARATIVA DE DISTRIBUCIONES Y SELECCCION DE TORMENTA DE DISEÑO 25
V.1. ANALISIS PROPIO DE DATOS DE PRECIPITACION HASTA EL 2008 25
V.2. COMPARACIÓN DE LAS DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD DISPONIBLES Y EL REGISTRO HISTÓRICO 35
IV.3 DISTRIBUCIÓN DE LA LLUVIA EN EL TIEMPO PARA 24 HORAS 39
I. MODELADO HIDROLOGICO 41
V.1. RECONOCIMIENTO DE CAMPO DE LA CUENCA BARREAL 41
V.2. ANALISIS DE LOS ESCURRIMIENTOS EN CONDICIONES ACTUALES 45
V.2.3 DETERMINACIÓN DE LOS TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN Y DE RETRASO (DESFASE) 51
VI.1. SUBCUENCA PONIENTE 53
VI.2. SUBCUENCA CENTRO 54
VI.3. SUBCUENCA SURPONIENTE 55
VI.5. SUBCUENCA TRIÁNGULO 61
VI.6. SUBCUENCA SUR 66
VIII. CONCLUSIONES 78
VIII.1. GENERALES 78
VIII.2. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS 79

I. INTRODUCCIÓN

En Ciudad Juárez, en el estado de Chihuahua, durante la temporada de lluvias se presentan situaciones de riesgo a causa de la intensidad con que se presenta la precipitación. El problema se genera aguas abajo de los principales arroyos y diques que desembocan hacia asentamientos urbanos, incrementando con esto los daños a la población y a la infraestructura urbana en general. Ante esta situación es imperativo llevar a cabo la actualización de los estudios hidrológicos requeridos para los diferentes periodos de retorno en las zonas con un marcado crecimiento urbano, de tal forma que podamos conocer a detalle las modificaciones que se han presentado en las cuencas, con el fin de diseñar las obras de control hidráulico requeridas para salvaguardar tanto la vida como de la propiedad en un ambiente de convivencia armónico y sustentable con el medio ambiente.

En esta memoria se detallan los trabajos realizados para determinar técnicamente las definiciones de cauces principales, Los aspectos técnicos del presente informe hidrológico incluyen:

I.I Objetivo

Ejecutar los estudios básicos de hidrología e hidráulica fluvial, para la elaboración del "Estudio hidrológico y simulación hidráulica bidimensional de la subcuenca definida por la intersección de las vialidades Miguel de la Madrid Hurtado-Talamas Camandari-Boulevard Independencia", en la cuenca Zona VIII El Barreal a periodos de retorno correspondientes a lluvias de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años.

Alcances

Realizar el modelado hidrológico a periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años y la corrida hidrológica e hidráulica de las subcuencas correspondientes a la zona de la cuenca El Barreal.

II. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA HIDROLÓGICO

Ubicación de la zona del proyecto

El proyecto en cuestión se localiza en el municipio de Ciudad Juárez, Estado de Chihuahua, en la Región Hidrológica "Bolsón del Hueco", en la cuenca definida por el Plan Sectorial de Manejo de Agua Pluvial (PSMAP) Zona VIII - El Barreal. La cuenca se dividió en las siguientes subcuencas importantes:

II.1. Subcuencas Poniente

La subcuenca Poniente tiene como parteaguas dos principales avenidas, hacia el norte la Carretera Casas Grandes y hacia el este la Ave. Panamericana. Tiene una superficie de 21.527 km^2 en la cual se observan dos arroyos principales con cinco arroyos tributarios. Se presentan pequeñas aglomeraciones de casas en su mayoría, en la parte noroeste y centro de la subcuenca (Figura II.1, polígono verde).

II.2. Subcuenca Centro

La subcuenca Centro está delimitada por la Carretera Casas Grandes, la Ave. Panamericana, y hacia el noreste el Bordo Miguel de la Madrid Hurtado. Se presenta una aglomeración de casas en su mayoría, en la parte noroeste de la subcuenca cerca de la Ave. Panamericana (Figura II.1, polígono morado).

II.3. Subcuenca Oriente

La subcuenca Oriente se encuentra delimitada hacia el oeste por la Ave. Panamericana y hacia el norte por la subcuenca Barreal Centro. En la microcuenca Barreal Sur-Oriente, la cual tiene una superficie de 45.907 km^2, se observan tres arroyos principales y solo presenta una aglomeración de casas en la parte sureste, y hacia el este, naves industriales localizadas sobre la calle Camino a Electrolux (Figura II.1, polígono naranja).

II.4. Subcuenca Norte

La subcuenca Norte se encuentra delimitada por el Blvd. Manuel Talamás Camandarí hacia el norte hasta terminar los terrenos del Aeropuerto Internacional Abraham González, limita al oeste por la Ave. Oscar Flores y Panamericana. La subcuenca tiene una superficie de 14.95 km^2, se observan varios arroyos principales y presenta una importante aglomeración de colonias habitacionales y de naves industriales (Figura II.1, polígono marrón).

II.5. Subcuenca Triángulo

La subcuenca Triangulo se encuentra delimitada por el Blvd. Manuel Talamás Camandarí hacia el norte, el Bordo Miguel de la Madrid Hurtado (BMMH) hacia el oeste, y el Blvd. Independencia hacia el sur. La subcuenca tiene una superficie de 11.87 km^2, se observan varios arroyos principales y presenta una importante aglomeración de colonias habitacionales en su mayoría, así como de naves industriales y tiendas comerciales (Figura II.1, polígono amarillo).

II.6. Subcuenca Sur

La subcuenca Sur se encuentra delimitada hacia el norte por el Blvd. Independencia, hacia oeste se encuentra la Ave. Miguel de la Madrid Hurtado, y hacia el este y sur, los límites de la cuenca El Barreal. La subcuenca tiene una superficie de 19.12 km^2, se observan varios arroyos principales y presenta una importante aglomeración de colonias habitacionales en su mayoría, así como de naves industriales una de las más conocidas la maquiladora Electrolux (Figura II.1, polígono magenta).

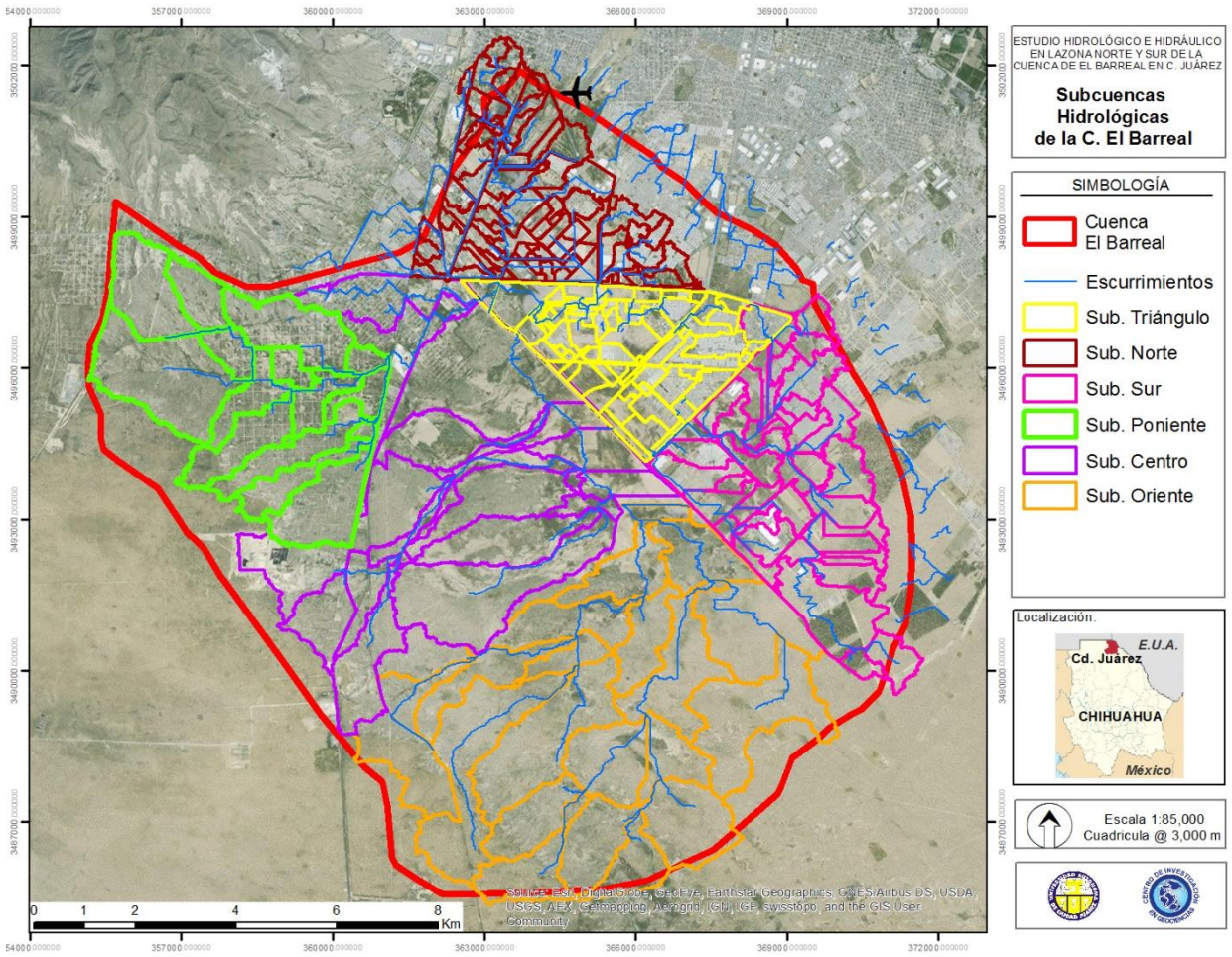


Figura II.1. Localización general de las subcuencas de la C. El Barreal en Cd. Juárez.

PROBLEMATICA

Los constantes embates de los fenómenos hidrometeorológicos extremos, tales como lluvias extraordinarias en los últimos años han ocasionado pérdidas humanas y materiales cuantiosas, así como daños a la infraestructura urbana de la ciudad.

Actualmente, la antigua zona lagunar, o parte más baja de este sistema endorreico, está protegida por un bordo con capacidad de contención de eventos hidrometeorológicos extremos de periodo de retorno de 100 años con bordo libre a 500 años. Esta zona está definida por el polígono (casi un triángulo) delimitado por la vialidad Miguel de la Madrid Hurtado (MMH) al oeste que constituye el bordo en sí, por la vialidad Manuel Talamas Camandari (TC) al norte, y por el Boulevard Independencia (BI) al este.

La problemática hidrológica de los desarrollos y colonias dentro de las subcuencas de estudio, respecto el PSMAP, establece que la cuenca El Barreal requiere de diques de regulación aguas arriba en las cuencas Norte y Poniente a fin de garantizar el flujo de escurrimientos regulados a la zona lagunar, además, este plan propone que cada desarrollo urbano se "blinde" hidrológicamente mediante estrategias de manejo pluvial que le permita a cada desarrollo o fraccionamiento el captar, conducir e infiltrar, en un plazo no mayor a 72 horas, los escurrimientos por cuenca propia de aportación, siendo obligatoria que las obras de captación e infiltración almacenen volúmenes correspondientes a eventos ordinarios asociados con lluvias de 25 años. En cuanto a la capacidad de desalojo pluvial de las vialidades, estas deberán ser capaces de manejar y conducir hasta eventos de 100 años.

Bajo las condiciones mencionadas, el desarrollo urbano en la subcuenca Triangulo debe estar en primer lugar protegido de los volúmenes que escurren de la parte

norponiente de la cuenca. Esta protección está garantizada con la presencia del Bordo Miguel de la Madrid Hurtado cuyas dimensiones actuales soportan lluvias de 100 años de periodo de retorno con bordo libre a 500 años. En cuanto, a los escurrimientos por cuenca propia, cada microcuenca deberá contener sus volúmenes, conducirlos a vasos de captación de capacidad suficiente para eventos de 25 años e infiltrarlos al acuífero, de manera que el vaso este operativo al cabo de 72 horas.

III. ACTIVIDADES REALIZADAS

III.1. Generación del Modelo Digital de Elevación

El desarrollo de los modelos hidrológicos e hidráulicos debe ser generado a partir de una plantilla topográfica de alta resolución. A este respecto, los Términos de Referencia que acotan los alcances del presente estudio, establecen la generación de un Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en ingles) por métodos de restitución fotogramétrica con resolución espacial de 1mx1m cubriendo una superficie de 100 km^2 aproximadamente (Figura III.1.1, polígono morado) que acota propiamente el área de estudio. Aun y cuando la resolución vertical no se precisa, el tamaño de pixel de la ortofoto define o acota el diferencial en la coordenada Z. Por esta razón, la cotización original para este producto se solicitó a la empresa Merrick bajo estas especificaciones. La propuesta técnica y económica de Merrick fue entonces la elaboración de esta estudio topográfico por método de restitución fotogramétrica a través de plataforma satelital o suborbital para evitar el requerimiento de permisos de vuelo en zona aledaña al Aeropuerto, además de permisos con el gobierno Norteamericano por invasión de espacio aéreo durante la ejecución de las líneas de vuelo.

El producto ofertado por este proveedor, que es un referente en sensores remotos, fue entonces un Modelo Digital de Terreno con resolución espacial en X y Y de

30cmx30cm y 30 cm en Z. Considerando que esta resolución vertical era suficiente para visualizar los tirantes mayores a 40 cm que especifican las funciones de daño para la tipología de casas de El Barreal, UACJ consideró que se cumplían las condiciones para el análisis requerido, tal y como está plasmado en los Términos de Referencia.

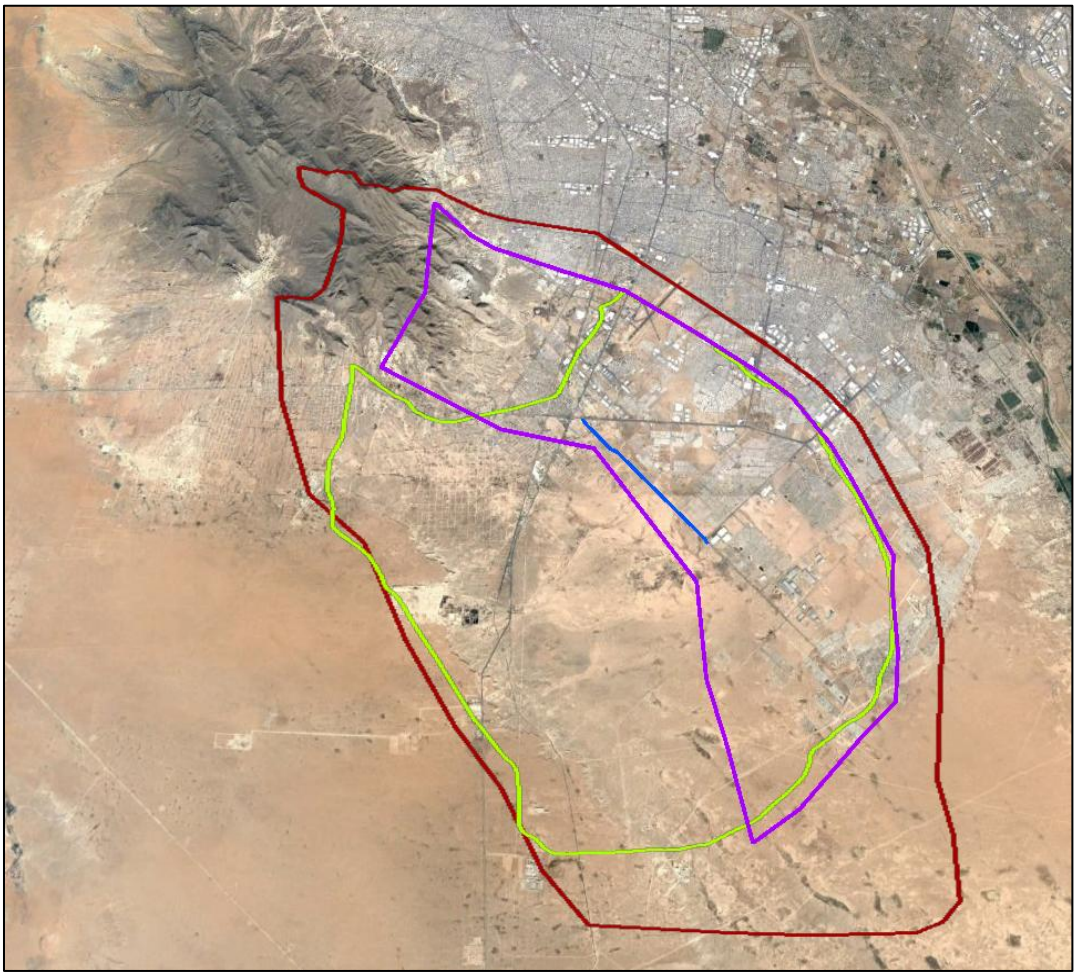


Figura III.1.1. Puntos de control realizados para la generación del DEM. En verde se muestra la cuenca de El Barreal, en morado el área de estudio y en marrón el área modelada.

Aun así, antes de ordenar la adquisición de los datos a Digi-globe a través de Merrick, se comentó el alcance de estas especificaciones con CENAPRED, siendo su

recomendación la de generar un modelo con resolución vertical no mayor a los 20 cm, y manteniendo la resolución espacial de 1m x 1m. A pesar de que esta precisión no está amparada en los Términos de Referencia, la UACJ acató plenamente la recomendación realizada por CENAPRED, que como autoridad en materia de desastres, presentó esta desviación metodológica para mejorar el producto final, aun y a costa del impacto económico que implicaba la generación del MDE con estas características (incremento del costo de un 33 % aproximadamente). Habiendo concordado con CENAPRED, se contrató un servicio de fotogrametría con drones con vuelo a baja altura, los cuales, sin embargo, no pueden ser volados en zonas aledañas a aeropuertos. Por esta razón, el vuelo con drones para la generación de la restitución fotogramétrica es de aproximadamente 68 km^2, evitando tanto las zonas aledañas al Aeropuerto de Ciudad Juárez, así como la ruta de aproximación de las aeronaves a la pista principal. Respecto de los km^2 restantes, en base a observaciones y apoyo del CENAPRED, se identificaron los desarrollos o fraccionamientos más recientes al vuelo LiDAR y MDE del 2008, que quedaron fuera de la cobertura de la fotogrametría (Figura III.1.2.). Este análisis comparativo del CENAPRED permitió identificar que un 7 % de la superficie de la zona urbana de El Barreal ha sido modificada por procesos de urbanización posteriores al 2008. De este 7 % construido posterior al 2008, solo un 1.5 km^2 quedaron fuera de la cobertura de la topografía actualizada por fotogrametría en el 2017. Para compensar la falta de datos en estas zonas, como consecuencia del incremento de resolución y por normatividad de la autoridad aeroportuaria, se procedió a realizar un levantamiento terrestre en estas zonas y así actualizar el MDE final dentro de los 100 Km^2, objeto de este estudio. En este mismo tenor, aun y cuando el área de estudio está plenamente acotada en los Términos de Referencia, se incluyeron 100 km^2 mas de cobertura, en las zonas poniente, sur poniente y estribaciones de la Sierra de Juárez (Figura III.1.2, polígono marrón), con el objetivo de evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca de manera integral.

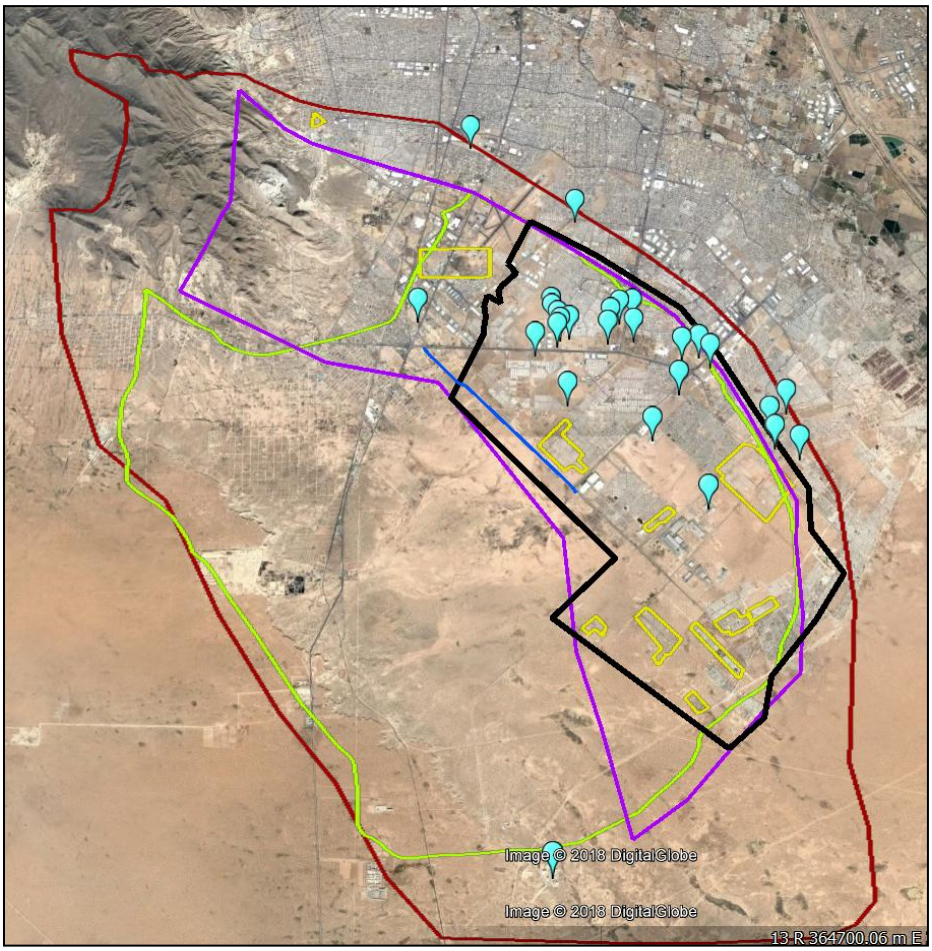


Figura III.1.2. Construcción del Modelo Digital de Elevación. En verde se muestra la cuenca de El Barreal, en negro la cobertura fotogramétrica, en morado el área de estudio de los TR y en marrón el área efectivamente modelada. Los polígonos amarillos y los globos azules representan zonas urbanizadas durante los últimos 9 años.

En resumen, el proceso de generación del Modelo Digital de Elevación (MDE) se generó mediante un vuelo fotogramétrico con DRONES para generar una nube de puntos para generar de ser necesario, un MDE con tamaño de celda de 10 cm x 10 cm capaz de restituir alturas no mayores a 20 cm. Sin embargo, esta tecnología, no pudo ser implementada en la zona noroeste, dada la presencia del Aeropuerto Internacional Abraham González, cuya administración no autorizó el vuelo de aeronaves no tripuladas en las zonas de aproximación de la aviación comercial en Ciudad Juárez. Sin

embargo, la zona fue actualizada con topografía de alta resolución con scanners LiDAR y sistemas RTK de doble frecuencia para generar una superficie con tamaño de celda o pixel de 1m x 1m y alturas no mayores a 20 cm, conforme al proceso de verificación por topografía terrestre que a la par se realizó con el levantamiento del nuevo DEM y el vuelo con Drones, tanto en la zona del Aeropuerto como en nuevos desarrollos de fraccionamiento, teniendo un total aproximado de 1000 puntos de control (Figura III.1.3),

Una vez que se generaron los mosaicos de 1 km^2 con resolución espacial en el terreno de 1m x 1m se procedió a realizar una validación de la resolución vertical del modelo, es decir, se verificó que las secciones del DEM fueran consistentes con lo observado con las secciones topográficas levantadas con GPS doble frecuencia utilizando las mismas estaciones de referencia o puntos de control (Fig III.1.3).

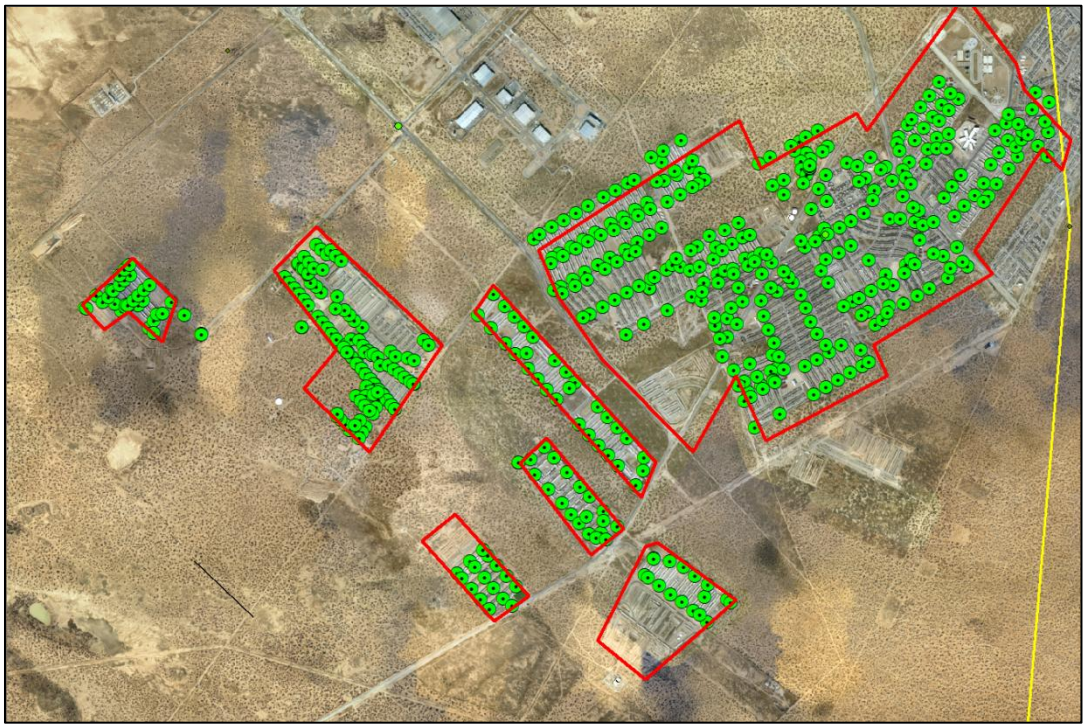


Figura III.1.3. Puntos de control realizados para la generación del DEM.

Finalmente, se dispone de un MDT hibrido de 200 km^2 para la modelación hidrológica e hidráulica, actualizado al 2017 por restitución fotogramétrica en la zona urbanizada y por topografía con sistema GPS de doble frecuencia en las zonas no cubiertas y LiDAR en las zonas sin cambio (Figura III.1.4). Este modelo presenta dos zonas de sutura, una al norte y otra al poniente, en los extremos de la fotogrametría, hay siempre distorsiones que se corrigieron con el empate con LiDAR, y con levantamiento terrestre. Esto es principalmente importante para estructuras hidráulicas localizada en la frontera o limite del levantamiento fotogramétrico. En este caso, el Bordo MMH y los vasos al norte fueron introducidos a partir de polígonos Acad para asegurar la fidedigna representación del terreno en los bordes.

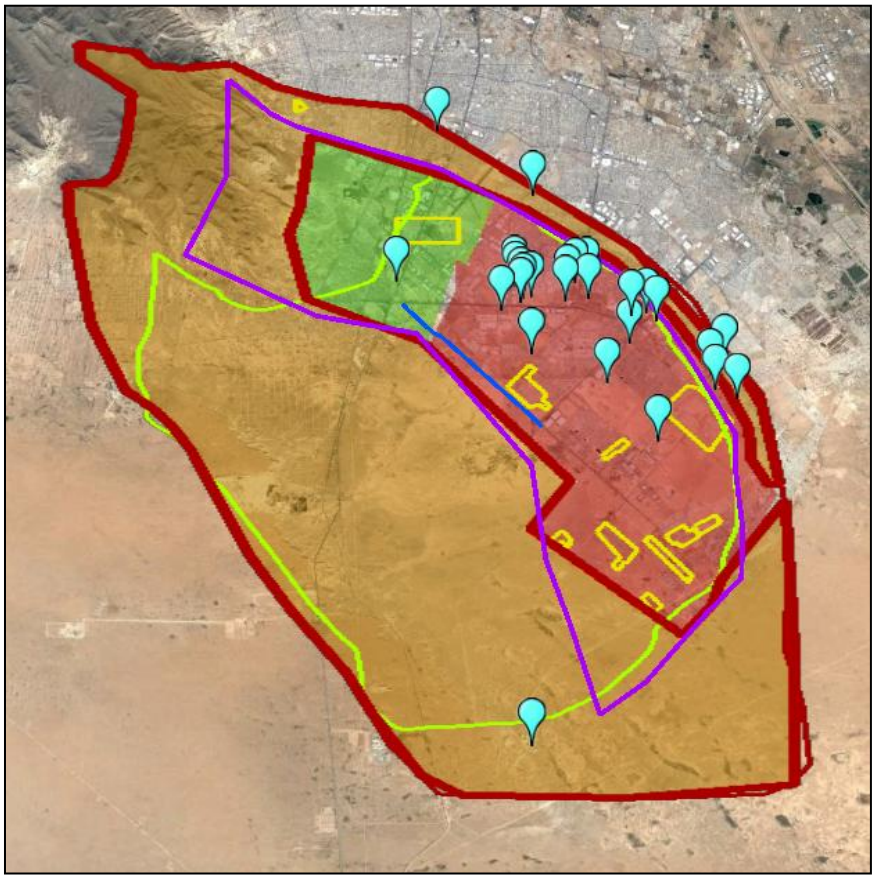


Figura III.1.4. Generación del DEM. El polígono sombreado marrón representa el área cubierta con LiDAR 2008, el morado el área de estudio, el verde al área actualizada con topografía con GPS doble frecuencia y el polígono rojo el área actualizada con fotogrametría 2017.

A partir de la topografía aérea de alta resolución vertical se procedió a generar el modelo digital de elevación de terreno dentro del área de estudio. Con información topográfica de alta precisión se desarrollaron los modelos digitales de elevación (DEM) requeridos, que conforme a los Términos de Referencia, son de 10 x 10 m en la zona no urbanizada, 5 x 5 m en la zona urbanizada y 1 m en la zona del bordo. Con los modelos de elevación se obtuvieron los diferentes parámetros físicos de la cuenca bajo estudio, mismos que serán aplicados durante el desarrollo de los modelos hidrológicos y simulaciones hidráulicas. Esto tipo de datos topográficos de alta precisión identifican depresiones en el terreno generando los modelos con gran apego a la realidad por su alta precisión.

Ya con la capa base de topografía a nivel de terreno, y mediante la extensión computacional HecGeo-HMS al paquete ARCMAP, se procedió a generar los parámetros fisiográficos de los diferentes elementos hidrológicos que conforman el sistema de drenaje pluvial del Área de Estudio. El parámetro más importante, que es propiamente el escurrimiento o arroyo se generó a partir del DEM, aplicando el flujo estándar de relleno o corte de celdas anómalas (outliers). Posteriormente, mediante las herramientas de dirección de flujo (flowdir), pendiente (slope) y acumulación de flujo (flowacc), basadas en el método matemático del descenso rápido o "steepest descent", se generó un grid o raster con celdas de concentración de flujo, a partir del cual se obtuvo el archivo vectorial en formato shapefile tipo polilínea asociado con la red de drenaje. Una vez definida la red hidrológica, se generaron las vertientes para definir las áreas de aportación (watercatchment). Los centroides, pendientes al 10 % y 80 % del ramal principal o de orden mayor de la cuenca o subcuenca fueron también determinados. En resumen, los datos requeridos para la realización del análisis hidrológico, tales como: como definición de subcuencas y/o microcuencas, escurrimientos, pendientes, longitud máxima de cauces, tiempos de retardo, tiempos de concentración, definición de los cauces principales y tiempo de respuesta se obtuvieron a partir de los flujos de trabajo del HecGeo-HMS. Tanto la definición de vertiente como

la localización geográfica en el terreno fueron validados mediante caminamiento de campo para verificar la presencia de huellas de tirante de agua o arrastres, como elementos de consistencia entre el ramal de flujo identificado en el DEM con el arroyo intermitente en la zona de estudio.

El Modelo Hidrológico se realizó finalmente en el paquete computacional HMS, alimentando los parámetros requeridos a partir de los datos fisiográficos del sistema de drenaje localizado dentro de área de estudio.

IV. ANÁLISIS CLIMATOLÓGICO

IV.1. ANÁLISIS GEOESPACIAL DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS

La determinación las áreas de influencia de las estaciones meteorológicas se realizo a partir de las estaciones localizadas en un radio de 40 Km del baricentro de la cuenca El Barreal (Figura IV.1.1). Conforme a este criterio se ubicaron 6 estaciones, las cuales están localizadas casi colinealmente respecto de la cuenca de interés. Las estaciones son:

Aeropuerto de El Paso Texas, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Chamizal, Comisión Internacional de Aguas y Límites (CILA) 8283, Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) 8213, CONAGUA (Distrito de Riego), Escuela Secundaria Juarez (8318), CILA 8290 y CONAGUA 8121. De estas estaciones, las estaciones 8121, 8290, 8318 están en desuso con registros truncos. En tanto que la estación CONAGUA Distrito de Riego esta en uso, pero fue desplazada geográficamente. La estación del Aeropuerto del Paso si dispone de registro continuos, en tanto que IIT y Chamizal están truncos. Aun asi se llevo a cabo un análisis de areas de influencia aplicando el método de los polígonos de Thiessen, los cuales se basan en triangular las localizaciones de las EMAS y en base a la intersección de las bisectrices estimar el área de influencia de

cada estación.

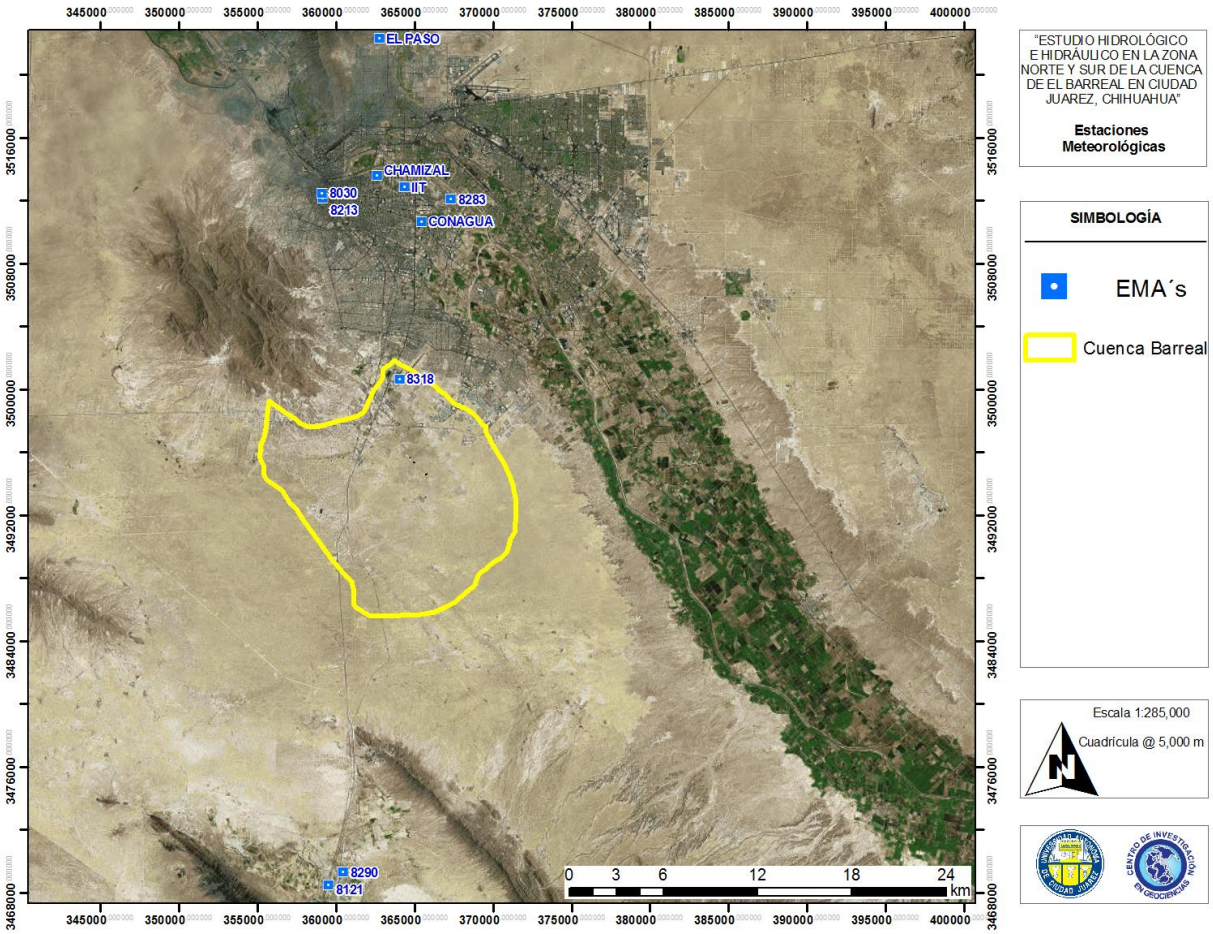


Figura IV.1.1. Localización de estaciones meteorológicas cercanas a la Cuenca El Barreal.

El resultado de los polígonos de Thiessen (Figura IV.1.2) muestra que la EMA que tiene una mayor correlación geoespacial con la cuenca El Barreal, es la estación 8318 (Esc. Sec. Juárez), localizada en la cercanía del Aeropuerto Internacional, pero desafortunadamente solo cuenta registros de 1978 a 1987.. El resto de las EMA´s se encuentran muy lejanas a la Cuenca El Barreal, hasta una distancia de 25 km. En el caso de la EMA de CONAGUA, es la que cuenta con registros más actualizados de

2009 al 2017, pero de igual forma se encuentra a 15 km de distancia de la cuenca El Barreal. Ante la poca correlación de las EMA´s con el área de estudio, se optó por considerar los valores máximos pluviométricos de cada una de las EMA´s en base al análisis de los registros históricos de precipitación. El análisis pluviométrico e hidrométrico en base al evento Maximo Mas Probable permitió establecer el modelo lluvia-escurrimiento prevaleciente en la zona de estudio en base a los datos climatológicos disponibles de las EMA´s.

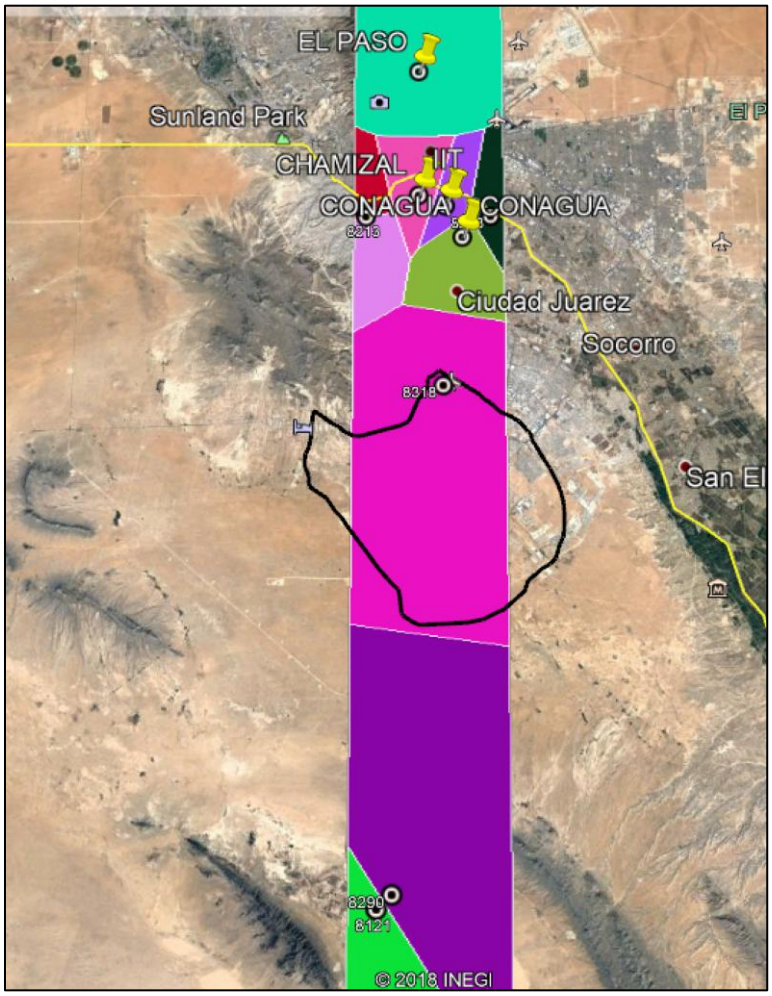


Figura IV.1.2. Mapa de polígonos de Thiessen.

IV.2. ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE LA INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA

De acuerdo a las recomendaciones de los manuales del modelo de simulación hidrológica HEC-HMS, para grandes ciudades es recomendable diseñar las estructuras pluviales para tormentas cuya duración sea de un día o 24 horas. Además la Comisión Nacional del Agua establece que para localidades cuya población sea mayor de 1 millón de habitantes se obtengan los gastos máximos y volúmenes para un periodo de retorno de 100 a 500 años.

Para Ciudad Juárez, se ha establecido el criterio de utilizar tormentas de 24 horas y periodo de retorno de 100 años considerando que con el bordo libre puede ser desalojado el gasto máximo para un periodo de retorno de 500 años. Dichos criterios se encuentran aprobados en el Plan Sectorial de Manejo de Agua Pluvial (PSMAP) para Ciudad Juárez el cual ha sido aprobado por la CONAGUA (IMIP, 2004).

IV.1 RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN HIDROCLIMATOLÓGICA

La información requerida para generar la lluvia de diseño a ser empleada en el estudio hidrológico consistió en recabar la mayor información pluviométrica disponible para la zona de estudio. Las fuentes de información de datos de precipitación son el compendio de lluvia del ***Plan Sectorial de Manejo de Agua Pluvial*** (PSMAP) elaborado por el Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP), la base de datos de lluvia actualizada al 2008 en el ***Estudio, Estrategias y Propuestas para el manejo y control de agua pluvial en las zonas su y oriente de Ciudad Juárez*** elaborada por Gobierno del Estado en el 2009 después de las contingencias del 2008, que fue aprobada por CONAGUA en el 2014 al ser presentada por la UACJ como tormenta de diseño en la elaboración de los proyectos ejecutivos del Dren 2-A, finalmente también se incluyó la base de datos del compendio de lluvia de estaciones

(incluyendo la estación del radar de Santa Teresa en Nuevo México) utilizado para la elaboración del Atlas de Riesgo 2016 del de Ciudad Juárez elaborado por el IMIP en 2015.

PSMAP

En este documento se detalla metodológicamente las estaciones seleccionadas, el tiempo de registro de datos y las pruebas de independencia y bondad de los ajustes de las funciones de probabilidad a las que se ajusta la lluvia histórica (PSMAP, 2004). La distribución adoptada corresponde a una distribución exponencial avalada por la CONAGUA.

Tabla IV.1.1. Distribución de la precipitación exponencial del PSMAP.

TR	Plan Sectorial
2	41.3
5	54.0
10	66.8
20	
25	84.0
50	96.8
100	110.0
200	
500	140.0
1000	153.0
10000	196.0

ESTUDIOS Y ESTRATEGIA, UACJ 2010 (AVALADA POR CONAGUA 2014)

Esta es una lluvia de diseño modelada con datos hasta el 2008 y aprobada por la CONAGUA en el 2014 para generar un modelo de hidrología conciliada que ampara los gastos de diseño del Dren 2-A. La función de probabilidad adoptada corresponde a una distribución Lognormal.

La tormenta de diseño se obtuvo a partir, primeramente, de la asociación de los datos distribuidos o ajustados mediante las funciones Normal, Lognormal y Gumbel con el registro histórico de lluvia. La distribución de la precipitación en 39 años de registro histórico esta sesgada. Es decir, los datos de lluvia no se ajustan apegados a una distribución normal. El patrón de los datos sugiere entonces el uso de distribuciones con sesgo tales como la Lognormal o la Gumbel para eventos extremos.

Se asoció la lluvia máxima en 24 horas a varios periodos de retorno, utilizando la distribución Normal, Lognormal y Gumbel, los resultados fueron comparados con los datos de precipitación calculados en el Plan Sectorial en donde el periodo de retorno es 15 años menor al que aquí se desarrolla.

En la tabla se muestran los valores del Plan Sectorial, los resultados del análisis por los métodos señalados y las diferencias encontradas respecto al primero. En los resultados se observa que la distribución Normal se desplaza significativamente de los datos obtenidos en el Plan Sectorial, y por los cálculos de los métodos Log-normal y Gumbel, por lo que este método se descarta.

Los métodos Log-Normal y Gumbel muestran que las precipitaciones obtenidas para diferentes periodos de retorno se incrementan en un promedio de 5%, principalmente por el efecto de las intensas tormentas registradas en los años 2004, 2005 y 2006. Los incrementos en los datos de precipitación se observan principalmente para los periodos de retorno de 5 a 50 años quedando el resto con diferencias mínimas en relación a los valores del Plan Sectorial.

Tabla IV.1.2. Distribución de las precipitaciones por periodo de retorno (TR) para el 2008.

TR	Plan Sectorial	Distr. Normal	Diferencia en %	Distr. Log Normal	Diferencia en %	Gumbel	Diferencia en %
2	41.3	45.22	109.49%	41.37	100.17%	42.30	102.42%
5	54.0	61.32	113.56%	59.28	109.78%	61.79	114.43%
10	66.8	69.73	104.39%	71.56	107.13%	74.69	111.81%
20		76.68		83.48		87.05	
25	84.0	78.7	93.69%	87.51	104.18%	91.00	108.33%
50	96.8	84.5	87.29%	99.49	102.78%	103.10	106.51%
100	110.0	89.7	81.55%	112.17	101.97%	115.10	104.64%
200		94.5		123.25		127.00	
500	140.0	100.27	71.62%	142.56	101.83%	143.00	102.14%
1000	153.0	104.32	68.18%	154.63	101.07%	155.00	101.31%
10000	196.0	116.35	59.36%	218.72	111.59%	191.00	97.45%
			87.68%		104.50%		105.45%

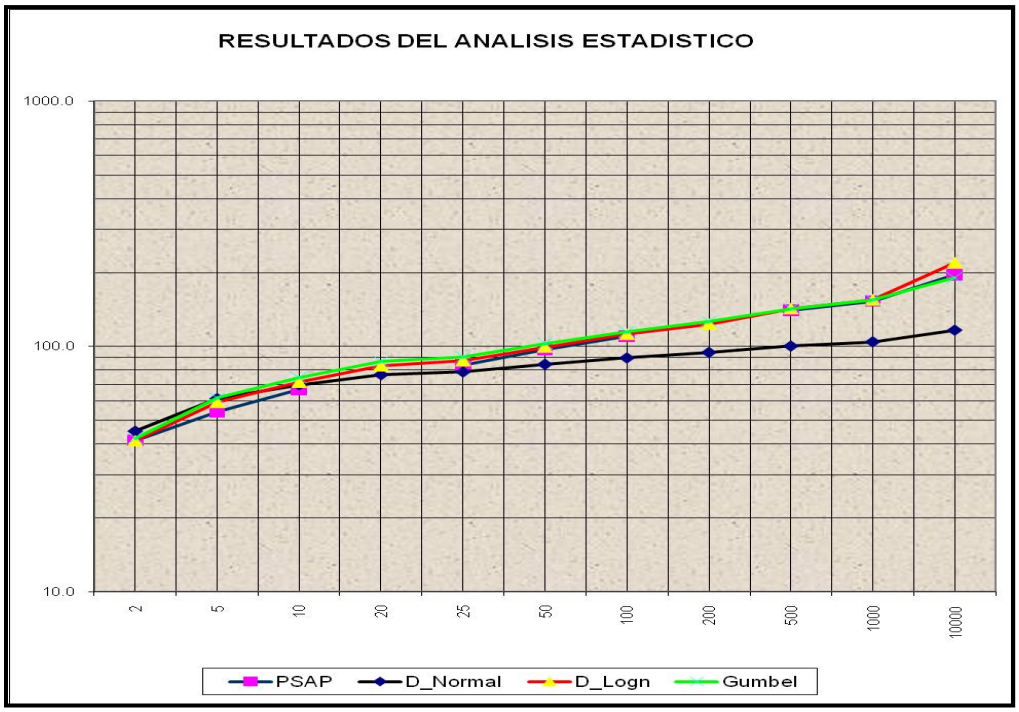


Figura IV.1.1. Resultados del análisis estadístico al 2008.

Por lo anterior, en este estudio se propone que los estudios hidrológicos tomen como base los datos de precipitación obtenidos por el método Log-normal con los siguientes valores:

Tabla IV.1.3. Distribución Lognormal de la precipitación (CONAGUA 2014).

PERIODO DE RETORNO (Años)	PRECIPITACIÓN (mm)
2	41.37
5	59.28
10	71.56
20	83.48

25	87.51
50	99.49
100	112.17
200	123.25
500	142.56
1000	154.63
10000	218.72

ATLAS DE RIESGO 2016

El Atlas de Riesgo en su edición 2016, hace una recopilación de 4 estaciones hidrometeorológicos incluyendo la estación de Santa Teresa en Nuevo México. El registro histórico para 24 horas (Figura IV.1.2.), muestra la precipitación máxima en 24 horas, con una media de 40 mm. Los eventos pico son en 1937 y 1968, con registros de 100 mm y 113.45 mm respectivamente.

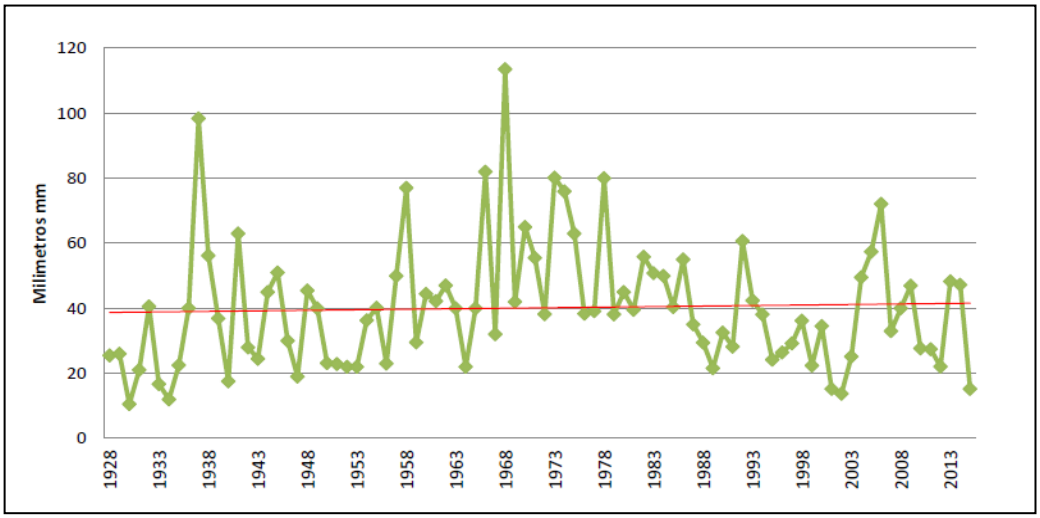


Figura IV.1.2. Resultados del análisis estadístico al 2008.

La selección de estaciones que hace el Atlas de Riesgo son estaciones de CONAGUA (8006, 8030, 802, 8213) y el Aeropuerto del Paso Texas, las cuales cumplen con el criterio de más de 30 años de registro. El análisis estadístico de esta base de datos de lluvia se realizó de manera individual a cada estación, y se adoptaron los máximos de cada distribución para generar la lluvia de diseño (Tabla IV).

Tabla IV. Tormenta de diseño del Atlas de riesgos (IMIP, 2016).

Método seleccionado para períodos de retorno con menor error cuadrático						
Método integración	Estaciones					
	8006	8030	8121	8213	EL Paso, Tx.	Valor Adoptado
Normal	8.8	7.1	5.3	2	1.8	
Log-normal	6.4	5.8	3.5	2.1	3.9	
Log-normal Máxima	7.2	-	2.8	-	-	
Gumbel	7	3.9	3.4	1.7	3.2	
Gumbel Máxima	7.8	4.1	3.9	2	3.6	
Exponencial	15.6	8.7	16.8	1.9	18.7	
Gamma	6.2	4.3	3.4	1.8	2.9	
Método optado	Log-Normal	Gumbel	Log-Normal	Gumbel	Normal	
Periodos de retorno	Datos obtenidos(mm)					
Tr2	24.75	26.93	28.22	0.94	32.12	32.12
Tr5	38.21	48.96	44.53	3.45	44.68	48.96
Tr10	47.93	63.54	56.52	5.12	51.28	63.54
Tr20	57.82	77.53	68.82	6.71	56.74	77.53
Tr25	60.08	80.54	71.67	7.05	57.76	80.54
Tr50	71.41	95.63	85.9	8.77	62.88	95.63
Tr100	82.2	109.2	99.58	10.32	66.97	109.2
Tr200	93.49	122.72	114	11.86	70.71	122.72
Tr500	109.29	140.55	134.32	13.89	75.24	140.55
Tr1000	122.1	154.03	150.91	15.43	78.42	154.03
TR2000	135.59	167.51	168.46	16.97	81.42	168.46

La distribución adoptada por el Atlas de riesgos es entonces:

Tabla IV.1.4. Distribución Atlas de Riesgo.

PERIODO DE RETORNO (Años)	PRECIPITACIÓN (mm)
2	32.12
5	48.96
10	63.54
20	77.53

25	80.54
50	95.63
100	109.2
200	122.72
500	140.55
1000	154.03
10000	220.33

V. ANALISIS ESTADISTICO PROPIO DE LOS DATOS DISPONIBLES, COMPARATIVA DE DISTRIBUCIONES Y SELECCCION DE TORMENTA DE DISEÑO

Aun y cuando la UACJ en 2010 (con datos hasta el 2008 y avalada por CONAGUA en 2014), y el Atlas de Riesgos 2016 presentan ya distribuciones de lluvia, en este estudio se procedió a realizar un Análisis Estadístico Propio de los datos disponibles del 2008 y 2016.

V.1. ANALISIS PROPIO DE DATOS DE PRECIPITACION HASTA EL 2008

Para este análisis, se recopiló la información disponible de precipitación para un día, encontrando que históricamente se han tomado datos en diferentes estaciones climatológicas. De estos datos, se han tomado los máximos registrados para cada año, resultando lo que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla V.1.1. Registro de datos pluviales anuales.

AÑO	CILA	CD. JUÁREZ	CNA	CHAMIZAL Lat. 34°45' Long. 106°27'	EL PASO Lat. 31°49'43" Long. 106°26'56"'	ACEQUIA MADRE	CILA NORTE	IIT/UACJ Lat. 31°44'36" Long. 106°25'54"'	MONTADA Lat. 31°43'30" Long. 106'25'54"	ADOPTADO
1969	22.80			19.50						22.80
1970	36.20			36.20						36.20
1971	55.50			55.50						55.50
1972	38.20			38.20	41.90					41.90
1973	80.20			80.20	45.00					80.20
1974	52.70			52.70	42.40					52.70
1975	63.00			63.00	62.00					63.00
1976	28.10			28.10	51.10					51.10
1977	28.70			28.70						28.70
1978	62.50			62.50	39.10					62.50
1979	26.50			26.50						26.50
1980	31.90			31.90	33.00					33.00
1981	30.90	24.00		30.90	46.50					46.50
1982	53.90	51.00		53.90	56.10					56.10
1983	38.70	23.00		30.00	24.90					38.70
1984	31.20	50.00		38.70	58.40					58.40
1985	30.50	25.70		32.20	26.90					32.20
1986	30.00	24.00		30.50	39.60					39.60
1987	28.30	70.50		33.50	44.70					70.50
1988	28.30	35.60		28.30	32.50					35.60
1989	23.00	24.30		23.00	37.30					37.30
1990	29.40	34.90		29.40	62.00					62.00
1991		40.00								40.00
1992		44.00								44.00
1993		27.40								27.40
1994										0.00
1995					21.34					21.34
1996			24.00		26.42					26.42
1997			19.00		22.86					22.86
1998			16.00		12.70					16.00
1999			22.00		22.35					22.35
2000			50.00		34.54	35.00	66.80	17.30		66.80
2001			19.00		15.24	80.00		5.00		80.00

2002			18.50		13.71			26.60	19.40	26.60
2003			25.00		15.14			28.30	26.20	28.30
2004			28.00		34.79			32.00	74.00	74.00
2005			32.00		57.40			35.20	64.00	64.00
2006			59.00		72.13			46.20	91.70	91.70
2007			36.00		33.00			25.50	23.80	36.00
2008			40.00		44.90			45.00	34.80	45.00

Todas estas estaciones meteorológicas están localizadas dentro de la zona urbana Cd. Juárez – El Paso, Texas, EE.UU. Se observa que las tormentas son muy variables en su intensidad de un sitio a otro, características principales de las lluvias en estas latitudes.

La columna de lluvia adoptada, recoge la máxima precipitación registrada por todas las estaciones en el área, considerándola como la más crítica de la zona de estudio, y la que traería por consecuencia el mayor gasto y volumen escurrido, considerando como válido que la precipitación máxima se puede presentar en cualquier parte de la ciudad. Se observa que en el año 1994 no se cuenta con información, por lo cual queda eliminado como parte del análisis. Con el criterio anterior, para el análisis estadístico se adopta la siguiente información:

Tabla V.1.2. Precipitación máxima anual (2008).

AÑO	PRECIPITACIÓN MAX. EN 24 HRS (MM)
1969	22.80
1970	36.20
1971	55.50
1972	41.90
1973	80.20
1974	52.70
1975	63.00
1976	51.10
1977	28.70

1978	62.50
1979	26.50
1980	33.00
1981	46.50
1982	56.10
1983	38.70
1984	58.40
1985	32.20
1986	39.60
1987	70.50
1988	35.60
1989	37.30
1990	62.00
1991	40.00
1992	44.00
1993	27.40
1995	21.34
1996	26.42
1997	22.86
1998	16.00
1999	22.35
2000	66.80
2001	80.00
2002	26.60
2003	28.30
2004	74.00
2005	64.00
2006	91.70
2007	36.00
2008	45.00

Primeramente, se generó una distribución de frecuencias (Figura V.1.1.1) de los registros disponibles hasta el 2008, en la cual se observa que los datos están sesgados como ya se había mencionado en la memoria del 2008, por lo que la distribución Normal no es la mejor aproximación.

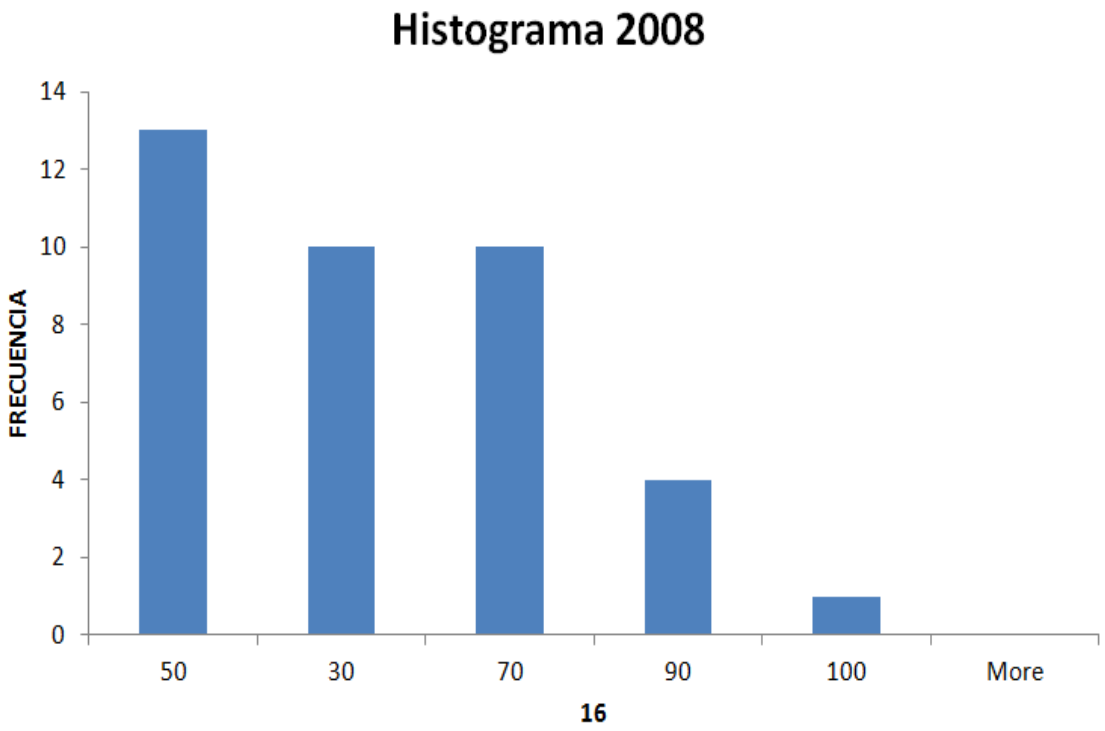


Figura V.1.1.1. Resultados del análisis estadístico al 2008.

Por ello en este análisis actualizado de la información hasta el 2008 se aplicaron solo las distribuciones de Gumbel y LogNormal. La distribución de Gumbel se calculó mediante una hoja de cálculo de Excel, en tanto que la LogNormal se realizó en EasyFit. El resultado de comparativo entre las funciones teóricas (Tabla I) los registros históricos hasta el 2008 con estas distribuciones (Figura V.1.1.2) muestran el ajuste entre los datos de las funciones probabilísticas analizadas y la curva empírica.

Tabla I. Análisis Estadístico propio (2008).

P(x)	TR (años)	Gumbel	PTLOGNORMAL 2008 A. PROPIO
0.01	10000	174.0037	207.44
0.1	1000	139.6507	157.61
0.2	500	129.304	143.68
0.5	200	115.6138	125.93
1	100	105.237	112.46
2	50	94.82217	100.32
4	25	84.3299	87.94
10	10	70.18665	71.74
20	5	58.99297	59.3
50	2	42.08631	41.3
70	1.428571429	33.85037	32.98
80	1.25	29.52076	28.82
90	1.111111111	24.17848	23.92
99	1.01010101	13.83921	15.47
99.9	1.001001001	7.79113	11.3

Las funciones de probabilidad calculada Lognormal y Gumbel se ajustan de manera favorable a los datos históricos. Es decir, son muy similares hasta periodos de retorno de hasta 100 años. Para eventos mayores, las funciones se despegan de manera importante, especialmente en los 10,000 años de TR, asociado a la seguridad hidrológica de presas de almacenamiento. En cuanto a este estudio, el CENAPRED solicitó en el 2016, el modelado hidráulico para el diseño del bordo Miguel de la Madrid Hurtado, para un evento hidrometeorológico extremo de 100 años de periodo de retorno con bordo libre a 500 años de periodo de retorno. En estos escenarios, la desviación entre los métodos Gumbel y Lognormal es de 13 mm y 10 mm, a 100 y 500 años de periodo de retorno respectivamente, por lo que en concordancia con el Análisis del 2009 y 2010 (avalado por CONAGUA), consideramos que la distribución Log Normal es la más adecuada para el modelado por considerar valores más extremos, aun y cuando la Gumbel presenta mejor ajuste hasta periodos de retorno de casi 50 años.

ANALISIS PROPIO DE DATOS DE PRECIPITACION HASTA EL 2015

Para el análisis de la información climatológica con registros hasta el 2015, se procedió a utilizar los máximos registros de lluvia compilados en el Atlas de Riesgo (Tabla II).

Tabla II. Precipitación máxima anual (2015).

AÑO	Precipitación
1928	27.2
1929	27.2
1930	11.4
1931	21.9
1932	40.5
1933	18.3
1934	13.8
1935	24.3

1936	40.9
1937	98.0
1938	56.3
1939	37.3
1940	18.3
1941	63.6
1942	29.2
1943	26.0
1944	46.2
1945	52.7
1946	30.8
1947	19.5
1948	46.2
1949	42.1
1950	23.9
1951	24.7
1952	23.9
1953	23.1
1954	37.7
1955	40.9
1956	24.3
1957	50.2
1958	77.4
1959	30.4
1960	45.8
1961	43.0
1962	47.8
1963	40.5
1964	22.7
1965	40.1
1966	82.2
1967	33.2
1968	112.6
1969	42.5
1970	65.2
1971	55.9
1972	38.9
1973	80.6
1974	76.1

1975	63.2
1976	39.3
1977	39.3
1978	79.8
1979	38.9
1980	45.8
1981	46.5
1982	56.3
1983	51.5
1984	58.4
1985	40.9
1986	55.5
1987	70.5
1988	35.6
1989	37.3
1990	62.0
1991	40.0
1992	61.2
1993	43.4
1994	39.3
1995	24.7
1996	27.2
1997	30.4
1998	37.3
1999	22.7
2000	66.8
2001	80.0
2002	26.6
2003	28.3
2004	74.0
2005	64.0
2006	91.7
2007	36.0
2008	45.0
2009	47.4
2010	28.0
2011	28.8
2012	23.9
2013	48.6
2014	47.8

2015	16.2

Nuevamente solo se analizaron los ajustes de las probabilidades teóricas de las funciones Gumbel y LogNormal. Al igual que en el análisis del 2008, la función Gumbel se calculó en una hoja de Excel y la LogNormal mediante un paquete estadístico. Los resultados de las funciones probabilísticas de predicción (Tabla III) muestran que la función LogNormal presenta valores más extremos en su función teórica de predicción que la de la probabilidad teórica de Gumbel. En cuanto a la comparación contra el registro histórico, se observa que para periodos de retorno de hasta 10 años, ambas funciones ajustan apropiadoramente los datos, en tanto que para periodos de retorno mayores de hasta 100 años, la Lognormal ajusta mejor, además de presentar valores más extremos.

Tabla III. Análisis Estadístico propio (2015).

P(x)	TR (años)	P T Gumbel 2015 AP	PT LOGNORMAL 2015 AP
0.01	10000	180.305034	219.01
0.1	1000	143.954988	164.12
0.2	500	133.006771	148.91
0.5	200	118.520716	129.62
1	100	107.540694	115.6
2	50	96.5204601	102.01
4	25	85.4182496	88.76
5	20	81.814252	84.557
10	10	70.4528203	71.57
20	5	58.6084214	58.49
50	2	40.7189316	39.75
70	1.428571	32.0042136	31.25
80	1.25	27.4229116	27.02
90	1.111111	21.7700775	22.08
99	1.010101	10.8297622	13.67
99.9	1.001001	4.43008802	9.63

V.2. COMPARACIÓN DE LAS DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD DISPONIBLES Y EL REGISTRO HISTÓRICO

Todas las diferentes distribuciones de lluvia disponibles se compendiaron en una sola Tabla (Tabla IV), para mostrar las diferencias entre ellas. Las tendencias observadas se mantienen, es decir, para periodos de retorno de hasta 25 años, los datos calculados son muy similares. En tanto que para eventos hidrometeorológicos asociados con periodos de retorno mayores, las distribuciones teóricas ajustadas por la función LogNormal son las que prevalecen con los valores de altura de lluvia de mayor calado. Sin embargo, entre las Lognormales del 2008 y la de 2015 hay una diferencia de hasta 12 mm entre la Logonormal 2008 por Análisis Propio para eventos de seguridad hidrológica de presas de almacenamiento, y de 4 mm para TR 500. En TR 100, los valores son prácticamente iguales. La función Gumbel se despega a la baja para eventos mayores a TR 100, en tanto que la lluvia adoptada en el Atlas 2016, se mantiene al alza en eventos de 10, 000 años, pero se despega a la baja de las demás funciones para eventos ordinarios.

Tabla IV. Compendio de Distribuciones.

P(x)	TR (años)	PTLOGNORMAL 2008 PROPIO	PT LOGNORMAL 2008	PT LOGNORMAL 2015 PPROPIO	P. Gumbel 2015 AP	P MAX ATLAS 2016
0.01	10000	207.44	218.72	219.01	180.31	220.33
0.1	1000	157.61	154.63	164.12	143.95	154.03
0.2	500	143.68	142.56	148.91	133.01	140.55
0.5	200	125.93	123.25	129.62	118.52	122.72
1	100	112.46	112.17	115.6	107.54	109.2
2	50	100.32	99.49	102.01	96.52	95.63
4	25	87.94	87.51	88.76	85.42	80.54
5	20	83.66	83.48	84.557	81.81	77.53
10	10	71.74	71.56	71.57	70.45	63.54
20	5	59.3	59.28	58.49	58.61	48.96

50	2	41.3	41.37	39.75	40.72	32.12
70	1.428571	32.98	32.98	31.25	32.00	
80	1.25	28.82	28.82	27.02	27.42	
90	1.111111	23.92	23.92	22.08	21.77	
99	1.010101	15.47	15.47	13.67	10.83	
99.9	1.001001	11.3	11.3	9.63	4.43	

El grafico de comparación de las distribuciones disponibles (Figura V.2.1.) muestra que todas las distribuciones, excepto la del Atlas 2016, presentan un ajuste muy razonable con los registros históricos para periodos de retorno ordinarios. Para eventos entre 25 y 100 años de periodo de retorno, todas las distribuciones Log normales se apegan favorablemente a los datos históricos. En tanto que para TR 500, las diferencias entre las Lognormales del 2008 y la del 2015 por Análisis Propio, existe una diferencia de menos de 6 mm en TR 500 y menos de 3 mm en TR 100.

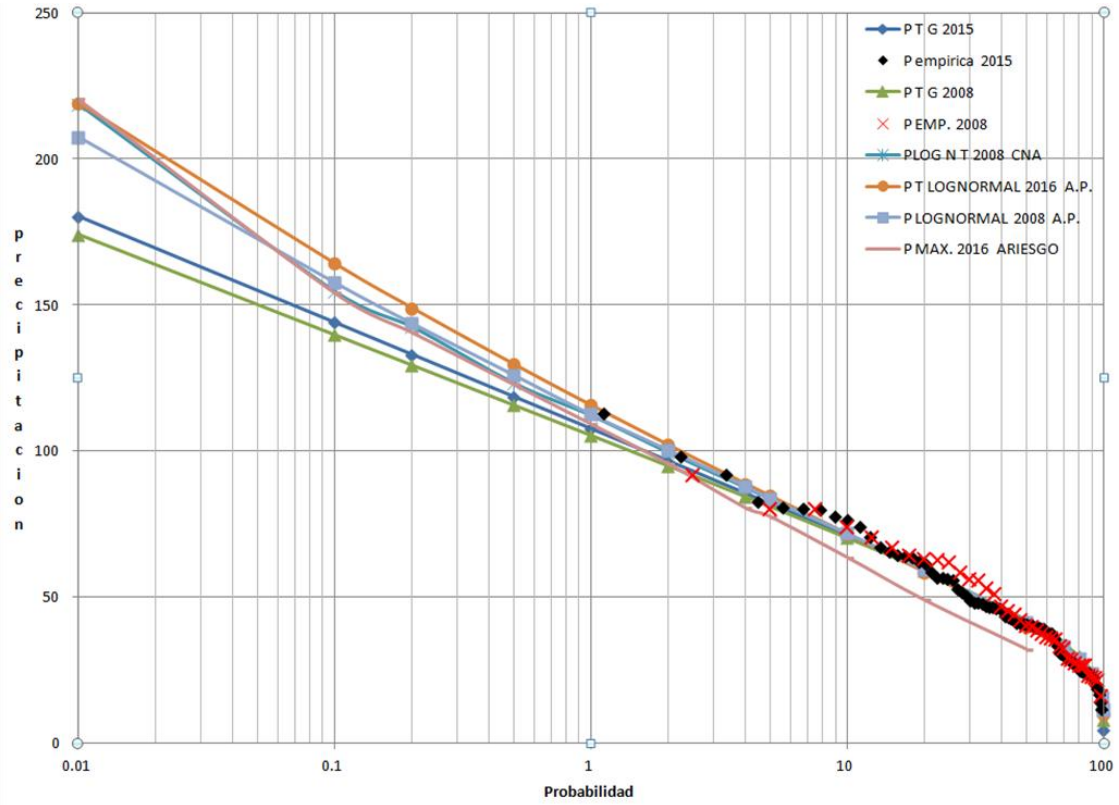


Figura V.2.1. Comparación de Resultados del análisis estadístico al 2016.

El criterio de selección de la lluvia de diseño, en base a los análisis comparativos realizados en las diferentes distribuciones disponibles, es el de utilizar una función Lognormal, ya que prácticamente todas estas distribuciones presentan consistencia prácticamente hasta TR 500. El sentido común indicaría, que debiera utilizarse la lluvia con registros hasta el 2015. Sin embargo, dado que el objetivo global de este proyecto es el de determinar, en primer instancia, cuales desarrollos del Registro Único de Vivienda (RUV) del INFONAVIT están afectados hidrológicamente ante una lluvia de diseño de 25 años, aunado al hecho de que el análisis de CENAPRED indica que solo el 7% se desarrolló urbanísticamente después del 2008, la UACJ propone que se adopte como lluvia de diseño la lluvia disponible el *Estudio, Estrategias y Propuestas para el Control y Manejo de Agua Pluvial en las Zonas Sur y Oriente de Ciudad Juárez*

(IMIP, 2009), la cual corresponde a la Tormenta de Diseño avalada por CONAGUA el 2014 para la UACJ.

En base a lo anterior, la tormenta de diseño propuesta para la modelación es la correspondiente a la Lognormal 2008.

Tabla V. Distribución de las precipitaciones por TR.

TR	Plan Sectorial	Distr. Normal 2008	Distr. Log Normal 2008	Gumbel 2008	ATLAS 2016	Dist. Lognomral 2008 A.P	Dist. Lognomral 2016 A.P	ADOPTADA
2	41.3	45.22	41.37	42.30	32.12	41.3	39.75	41.37
5	54.0	61.32	59.28	61.79	48.96	59.3	58.49	59.28
10	66.8	69.73	71.56	74.69	63.54	71.74	71.57	71.56
20		76.68	83.48	87.05	77.53	83.66	84.557	83.48
25	84.0	78.7	87.51	91.00	80.54	87.94	88.76	87.51
50	96.8	84.5	99.49	103.10	95.63	100.32	102.01	99.49
100	110.0	89.7	112.17	115.10	109.2	112.46	115.6	112.17
200		94.5	123.25	127.00	122.72	125.93	129.62	123.25
500	140.0	100.27	142.56	143.00	140.55	143.68	148.91	142.56
1000	153.0	104.32	154.63	155.00	154.03	157.61	164.12	154.63
10000	196.0	116.35	218.72	191.00	220.33	207.44	219.01	218.72

Por lo que la tormenta de diseño a distribuirse en 24 horas seria entonces a siguiente:

Tabla VI. Distribución de la precipitación en Log-Normal.

TR	PRECIPITACIÓN (mm)
2	41.37
5	59.28
10	71.56
20	83.48
25	87.51
50	99.49
100	112.17
200	123.25
500	142.56
1000	154.63
10000	218.72

IV.3 DISTRIBUCIÓN DE LA LLUVIA EN EL TIEMPO PARA 24 HORAS

La distribución de la lluvia durante una tormenta de 24 horas, utilizada en el PSMAP se muestra en la siguiente tabla:

Tabla VII. Distribución pluvial para una lluvia de 24 horas.

HORA	PERIODO DE RETORNO EN AÑOS										
	2	5	10	20	25	50	100	200	500	1000	10000
5 minutos	8.27	11.86	14.31	16.70	17.50	19.90	22.43	24.65	28.51	30.93	43.74
15 minutos	16.55	23.71	28.62	33.39	35.00	39.80	44.87	49.30	57.02	61.85	87.49
1 hora	20.69	29.64	35.78	41.74	43.76	49.75	56.09	61.63	71.28	77.32	109.36
2 horas	23.99	34.38	41.50	48.42	50.76	57.70	65.06	71.49	82.68	89.69	126.86

3 horas	26.06	37.35	45.08	52.59	55.13	62.68	70.67	77.65	89.81	97.42	137.79
6 horas	30.61	43.87	52.95	61.78	64.76	73.62	83.01	91.21	105.49	114.43	161.85
12 horas	35.58	50.98	61.54	71.79	75.26	85.56	96.47	106.00	122.60	132.98	188.10
24 horas	41.37	59.28	71.56	83.48	87.51	99.49	112.17	123.25	142.56	154.63	218.72

I. MODELADO HIDROLOGICO

V.1. RECONOCIMIENTO DE CAMPO DE LA CUENCA BARREAL

Figura V.1.1. Levantamiento de puntos de control en las subcuencas.

Figura V.1.2. Visita a los diferentes vasos de captación.

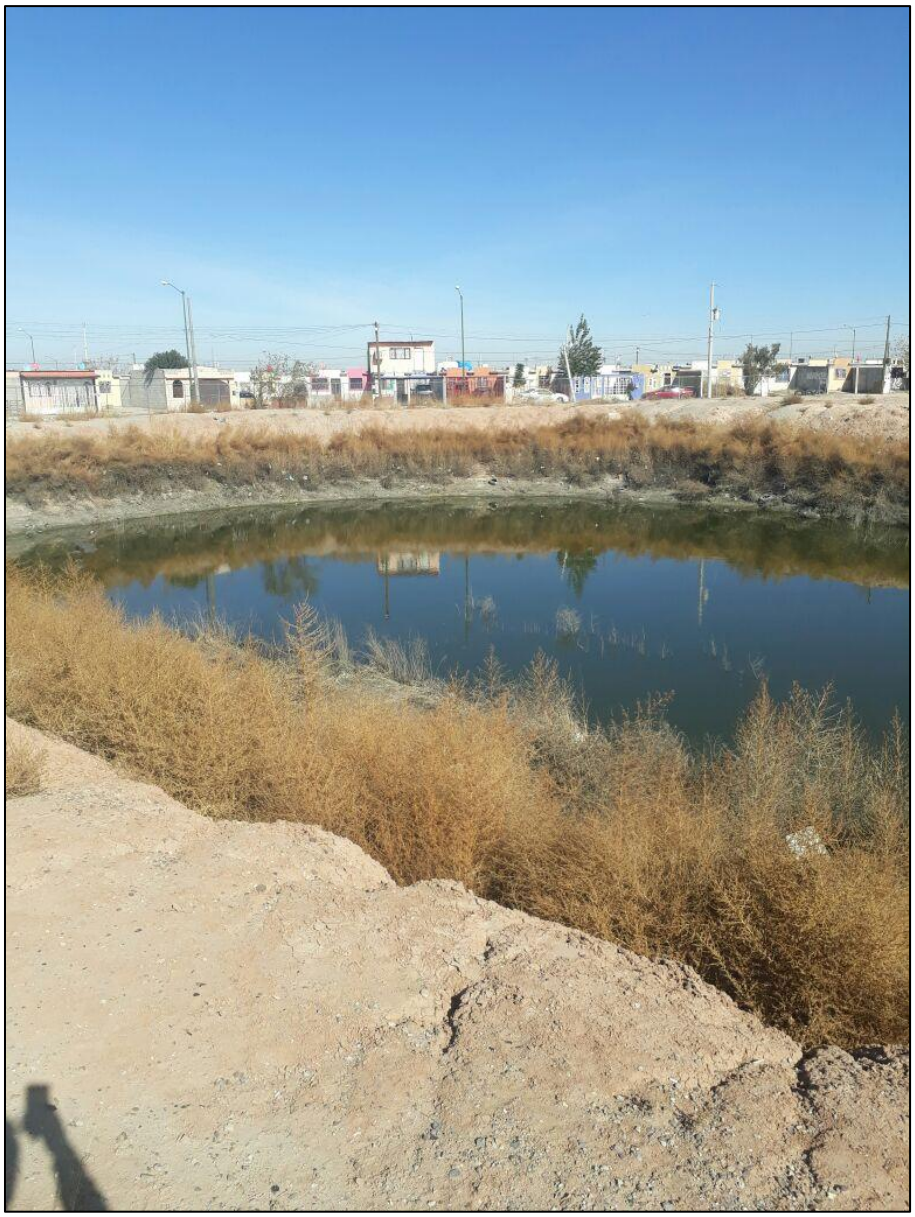


Figura V.1.3. Visita a los fraccionamientos que cuentan con vasos de captación.

Figura V.1.4. Visita a los fraccionamientos que cuentan con vasos de captación.

V.2. ANALISIS DE LOS ESCURRIMIENTOS EN CONDICIONES ACTUALES

El análisis realizado en el paquete computacional Hec-GeoHMS reveló seis subcuencas definidas 100 vasos de captación e infiltración de escurrimientos (Figuras V.2.1 a la V.2.6). Los escurrimientos fluyen a través del bombeo de las calles en dirección a los vasos de captación principalmente, aunque en algunos casos, una microcuenca determinada drena sus excedentes de volumen a las cuencas que le circundan.

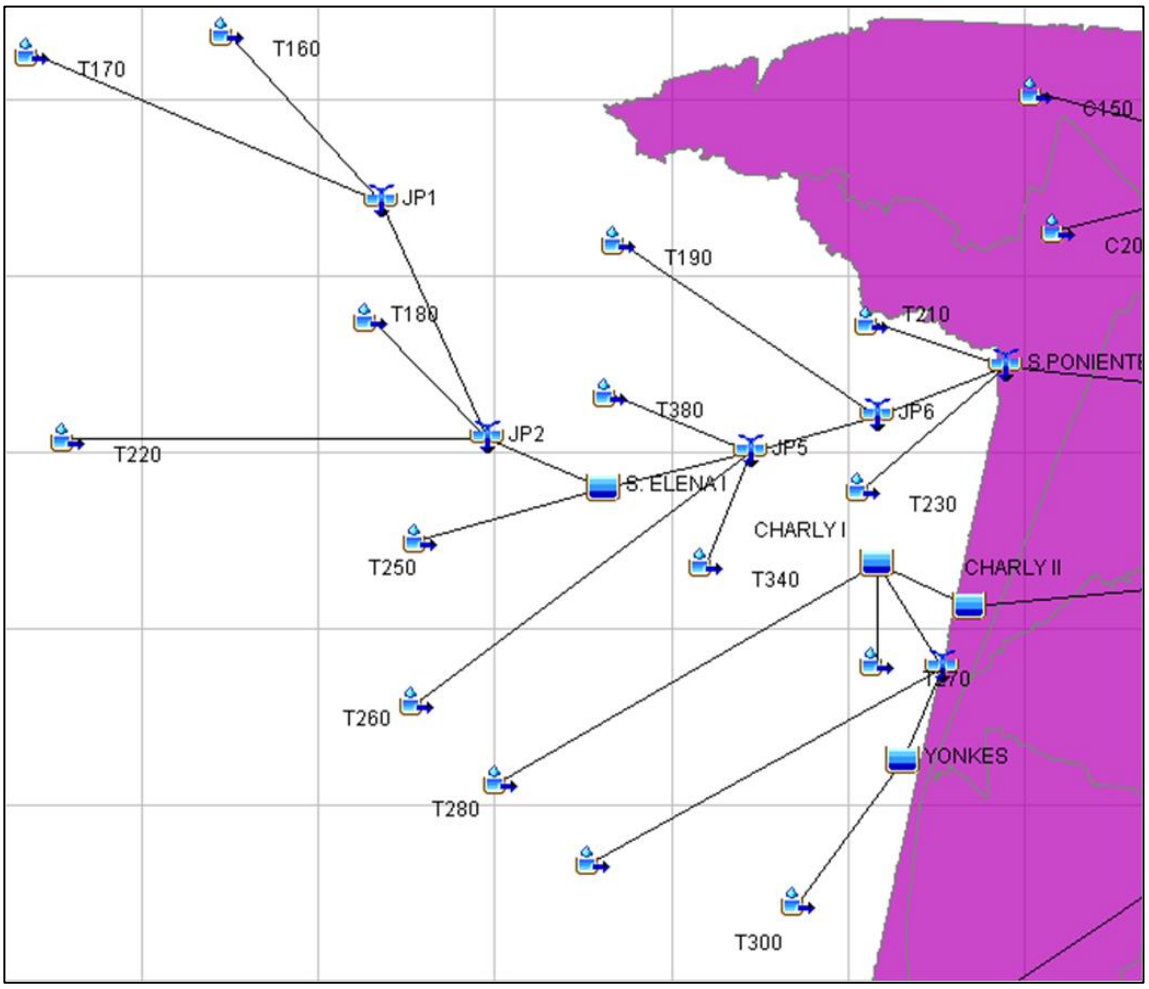


Figura V.II.1. Subcuenca Poniente con elementos hidrológicos y escurrimientos principales.

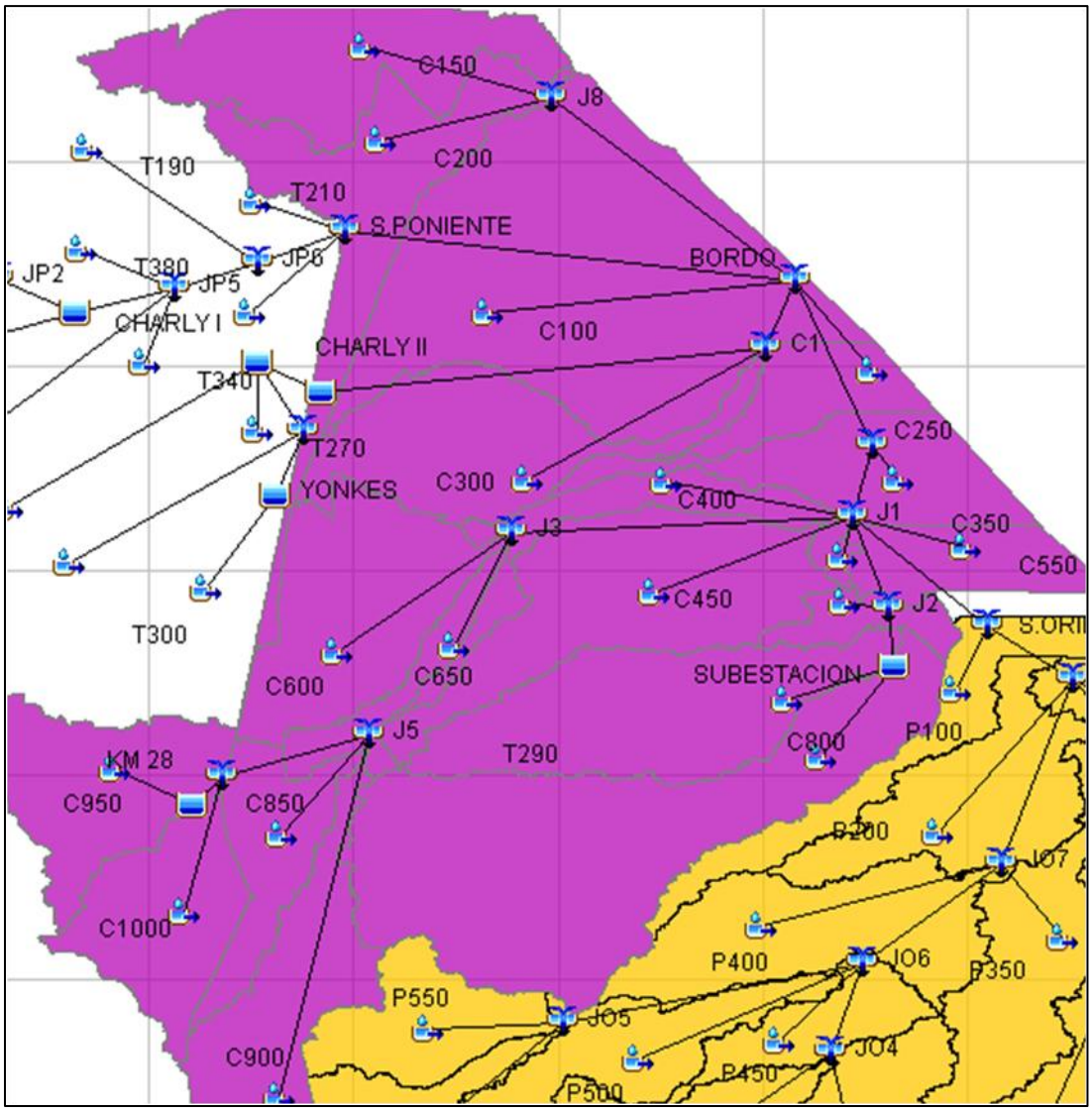


Figura V.2.2. Subcuenca Centro con elementos hidrológicos y escurrimientos principales.

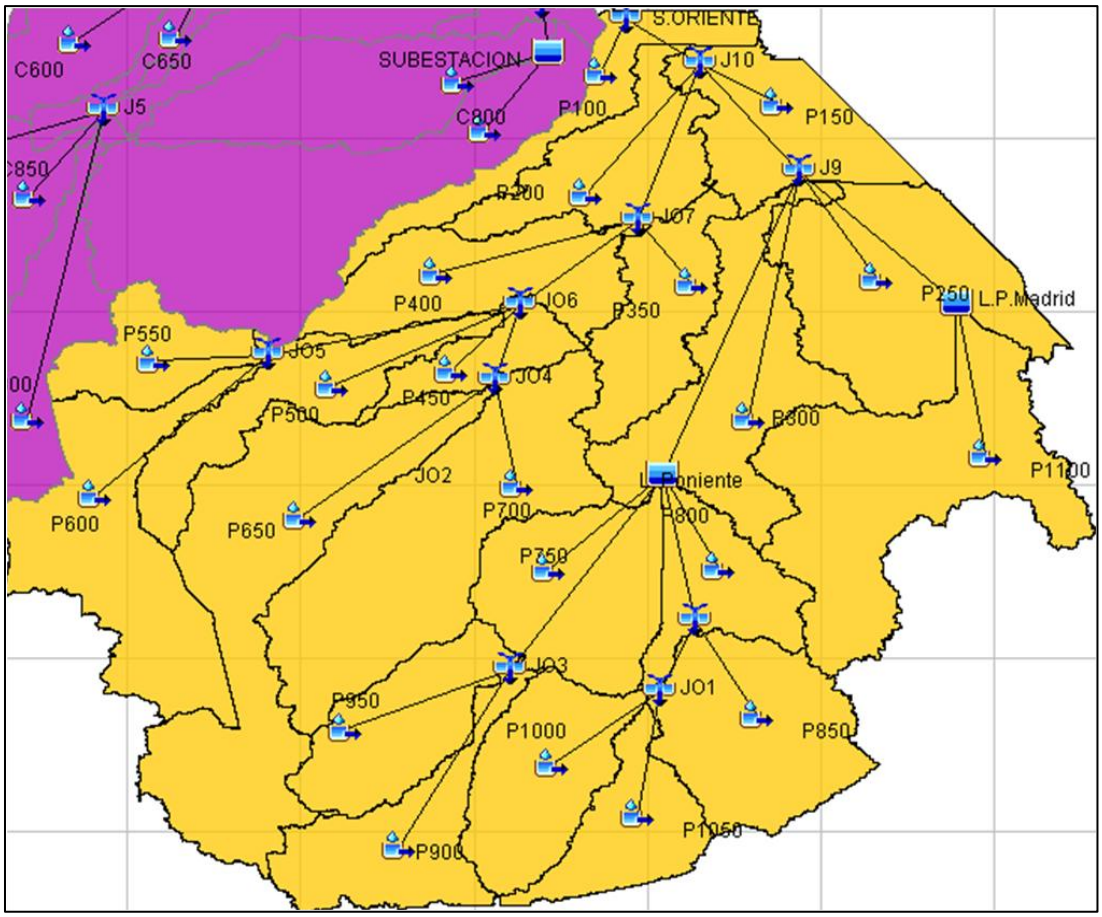


Figura V.2.3. Subcuenca Oriente con elementos hidrológicos y escurrimientos principales.

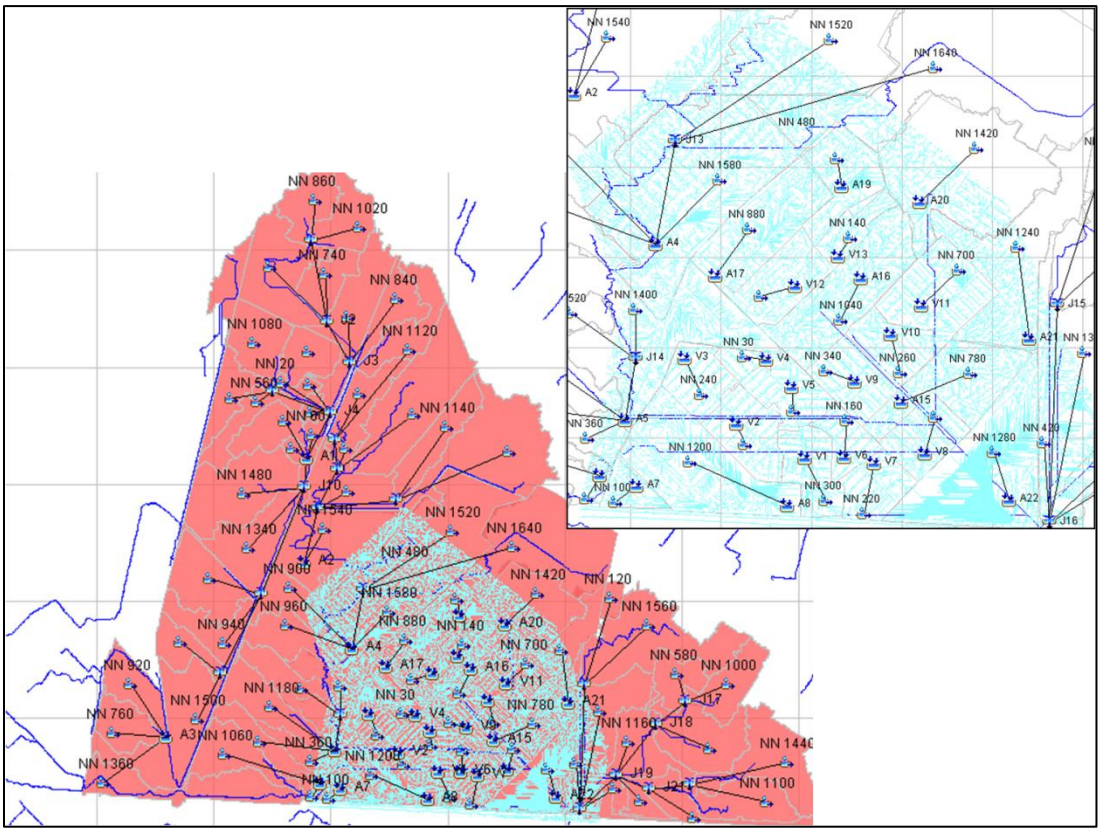


Figura V.2.4. Subcuenca Norte con elementos hidrológicos y escurrimientos principales.

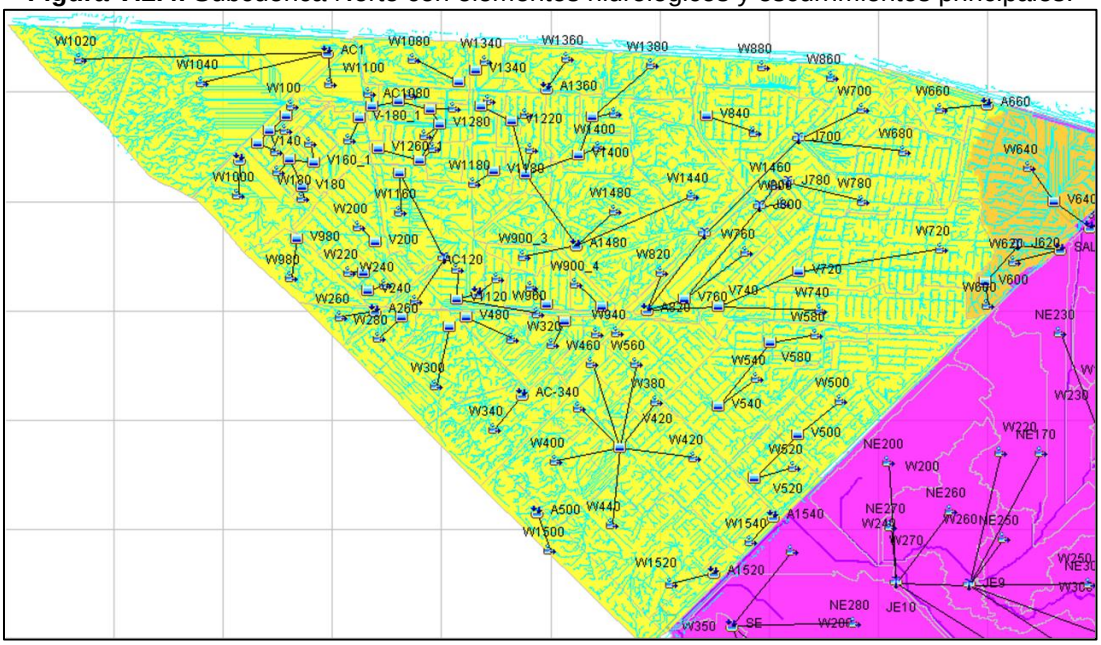


Figura V.2.5. Subcuenca Triangulo con elementos hidrológicos y escurrimientos principales.

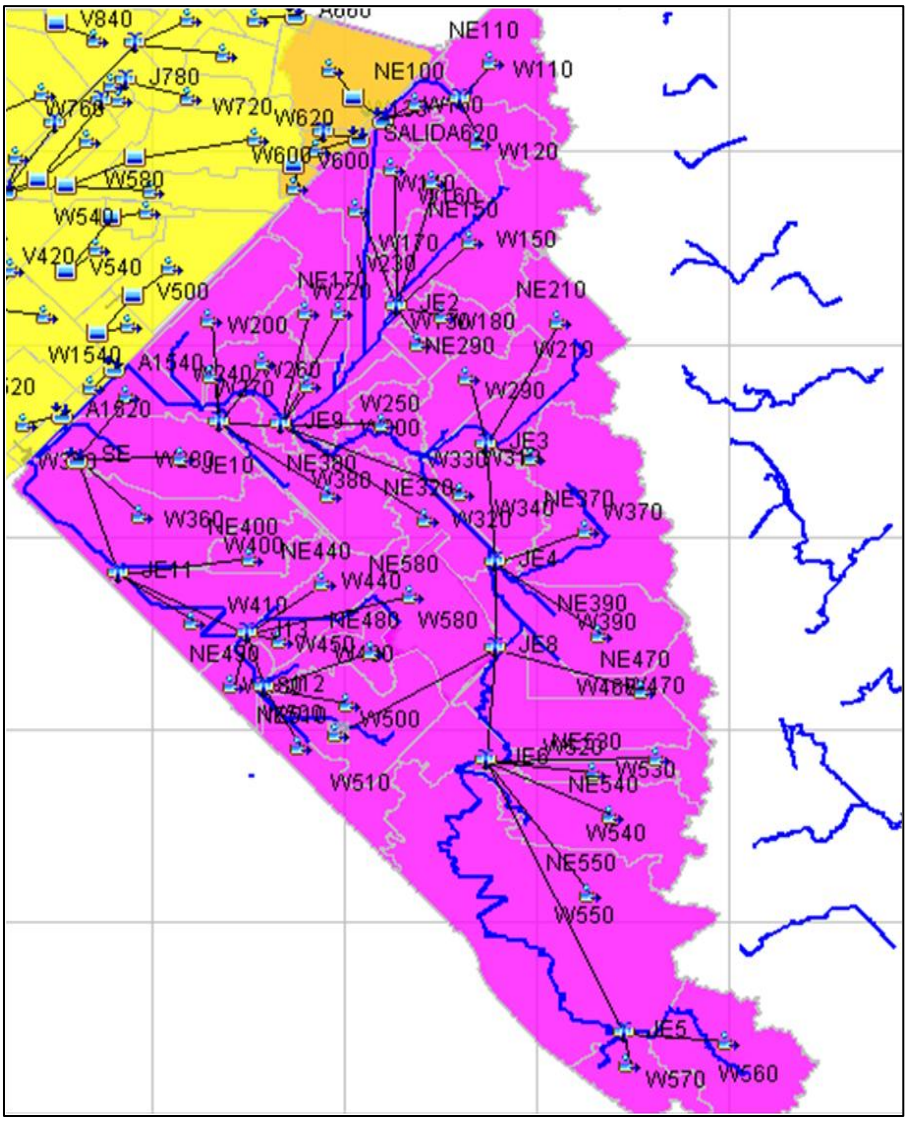


Figura V.2.6. Subcuenca Sur con elementos hidrológicos y escurrimientos principales.

V.2.1 GENERACIÓN DE NÚMERO DE ESCORRENTÍA (CN)

El número de escurrimiento, depende del tipo de superficie y uso de suelo, en este caso en general para la subcuencas se identifican diferentes números de curva y porcentajes de impervious, asociados con pavimentación, que reflejan la condición hidrológica del terreno (Tabla VIII). Aun y cuando predomina el proceso de urbanización, se identifican algunas áreas no urbanizadas así como parques y vasos de captación que contribuyen a mejorar la conversión lluvia escurrimiento, aunque que la mayoría de las microcuencas muestran altos porcentajes de terreno impermeabilizado.

Tabla VIII. Numero de Curva y % de impervious de manera general utilizadas en la modelación hidrológica.

NUMERO DE CURVA	IMPERVIOUS	SITIO
69	0	Zona no urbana con suelo natural propio de la cuenca
65	10	Zona urbana en desarrollo, aún con suelo natural propio de la cuenca
77	62	Zona Urbana
80	65	Zona Urbana y parque industrial

V.2.3 DETERMINACIÓN DE LOS TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN Y DE RETRASO (DESFASE)

Se procedió a seleccionar y organizar la información, identificando los datos hidrológicos y recomendaciones pertinentes para las subcuenca y microcuencas, determinando los datos físicos de cada una de ellas tales como área, longitud de cauce, pendiente promedio, tipo de suelo y la infraestructura pluvial existente. Con esta información se adoptaron y calcularon los coeficientes de escurrimiento y los tiempos de concentración y retraso para sitios de interés previamente seleccionados.

Se utilizaron los datos de longitud de recorrido del agua y pendiente promedio del cauce para calcular los tiempos de concentración mediante la Ecuación de Kirpich, considerando el tiempo de retraso como el 60% del tiempo de concentración.

El tiempo de concentración fue calculado con la ecuación de Kirpich:

$$T_c = \frac{(0.000325 \times L^{0.77})}{(S^{0.385})}$$

Donde:

T_c= Tiempo de concentración (minutos).

L= Longitud máxima de salida (microcuenca) (metros)

S= Pendiente media (m/m)

El tiempo de retraso (T_r) fue calculado como el 60% del tiempo de concentración en horas:

$$T_r = 0.6\ T_c$$

VI. RESULTADOS DE MODELO HIDROLÓGICO EN CONDICIONES ACTUALES

Con los datos anteriores de las estructuras de regulación, las características de las cuencas hidrológicas y los datos calculados de precipitación para periodos de retorno, se elaboró el modelo de simulación hidrológico para los gastos máximos de un periodo de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años, incluyendo los resultados de la modelación de los hidrogramas de salida en cada subcuenca, la suma de los gastos del hidrograma en los puntos de cabecera de los tramos, el tránsito por los cauces definidos, la aportación del de cada microcuenca de salida para cada tramo y a la salida de la cuenca, así como un hidrograma de salida que define el caudal máximo de avenida para cada período de retorno considerado, tiempo en el que se produce dicho pico de caudal, y los volúmenes correspondientes de escorrentía producidas por la lluvia caída en la cuenca. Laja os resultados que a continuación se muestran, presentan a detalle la operación hidrológica e hidráulica del fraccionamiento Terranova (VI.1) y desarrollos circundantes, dado que el alcance de este estudio precisa que es en la zona más baja donde los estudios debían ser más precisos y detallados.

VI.1. SUBCUENCA PONIENTE

A continuación, se presenta el esquema de modelo hidrológico (Figura VI.1.1). Los resultados indican los gastos máximos y volúmenes que pasan por cada uno de los elementos que componen el modelo, como en la salida de uniones (Junction) y vasos de captación del modelo hidrológico de la subcuenca Poniente.

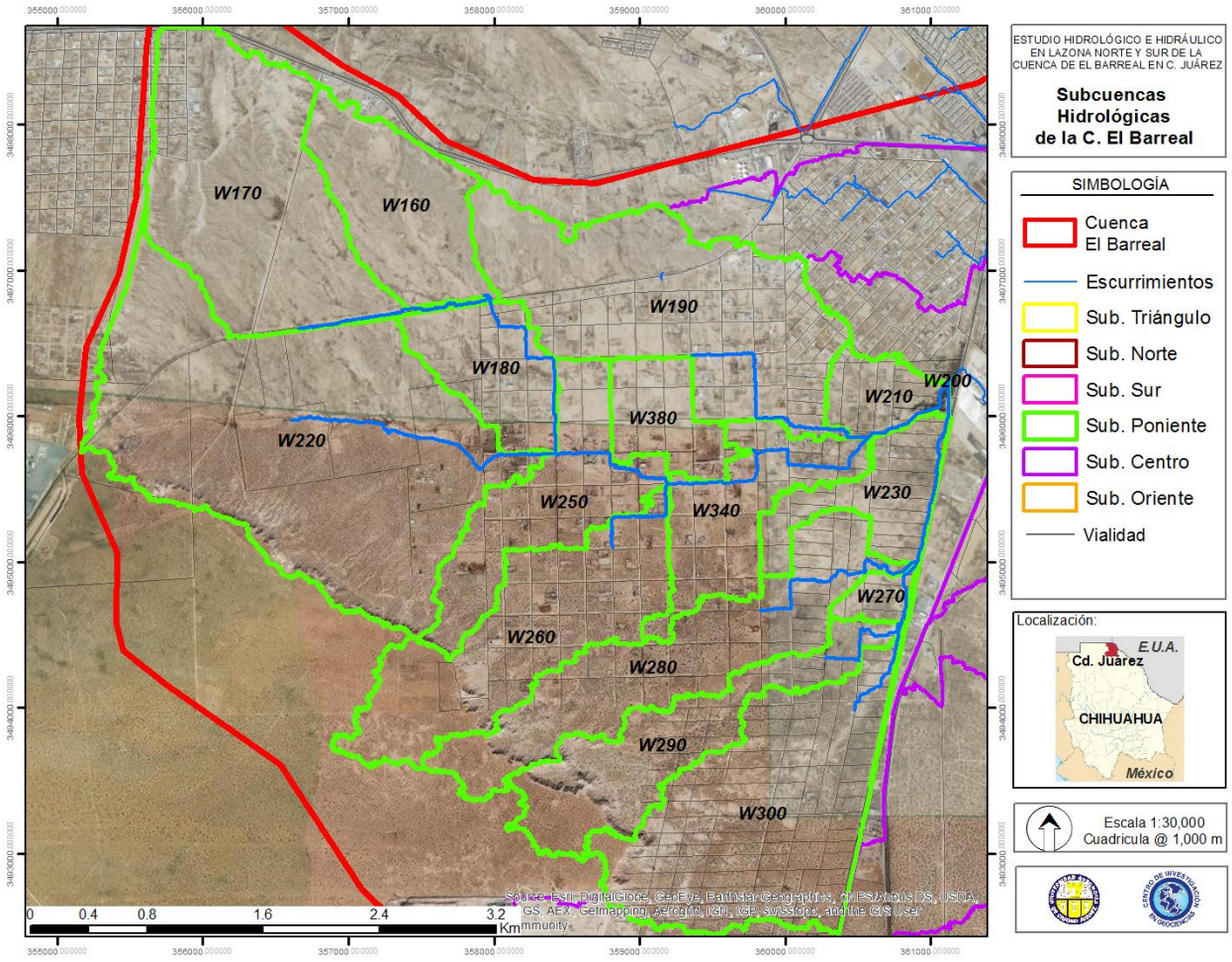


Figura VI.1. Escurrimientos y microcuencas hidrológicas de la sub. Poniente.

VI.2. SUBCUENCA CENTRO

A continuación, se presenta el esquema de modelo hidrológico (Figura VI.2.1). Los resultados indican los gastos máximos y volúmenes que pasan por cada uno de los elementos que componen el modelo, como en la salida de uniones (Junction) y vasos de captación del modelo hidrológico de la subcuenca Centro.

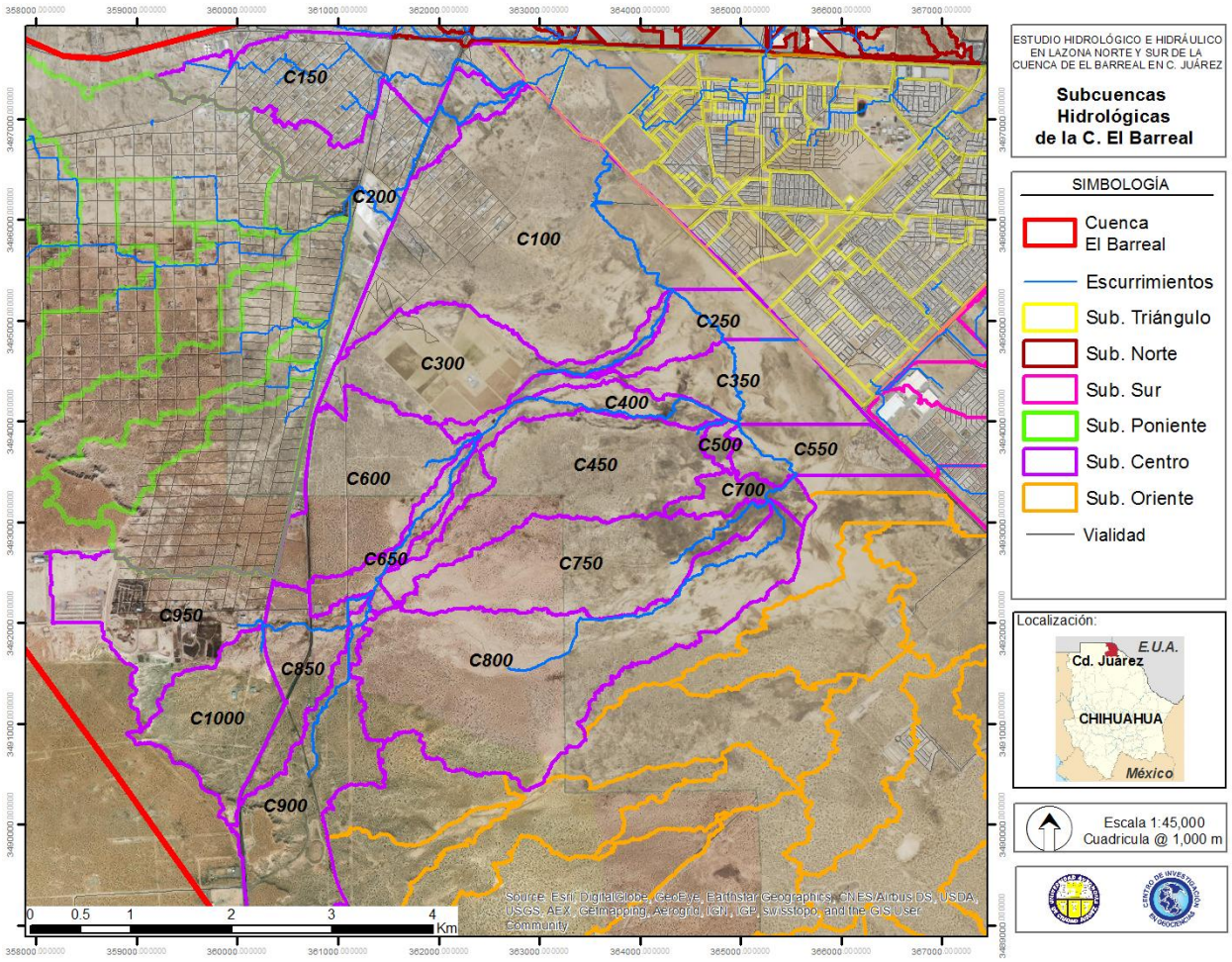


Figura VI.2.1. Escurrimientos y microcuencas hidrológicas de la sub. Centro.

VI.3. SUBCUENCA SURPONIENTE

A continuación, se presenta el esquema de modelo hidrológico (Figura VI.3.1). Los resultados indican los gastos máximos y volúmenes que pasan por cada uno de los elementos que componen el modelo, como en la salida de uniones (Junction) y vasos de captación del modelo hidrológico de la subcuenca Oriente.

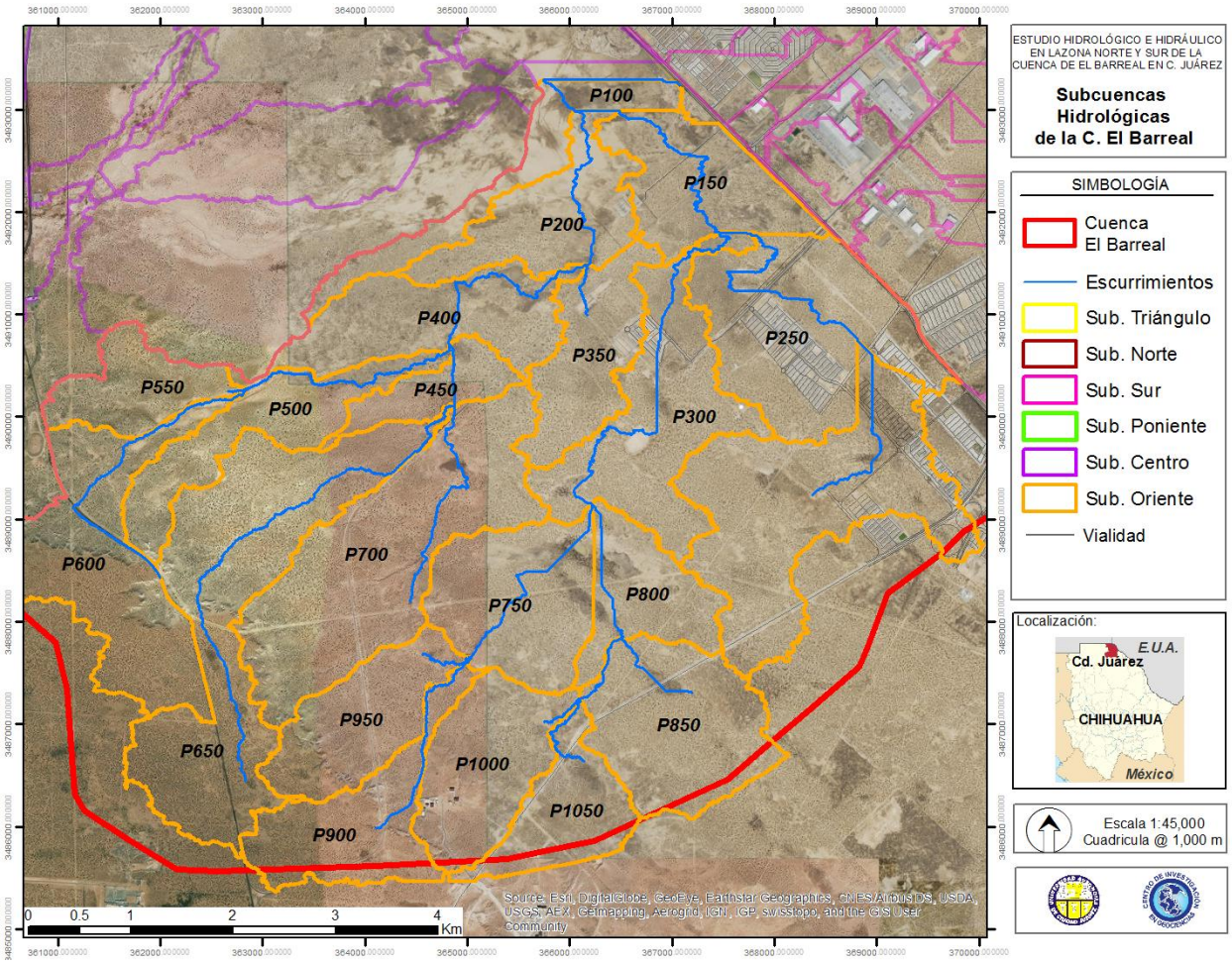


Figura VI.3.1. Escurrimientos y microcuencas hidrológicas de la sub. Oriente.

VI.4. SUBCUENCA NORTE

A continuación, se presenta el esquema de modelo hidrológico (Figura VI.4.1). Los resultados indican los gastos máximos y volúmenes que pasan por cada uno de los elementos que componen el modelo, como en la salida de uniones (Junction) y vasos de captación del modelo hidrológico de la subcuenca Norte.

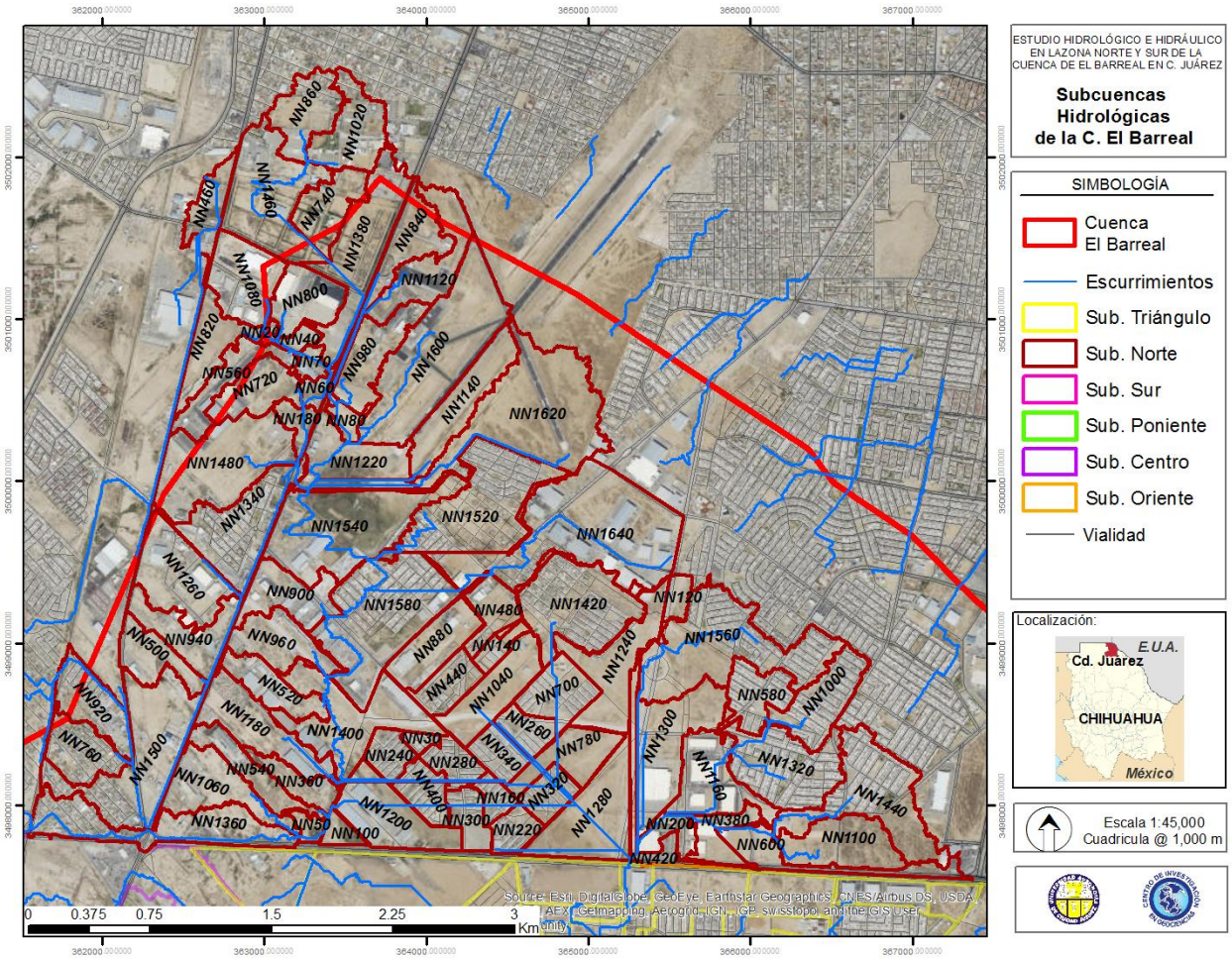


Figura VI.4.1. Escurrimientos y microcuencas hidrológicas de la sub. Norte.

Dado que cada desarrollo actúa prácticamente como una microcuenca cerrada, solo se muestran los resultados para la corrida de 100 años (Tabla VI.4.1.). Los demás

periodos de retronó están disponibles como anexos.

Tabla VI.4.1. Gastos máximos y volúmenes esperados periodo de retorno 100 años.

ELEMENTO HIDROLOGICO	ÁREA (Km^2)	DESCARGA PICO (m^3/S)	VOLUMEN (X1000 m^3)
A1	2.14646	16.8	173.5
A15	0.14297	0.9	8.8
A16	0.18395	2.2	11.3
A17	0.15967	1.4	15.2
A19	0.10624	1.7	8.6
A2	2.28136	16.1	150.5
A20	0.33362	4.8	32.1
A21	0.23478	1.9	14.4
A22	0.26466	1.1	16.2
A3	0.60195	7.9	58.2
A4	1.84525	18	164.6
A5	0.86048	9	59.3
A6	0.22537	2.6	16.2
A7	0.03749	0.5	2.3
A8	0.22381	2.5	21.7
J1	0.34029	4.8	33.5
J10	1.5791	11.2	129
J11	0.92651	6.7	75.7
J12	0.51978	2.9	42
J13	1.06017	9.3	91.8
J14	0.43864	4.7	31.6
J15	0.49947	4.7	42.9
J16	2.4851	26.7	214.9
J17	0.30308	3.4	23.6
J18	0.58529	7.5	52.1
J19	1.55563	19	138.9
J2	0.82136	9.5	64.2
J20	0.53459	5.6	44.5
J21	0.67019	7.3	58.2
J3	1.27968	12.2	92.3
J4	0.34435	3.9	28.5
J5	0.26989	3.1	21.6
J6	0.36469	3.1	24.7
J7	0.89667	8.6	60.1

J8	0.71493	5.1	43.8
J9	1.83982	14.5	118
NN 100	0.03749	0.5	2.3
NN 1000	0.17574	1.5	10.8
NN 1020	0.18127	2.6	18.3
NN 1040	0.18395	2.2	11.3
NN 1060	0.1931	2.3	14.2
NN 1080	0.19387	2.9	19.6
NN 1100	0.19545	1.9	12
NN 1120	0.19756	1.5	13.2
NN 1140	0.2005	1.7	12.3
NN 1160	0.20849	3.1	21.1
NN 1180	0.21724	2.1	13.3
NN 120	0.04026	0.5	2.5
NN 1200	0.22381	2.5	21.7
NN 1220	0.22822	1.9	14
NN 1240	0.23478	1.9	14.4
NN 1260	0.24471	3.5	23.5
NN 1280	0.26466	1.1	16.2
NN 1300	0.26813	2	16.8
NN 1320	0.28221	4.2	28.5
NN 1340	0.28431	5.4	28.7
NN 1360	0.2978	4.1	29.2
NN 1380	0.31046	2.5	19
NN 140	0.04774	0.6	4.2
NN 1400	0.31749	3.3	21.8
NN 1420	0.33362	4.8	32.1
NN 1440	0.33914	3.7	32.6
NN 1460	0.34013	3.4	22.1
NN 1480	0.36828	1.2	24.7
NN 1500	0.3987	2.6	32.2
NN 1520	0.40191	4.5	37
NN 1540	0.44154	2.8	32.5
NN 1560	0.45921	4.5	40.5
NN 1580	0.46134	6.2	46.6
NN 160	0.04812	0.9	4.9
NN 1600	0.49548	6.5	33.2
NN 1620	0.51443	3.6	31.5
NN 1640	0.65826	5.1	54.8
NN 180	0.04928	0.3	3

NN 20	0.01189	0.2	1.2
NN 200	0.06608	1	6.7
NN 220	0.06666	1.1	6
NN 240	0.06981	1.3	7.1
NN 260	0.07349	1.4	7.4
NN 280	0.07731	1.4	7.8
NN 30	0.0225	0.4	2.3
NN 300	0.07888	1.5	8
NN 320	0.07918	1.2	8
NN 340	0.08095	1.5	8.2
NN 360	0.08296	0.8	5.1
NN 380	0.09166	1.1	7.4
NN 40	0.02744	0.4	2.2
NN 400	0.092	1.8	9.3
NN 420	0.09579	0.7	9.7
NN 440	0.09666	1.7	9.8
NN 480	0.10624	1.7	8.6
NN 50	0.03227	0.4	2
NN 500	0.12108	1.8	9.8
NN 520	0.12115	1.6	9.8
NN 540	0.12164	1.4	9.3
NN 560	0.12654	1.9	12.8
NN 580	0.12734	1.9	12.9
NN 60	0.03386	0.5	3.3
NN 600	0.1356	1.7	13.7
NN 70	0.03513	0.7	3.5
NN 700	0.13907	1.3	14
NN 720	0.13987	1.5	9.6
NN 740	0.14094	1.4	8.6
NN 760	0.14285	2.3	13.5
NN 780	0.14297	0.9	8.8
NN 80	0.0365	0.4	2.2
NN 800	0.14309	1.4	8.8
NN 820	0.14335	1.2	8.8
NN 840	0.14786	0.6	9.1
NN 860	0.15902	2.2	15.2
NN 880	0.15967	1.4	15.2
NN 900	0.16038	3.1	16.2
NN 920	0.1613	2	15.5
NN 940	0.16202	1	10.1

NN 960	0.16336	1.6	10
NN 980	0.16713	1.7	11.5
V1	0.07888	1.5	8
V10	0.07349	1.4	7.4
V11	0.13907	1.3	14
V12	0.09666	1.7	9.8
V13	0.04774	0.6	4.2
V2	0.092	1.8	9.3
V3	0.06981	1.3	7.1
V4	0.0225	0.4	2.3
V5	0.07731	1.4	7.8
V6	0.04812	0.9	4.9
V7	0.06666	1.1	6
V8	0.07918	1.2	8
V9	0.08095	1.5	8.2

VI.5. SUBCUENCA TRIÁNGULO

A continuación, se presenta el esquema de modelo hidrológico (Figura VI.5.1). Los resultados indican los gastos máximos y volúmenes que pasan por cada uno de los elementos que componen el modelo, como en la salida de uniones (Junction) y vasos de captación del modelo hidrológico de la subcuenca Triangulo.

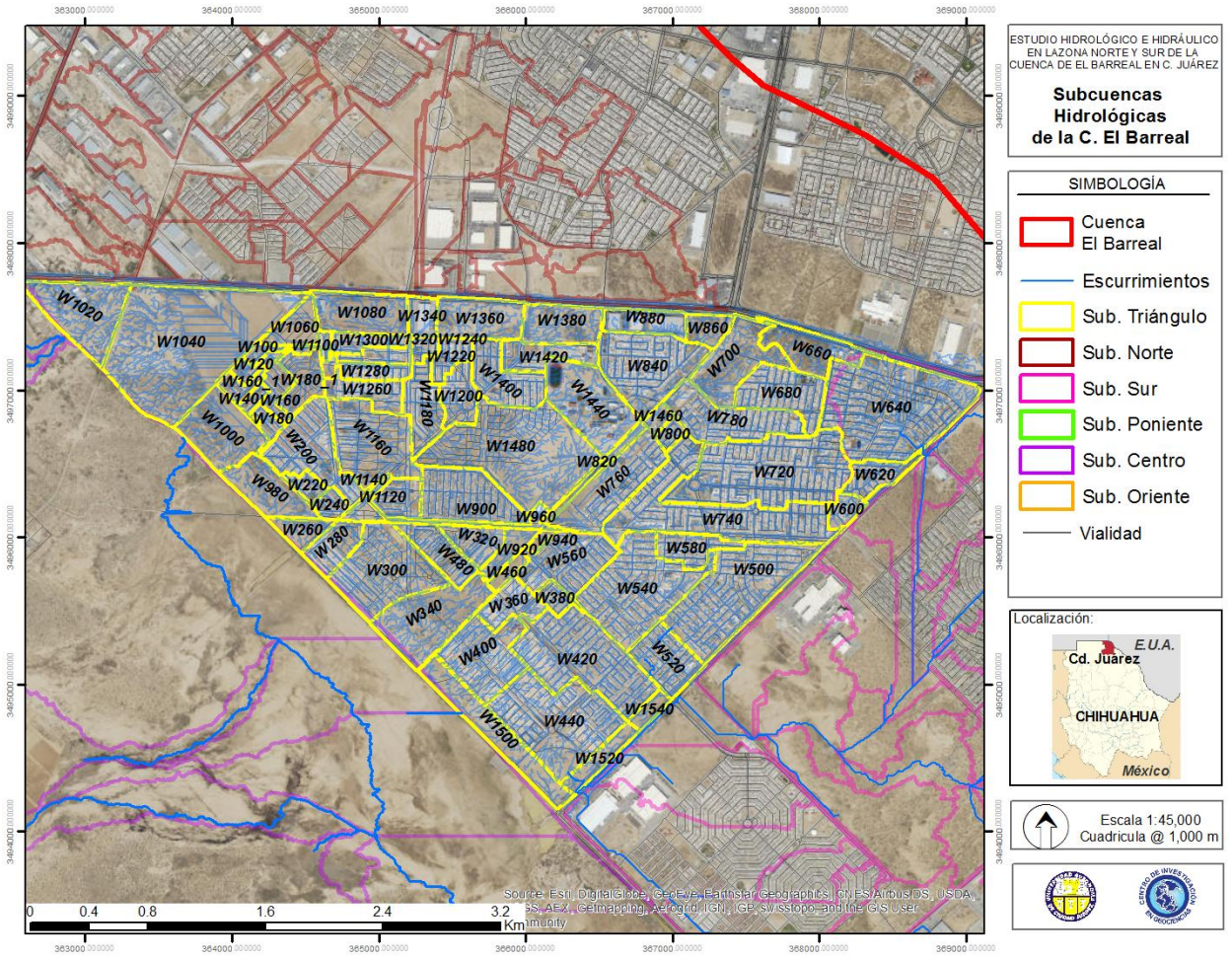


Figura VI.5.1. Escurrimientos y microcuencas hidrológicas para los fraccionamientos de la sub. Triangulo.

Dado que cada desarrollo actúa prácticamente como una microcuenca cerrada, solo se muestran los resultados para la corrida de 100 años (Tabla VI.5.1.). Los demás

periodos de retronó están disponibles como anexos.

Tabla VI.5.1. Gastos máximos y volúmenes esperados periodo de retorno 100 años.

ELEMENTO HIDROLOGICO	ÁREA (Km^2)	DESCARGA PICO (m^3/S)	VOLUMEN (X1000 m^3)
AC-340	0.26	1.6	14.8
AC1	1.782	12.8	104.3
AC1080	0.171	2.4	17.9
AC120	0.1659	1.6	13.6
AC3	0.204	1.8	11.8
A1360	0.158	1.1	10.1
A1480	1.4167	12.6	98.4
A1520	0.071	0.6	4.4
A1540	0.032	0.2	2
A260	0.061	0.5	3.5
A500	0.203	1.4	12
A660	0.142	1.6	10.7
A820	1.645	12.9	145
J160	0.039	0.5	3.8
J620	0.042	0.6	2.9
J700	0.376	3.8	29.6
J780	0.215	2.9	21.2
J800	0.053	0.9	4.6
J820	0.376	3.8	29.6
SALIDA620	0.121	1.8	10.8
SALIDA640	1.472562	15.8	136.8
V-180_1	0.094	0	0
V100	0.022	0.4	2
V1100	0.026	0.4	2.5
V1120	0.129	1.1	9.9
V1160	0.307	3.2	11.1
V1180	0.127	2	8.9
V120	0.055	0.9	5
V1200	0.576	7	38.2
V1220	0.087	0.6	3.8
V1240	0.029	0.2	1
V1260_1	0.295	0.5	6
V1260_2	0.295	1.7	14.7
V1280	0.202	1.2	10.1

V1300	0.084	0.9	4.5
V1320	0.133	0.5	4.1
V1340	0.054	0.9	4.6
V140	0.092	1.4	7.4
V1400	0.398	5.6	27.3
V1420	0.246	2.9	15.9
V160	0.057	0.8	3.2
V160_1	0.112	1.5	6.7
V180	0.032	0.7	1.6
V200	0.226	3.3	16.2
V220	0.036	0	0
V240	0.036	1	2.1
V280	0.092	1.3	8.4
V300	0.298	3.5	13.6
V320	0.1033	1.3	6.1
V420	1.364	11.5	63
V480	0.0837	0.4	2.6
V500	0.41	7.5	24
V520	0.554	9	26.4
V540	0.466	2	16.7
V580	0.093	2.7	5.4
V600	0.042	0.6	2.9
V640	0.544	5.8	54
V720	0.49	6.8	43
V740	0.94	7.1	87.6
V760	0.281	3.9	24.9
V840	0.286	4	24.9
V900_1	0.0854	1.6	5.5
V900_2	0.0406	0.4	2.9
V980	0.154	0	0
W100	0.022	0.4	2.1
W1000	0.204	1.8	11.8
W1020	0.232	2.3	14.6
W1040	0.77	4.6	44.6
W1060	0.78	6.9	45.1
W1080	0.171	2.4	17.9
W1100	0.026	0.4	2.8
W1120	0.077	1	7.6
W1140	0.039	0.5	3.8
W1160	0.268	2.7	22

W1180	0.127	1.8	12.1
W120	0.033	0.5	3.3
W1200	0.091	1.6	8.6
W1220	0.058	1.1	5.8
W1240	0.029	0.5	2.9
W1260	0.093	0.9	8.9
W1280	0.069	1.3	6.8
W1300	0.058	1.2	6.4
W1320	0.049	0.7	5.3
W1340	0.054	0.9	5.9
W1360	0.158	1.1	10.1
W1380	0.139	1.3	8.7
W140	0.037	0.7	3.7
W1400	0.152	2.2	15.1
W1420	0.107	1.5	10.4
W1440	0.246	3.5	23.4
W1460	0.025	0.3	1.8
W1480	0.539	2.6	31.2
W1500	0.203	1.4	12
W1520	0.071	0.6	4.4
W1540	0.032	0.2	2
W160	0.025	0.5	2.5
W160_1	0.055	0.8	5.4
W180	0.032	0.5	2.4
W180_1	0.094	0.7	7
W200	0.226	3.3	22.7
W220	0.036	0.7	3.6
W240	0.036	0.8	3.6
W260	0.061	0.5	3.5
W280	0.092	1.3	8.6
W300	0.298	2.5	17.6
W320	0.1033	0.8	9.1
W340	0.26	1.6	14.8
W360	0.092	1.4	9.1
W380	0.037	0.7	3.7
W400	0.224	2.6	22.4
W420	0.397	4.9	39.9
W440	0.386	3.4	37.6
W460	0.029	0.3	2
W480	0.0837	0.9	8

W500	0.41	4.8	40.7
W520	0.144	2.1	14.5
W540	0.373	5.5	37
W560	0.199	3.2	19.9
W580	0.093	1.7	9.2
W600	0.042	0.6	4
W620	0.079	1.3	7.9
W640	0.544	7.1	54
W660	0.142	1.6	10.7
W680	0.176	2.4	17.7
W700	0.2	1.4	11.9
W720	0.49	6.8	49.2
W740	0.45	5.1	44.6
W760	0.228	3.3	22.2
W780	0.215	2.9	21.2
W800	0.028	0.5	2.8
W820	0.048	0.4	2.9
W840	0.286	4	28.4
W860	0.059	0.7	3.4
W880	0.092	1.7	10
W900_1	0.0854	1.2	8.6
W900_2	0.0369	0.5	3.7
W900_3	0.0557	0.8	5.6
W900_4	0.0406	0.4	4.1
W920	0.055	0.5	3.2
W940	0.015	0.2	1
W960	0.052	0.3	4.1
W980	0.154	1.1	8.9

VI.6. SUBCUENCA SUR

A continuación, se presenta el esquema de modelo hidrológico (Figura VI.6.1). Los resultados indican los gastos máximos y volúmenes que pasan por cada uno de los elementos que componen el modelo hidrológico para cada periodo de retorno de la subcuenca Sur.

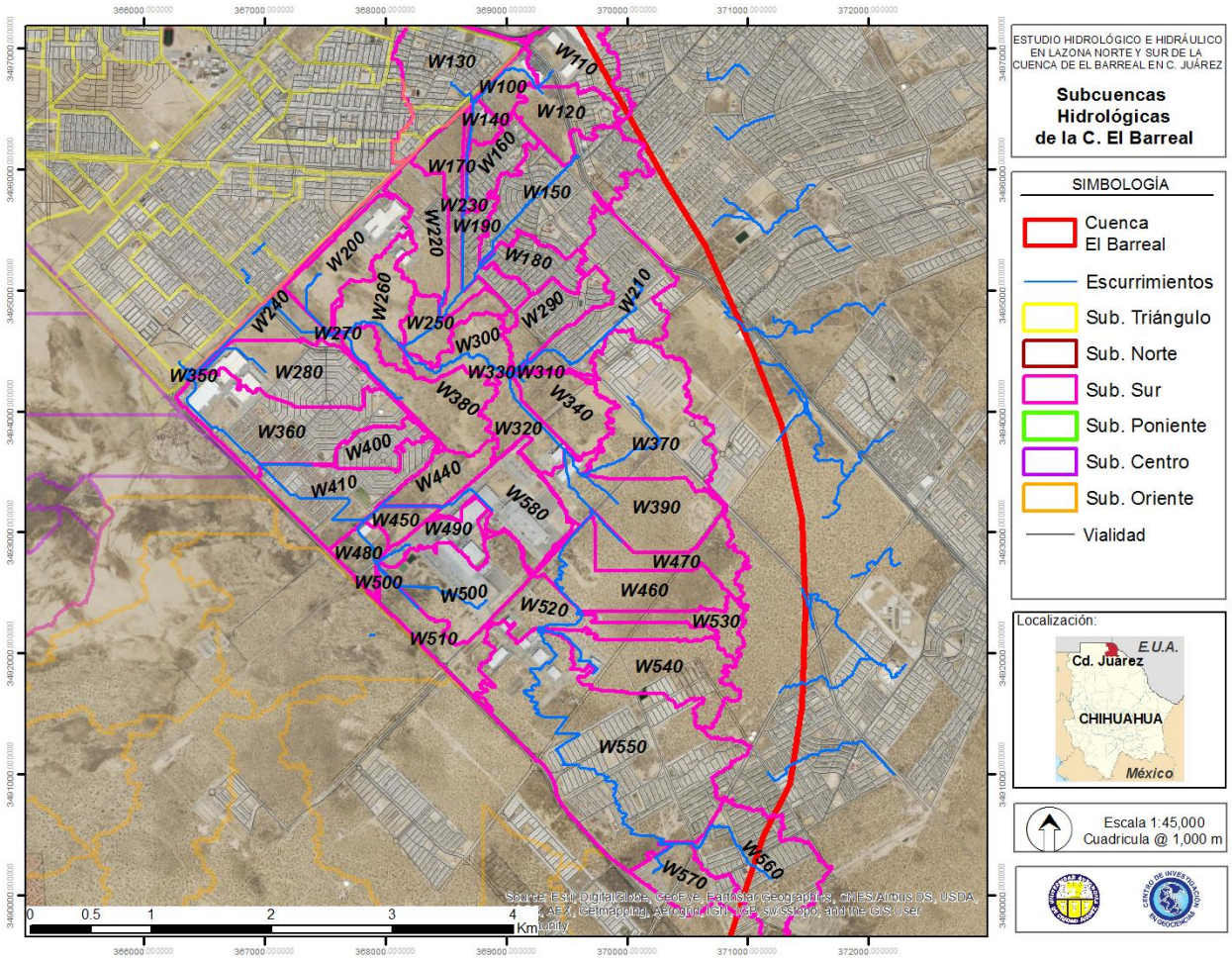


Figura VI.6.1. Escurrimientos y microcuencas hidrológicas para los fraccionamientos de la sub. Sur.

Dado que cada desarrollo actúa prácticamente como una microcuenca cerrada, solo

se muestran los resultados para la corrida de 100 años (Tabla VI.6.1). Los demás periodos de retorno están disponibles como anexos.

Tabla VI.6.1. Gastos máximos y volúmenes esperados periodo de retorno 100 años.

ELEMENTO HIDROLOGICO	ÁREA (Km^2)	DESCARGA PICO (m^3/S)	VOLUMEN (X1000 m^3)
JE1	0.781727	10.1	74.5
JE10	2.944317	23.5	201.5
JE11	2.976818	32.5	283.8
JE2	1.890755	19.9	180.3
JE3	8.058333	70.3	683.4
JE4	7.01501	60.4	584.6
JE5	1.007179	7.6	96
JE6	4.481305	40.3	405
JE8	5.387701	46.4	456.5
JE9	1.586397	11.5	106.4
J12	1.084074	10.3	103.4
J13	2.216079	24.8	211.3
NE100	0.146835	1.2	8.3
NE110	0.446484	5.4	42.6
NE120	0.335243	4.7	32
NE140	0.071975	0.6	6.9
NE150	0.838779	9.7	80
NE160	0.224888	3.2	21.4
NE170	0.042511	0.3	4.1
NE180	0.237269	3.3	22.6
NE190	0.207902	2.6	19.8
NE200	0.455884	5.6	43.5
NE210	0.703661	6.5	67.1
NE220	0.381957	5.2	36.4
NE230	0.309942	1.7	29.5
NE240	0.319874	1.6	18.2
NE250	0.24481	1.8	13.9
NE260	0.380678	3.2	21.6
NE270	0.011539	0.2	1.1
NE280	0.555601	4	53
NE290	0.32175	4.2	30.7
NE300	0.275794	1.9	15.7

NE310	0.017912	0.2	1
NE320	0.286929	1.2	16.3
NE340	0.354396	2.3	20.1
NE360	0.811353	5.2	77.4
NE370	0.92784	10.6	88.5
NE380	0.509819	3.3	28.9
NE390	0.699469	6.1	39.7
NE400	0.195769	2	18.7
NE410	0.56497	6.1	53.9
NE440	0.247364	3.3	23.6
NE450	0.112732	0.9	10.7
NE460	0.571867	3.9	32.5
NE470	0.334529	2.2	19
NE480	0.156965	1.3	15
NE490	0.232829	3.2	22.2
NE500	0.618217	8.1	58.9
NE510	0.308892	2.3	29.4
NE520	0.381295	2.3	21.6
NE530	0.193928	1.7	11
NE540	0.642601	5.3	61.3
NE550	2.256302	24.3	215.1
NE560	0.709196	7	67.6
NE570	0.297983	1.4	28.4
NE580	0.53908	7.3	51.4
SE	4.663646	38.1	432.3

VII. ANALISIS E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

La zona actualmente urbanizada requiere de una obra hidráulica de mitigación que contenga los escurrimientos que descienden de la cuenca, de forma que los desarrollos urbanos ya existentes regulen solamente los flujos generados por cuenca propia tal y como lo marca el PSMAP. Para ello, desde el 2016 se realizó un estudio de la operación hidráulica del BMMH en las condiciones imperantes en ese entonces. El modelo se realizó conforme a la tormenta de lluvia aprobada por la CONAGUA en la cual se aplica un esquema de ponderación de la lluvia ajustada por área de tormenta, de forma que se garantice que todo el volumen de la precipitación sea transformado de manera 100% efectiva a escurrimiento y perdidas por absorción.

El resultado de este análisis hidrológico (2016) se resume en las siguientes tablas:

TR100

ELEMENTO HIDROLOGICO	ÁREA (Km^2)	DESCARGA PICO (m^3/S)	VOLUMEN (X1000 m^3)
Total	96.0039	325.8	4505.1

TR500

ELEMENTO HIDROLOGICO	ÁREA (Km^2)	DESCARGA PICO (m^3/S)	VOLUMEN (X1000 m^3)
Total	96.0039	479	6376.4

Posteriormente, ya en este estudio (2017) se realizaron corridas hidrológicas con una

tormenta de diseño aplicada bajo in esquema de distribución de frecuencia. La discretización de este modelo hidrológico consiste en 3 subcuencas principales localizadas aguas arriba del bordo Miguel de la Madrid Hurtado:

Cuenca Poniente: Esta subcuenca (Figura VII.2.1. en color blanco) capta los escurrimientos de la zona de granjas de Sta Elena, y en ella se localizan los diques Sta. Elena I, Sta. Elena II, Fluorex, Charly I, Charly II y Yonkes.

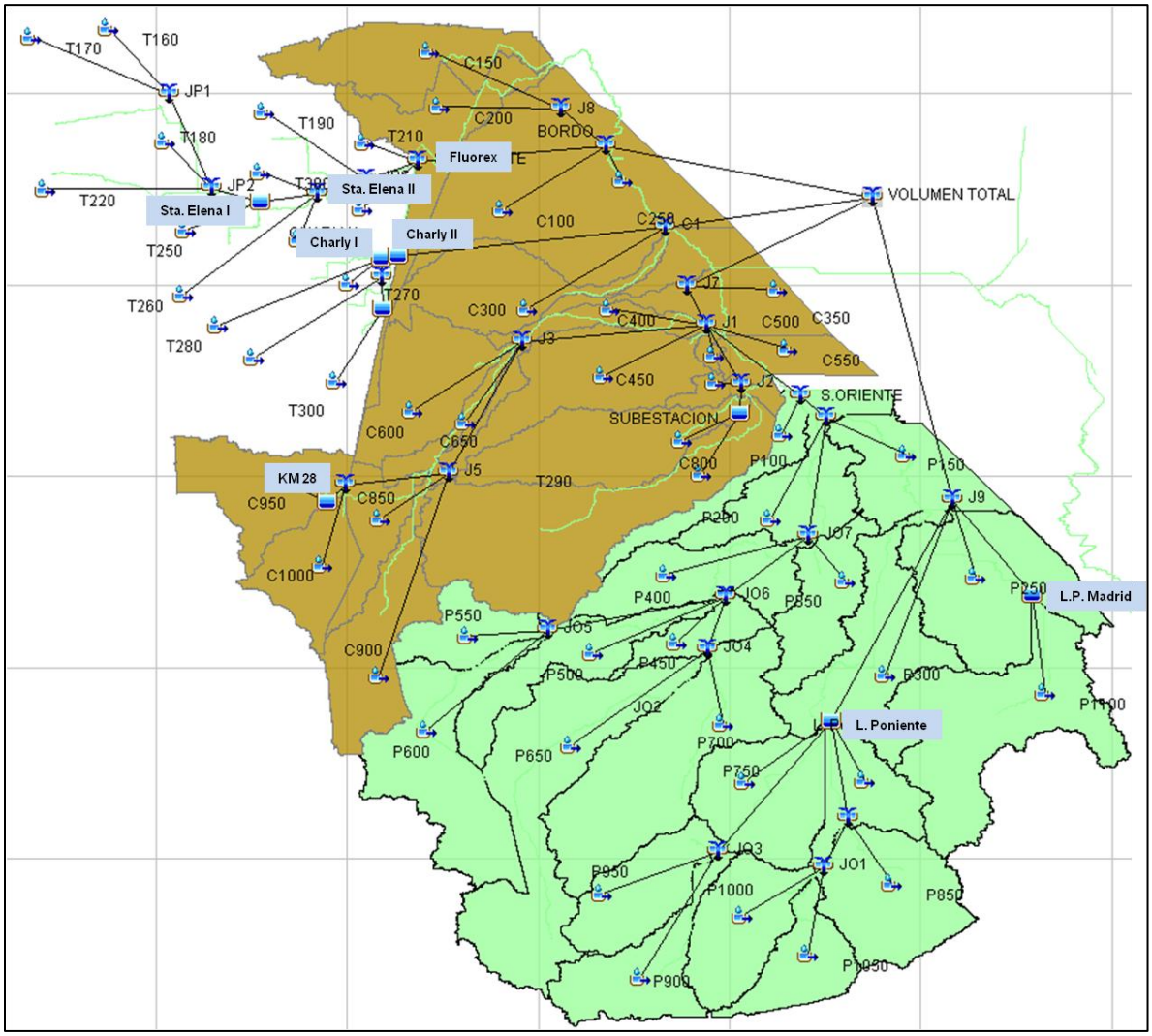


Figura VII.2.1. Localización de las obras hidráulicas de la zona poniente al Bordo MMH.

Cuenca Centro: Esta subcuenca (Figura VII.2.1. en color café) capta escurrimientos de la parte central de la cuenca el Barreal. En esta subcuenca se localiza el dique Km 28 y el dique Subestación o Herradura.

Cuenca Surponiente: Esta subcuenca capta un importante volumen de escurrimientos provenientes de la parte suroeste de la cuenca El Barreal. En esta subcuenca se localizan varias lagunas subsidiarias o secundarias que actúan como reservorios en caso de lluvia. Las más importantes se modelaron hidrológicamente como vasos de captación: Laguna Poniente y Laguna P. Madrid.

La curvas de almacenamiento descarga de las diferentes estructuras hidráulicas de las subcuencas mencionadas (Figuras VII.2.2 a la VII.2.9) muestra que para eventos hidrometeorológicos asociados con una tormenta con un periodo de retorno de 500 años, solo las lagunas subsidiarias son capaces de contener los volúmenes transportados aguas abajo.

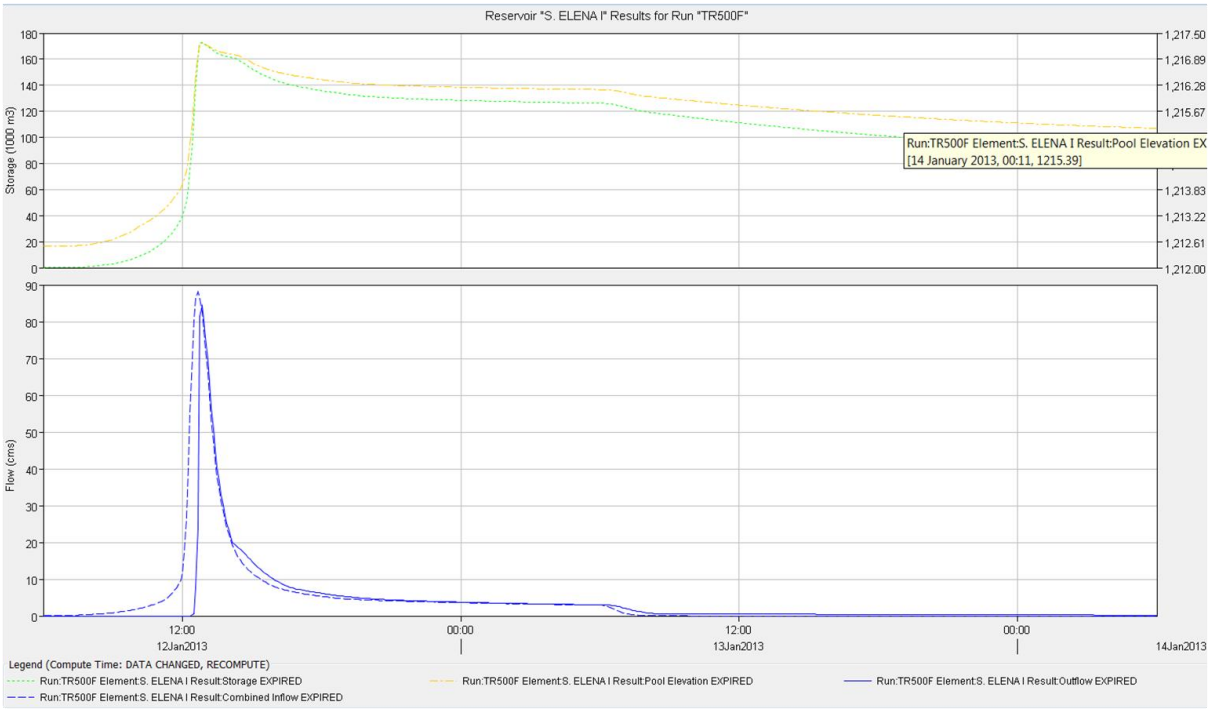


Figura VII.2.2. Volumen de agua almacenada en vasos de captación Santa Elena I.

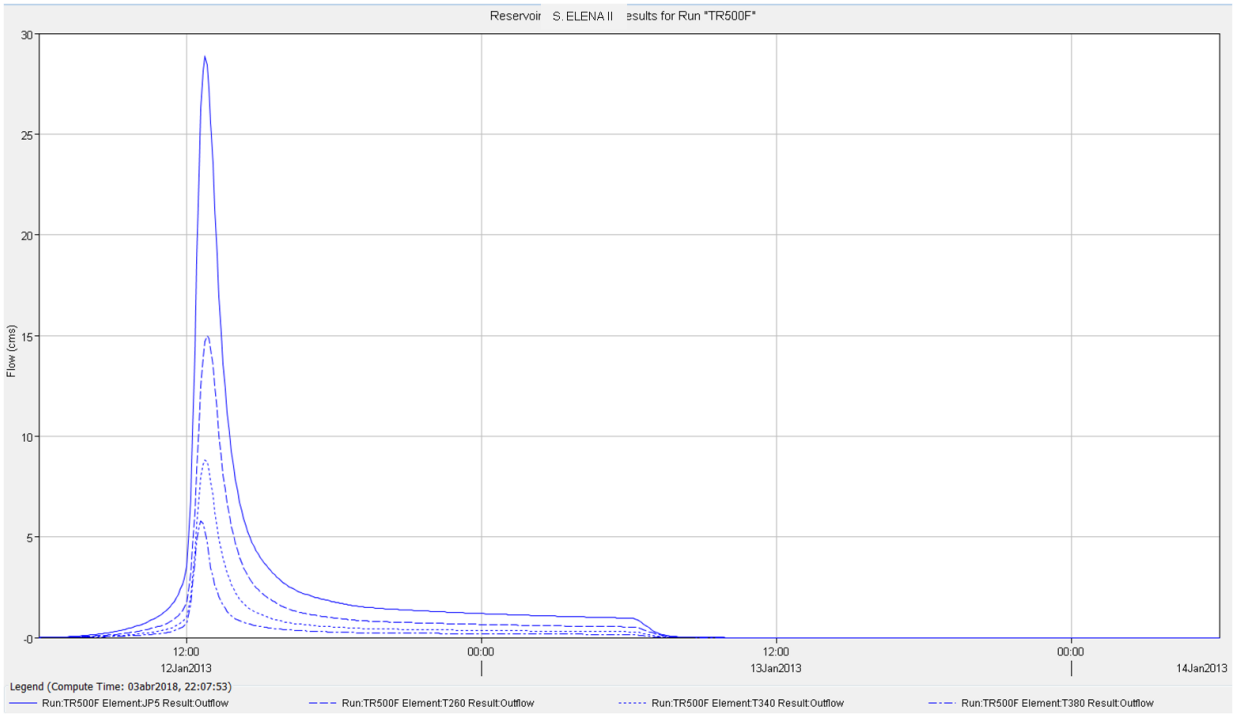


Figura VII.2.3. Volumen de agua almacenada en vasos de captación Santa Elena II.

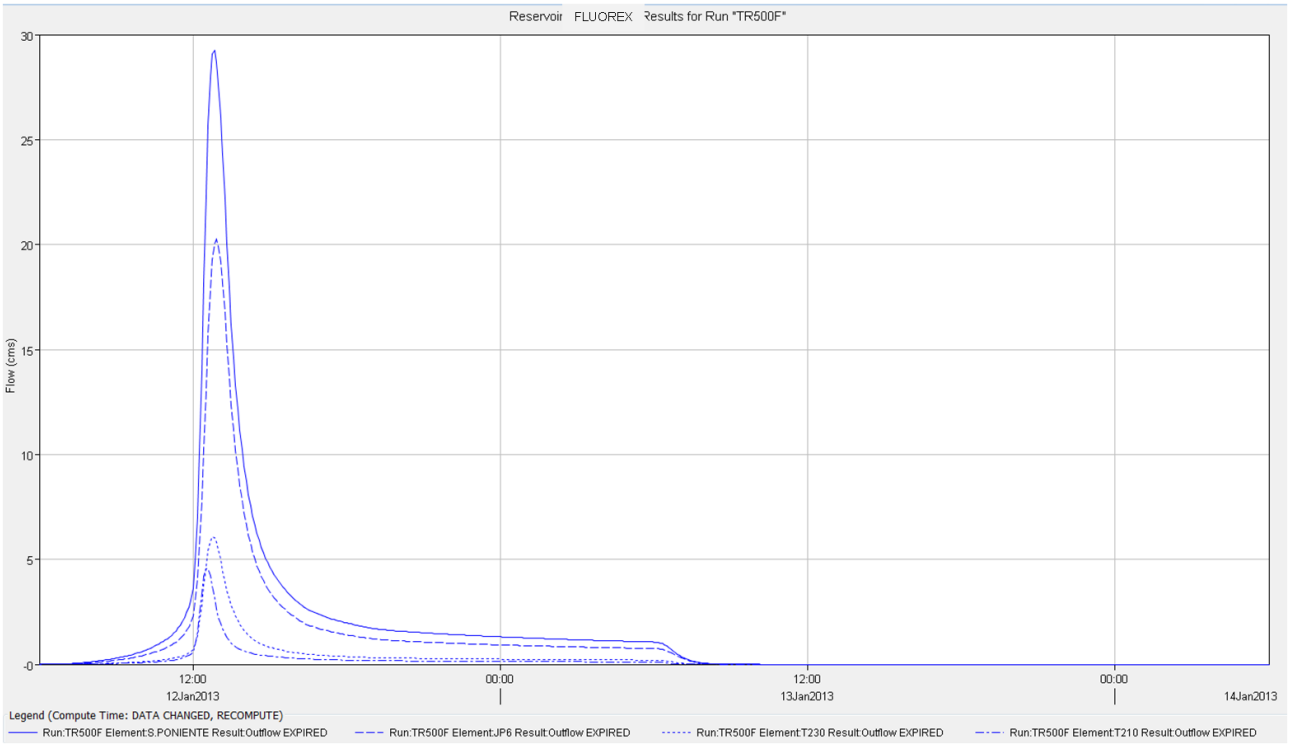


Figura VII.2.4. Volumen de agua almacenada en vasos de captación Fluorex.

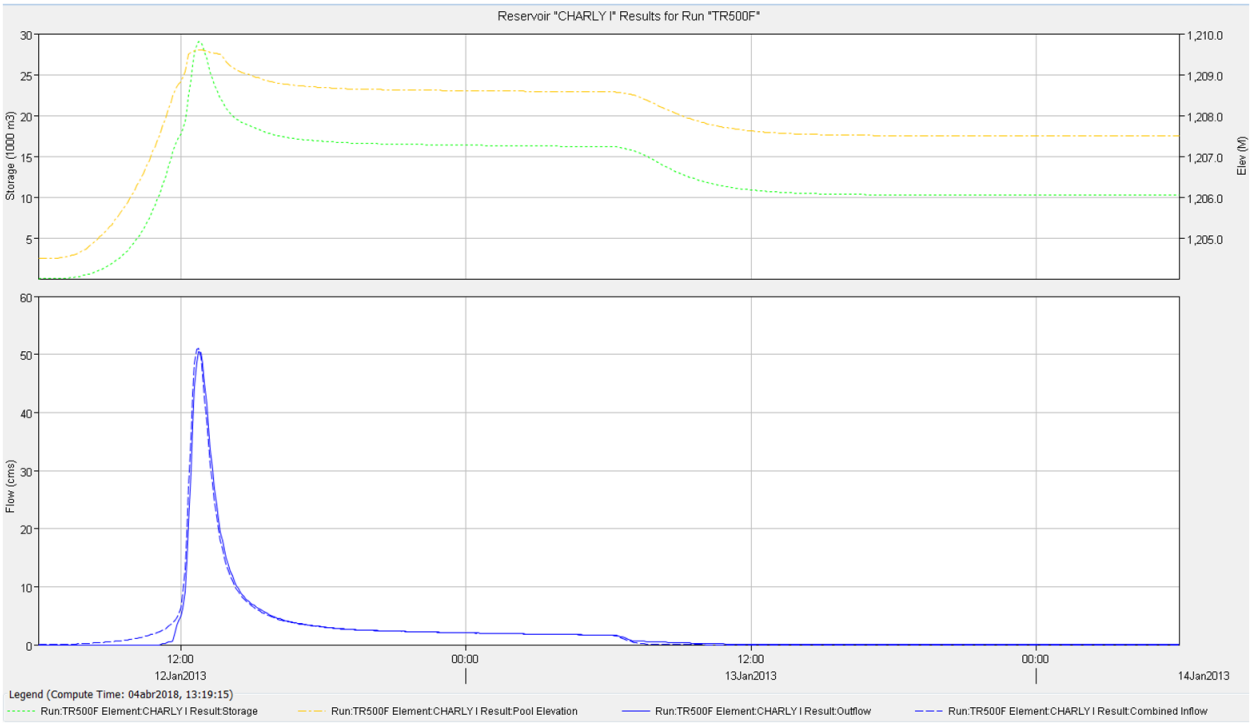


Figura VII.2.5. Volumen de agua almacenada en vasos de captación Charly I.

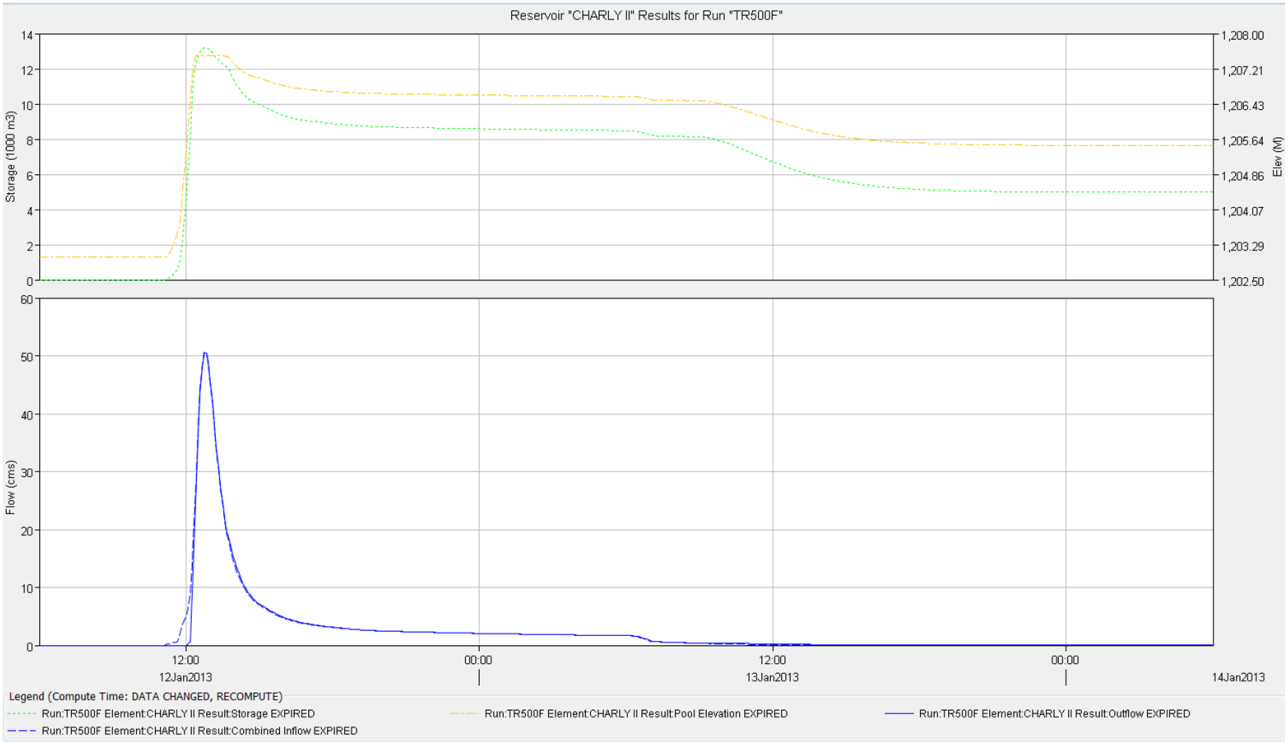


Figura VII.2.6. Volumen de agua almacenada en vasos de captación Charly II.

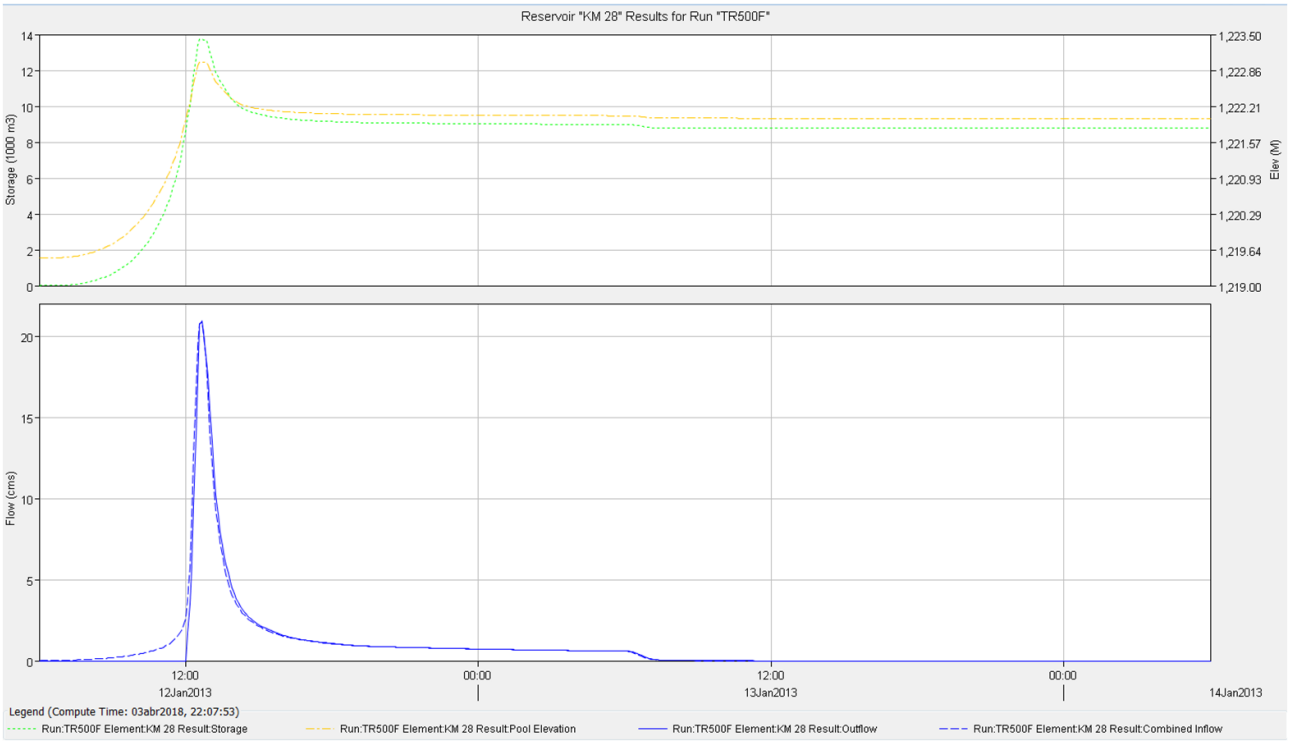


Figura VII.2.7. Volumen de agua almacenada en vasos de captación KM 28.

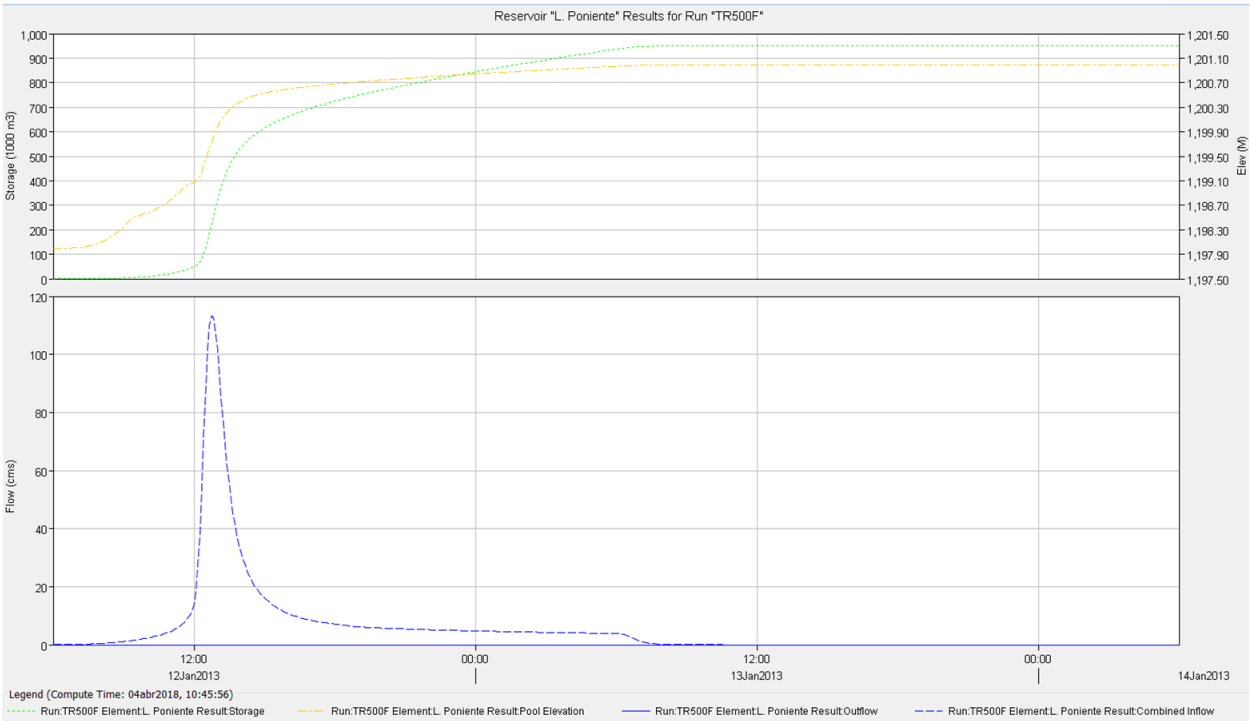


Figura VII.2.8. Volumen de agua almacenada en zona lagunar L. Poniente.

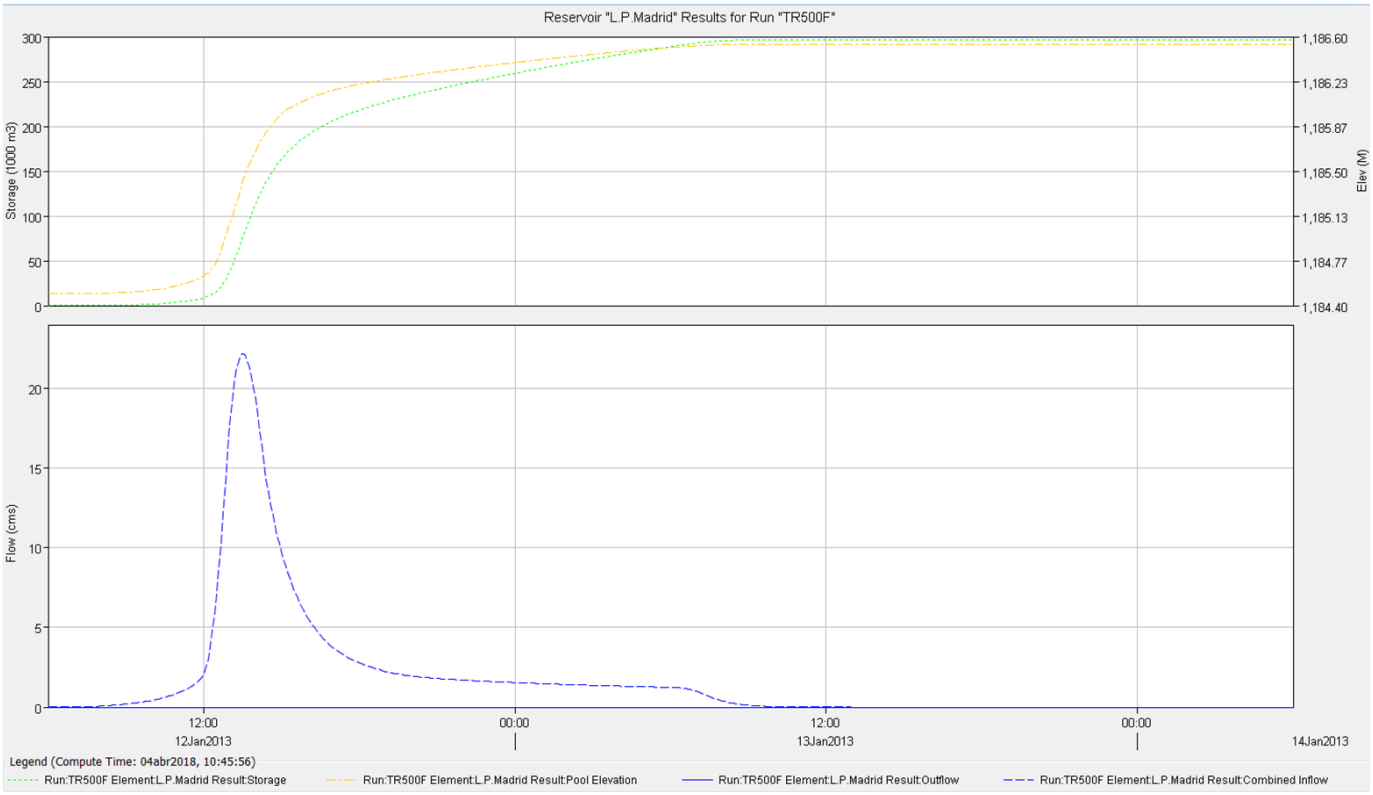


Figura VII.2.9. Volumen de agua almacenada en zona lagunar L. P. Madrid.

VII.2.1. OPERACIÓN HIDRAULICA DE DIQUES Y LAGUNAS SUBSIDIARIAS

La condición de almacenaje descarga para cada vaso o dique se resume en la siguiente tabla donde V.E. es Volumen Escurrido y V.D. es volumen de Descarga (Tabla VII.2.1.1).

Tabla VII.2.1.1. Volúmenes escurridos y de descarga.

ESTRUCTURA	TR5		TR10		TR20		TR50		TR100		TR500	
	V.E	V.D	V.E	V.D	V.E	V.R	V.E	V.D	V.E	V.D	V.E	V.D
STA ELENA I	183.4	94.7	249.8	161.0	319.9	230.9	420.9	331.7	505.5	416.3	721.1	631.8
STA ELENA II	155.2	155.2	243.5	243.5	336.5	336.5	470.6	470.6	583.1	583.1	869.7	869.7
FLUOREX	221.6	221.6	333.9	333.9	452.3	452.3	623.0	623.0	766.1	766.1	1130.8	1130.8
CHARLY 1	103.9	93.6	141.6	131.3	181.3	171.0	238.5	228.2	286.4	276.2	408.6	398.4
CHARLY 2	93.6	88.7	131.3	126.3	171.0	166.0	228.2	223.2	276.2	271.2	398.4	393.4
KM28	36.9	28.2	50.3	41.6	64.4	55.7	84.8	76.0	101.8	93.1	145.3	136.5
L. PONIENTE	241.5	0	329.0	0	421.2	0	554.2	0	665.6	0	949.6	0
L.P. MADRID	75.4	0	102.8	0	131.6	0	173.1	0	207.9	0	296.6	0

En tanto que la operación hidráulica, evaluada en términos de la capacidad de regulación, se muestra en la siguiente tabla, donde en rojo se agrupan los vasos o diques con poca o nula capacidad de regulación (rojo). Capacidad media de regulación (amarillo) y regulación satisfactoria (verde).

Tabla VII.2.1.2. Porcentaje regulado.

ESTRUCTURA	TR5	TR10	TR20	TR50	TR100	TR500
	% regulado	% regulado	% regulado	% regulado	% regulado	% regulado
STA ELENA I	48.36	35.55	27.82	21.19	17.65	12.38
STA ELENA II	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FLUOREX	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CHARLY 1	9.91	7.27	5.68	4.32	3.56	2.50
CHARLY 2	5.24	3.81	2.92	2.19	1.81	1.26
KM28	23.58	17.30	13.51	10.38	8.55	6.06
L. PONIENTE	100	100	100	100	100	100
L.P. MADRID	100	100	100	100	100	100

En cuanto a los gastos pico y volúmenes escurridos en la zona de restitución lagunar, localizadas aguas arriba del bordo Miguel de la Madrid, se muestra el resumen de los periodos de retorno críticos para la operación de esta estructura de contención.

El detalle de la operación para tormentas con periodo de retorno de 100 y 500 años se resume en las siguientes tablas:

TR100

ELEMENTO HIDROLOGICO	ÁREA (Km^2)	DESCARGA PICO (m^3/S)	VOLUMEN (X1000 m^3)
Total	96.0039	351.2	4372.8

TR500

ELEMENTO HIDROLOGICO	ÁREA (Km^2)	DESCARGA PICO (m^3/S)	VOLUMEN (X1000 m^3)
Total	96.0039	534.1	6321.3

VII. CONCLUSIONES

VIII.1. GENERALES

Los resultados de la corrida hidrológica por subcuenca de aportación del sistema hidrológico de la Cuenca el Barreal proporcionan un instrumento técnico con gastos y volúmenes hidráulicos, a un nivel de detalle de fraccionamiento, es decir, con estos resultados es ya posible dimensionar si las obras de mitigación existentes cuentan con la capacidad suficiente para contener la avenida hidrológica para un periodo de retorno de 25 años con bordo libre a 100 años como lo marca la normativa de la ciudad. De igual manera, el cálculo hidrológico del presente estudio permitirá el diseñar a nivel de dimensionamiento, las estrategias de mitigación requeridas para garantizar la operación hidráulica apropiada de cada desarrollo en la zona urbanizada del Barreal. En este mismo tenor, la hidrología permite, en función de los volúmenes calculados, el anticipar las estrategias regionales de solución, tales como diques, vasos de almacenamiento y bordos de contención requeridos para garantizar que cada desarrollo urbano o habitacional este haciendo un manejo hidráulico a las aportaciones de cuenca propia. En base al presente estudio se puede concluir de manera muy general, ya que el análisis a detalle de las estrategias globales y locales de solución corresponden al Entregable F, que se requiere la continuación del Bordo Miguel de La

Madrid Hurtado en dirección sureste, que es necesario garantizar que las aportaciones del sistema hidrológico de la Cuenca Jarudo no se incorporen al Barreal mediante diques, tajos y canalizaciones efectivas, de manera que los desarrollos existentes en la zona urbana sean capaces de manejar de manera exitosa sus escurrimientos por cuenta propia. Aun así, en la etapa de Análisis de Estrategias de Solución, se deberán validar y dimensionar estas alternativas de solución global, además de establecer las soluciones a nivel local de cada desarrollo.

VIII.2. CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

1. El volumen total al Bordo Miguel de la Madrid Hurtado (BMMH) es de 6,376.4 (x1000) m^3 (Millones de m^3) para un Periodo de Retorno (TR) de 500 años, operando los diques existentes en condiciones actuales utilizando la tormenta de diseño de la CONAGUA.

2. El volumen total al Bordo Miguel de la Madrid Hurtado (BMMH) es de 6,321.3 (x1000) m^3 (Millones de m^3) para un Periodo de Retorno (TR) de 500 años, operando los diques existentes en condiciones actuales utilizando la tormenta de diseño de la solicitada por CENAPRED.

3. Aunque los volúmenes son muy similares, si hay diferencia en los gastos de diseño. Es decir, los gastos calculados en base a la tormenta validadA por CENAPRED son mayores, reflejando el hecho de que la tormenta esta de hecho sesgada hacia la izquierda, concentrando la mayor cantidad de lluvia en la primer hora de la tormenta.

4. La operación hidráulica de los diques y vasos muestra que solo las lagunas subsidiaras operan satisfactoriamente como reservorios. Los demás diques y vasos son incluso rebasados, hidráulicamente hablando, incluso para periodos de retorno de

5 años.

INSTITUTO DEL FONDO NACIONAL DE LA VIVIENDA PAR LOS TRABAJADORES

I N F O N A V I T

“ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO EN LA ZONA NORTE Y SUR DE LA CUENCA DE EL BARREAL EN CIUDAD JUAREZ, CHIHUAHUA”

REPORTE

ANÁLISIS DE LAS CAPACIDADES DE LOS POZOS DE ABSORCIÓN DE LAS OBRAS DE MITIGACIÓN Y LA PROPUESTA DE REFORZAMIENTO DEL BORDO MIGUEL DE LA MADRID HURTADO

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN 3
II. OBJETIVO 3
IV. Ubicación de la zona del proyecto 4
VI.1. Tomografías Eléctricas Resistivas (TER's) 8
VI.2. Resistividad 11
VI.3. Metodología de Adquisición de Datos 12
VI.4. Procesamiento 13
VII. TRABAJO DE CAMPO 14
A) Fraccionamiento "Puente Alto" 15
B) Fraccionamiento "Valle de los Cantaros" 16
C) Fraccionamiento "Villa Residencial del Real" 18
D) Predio "Centro Industrial Juárez" 21
E) Fraccionamiento "Manuel Gómez Morín" 22
F) Fraccionamiento "Villas del Sur" 26
G) Fraccionamiento "Palmas del Sol" 27
H) Fraccionamiento "Las Haciendas" 29
I) Fraccionamiento "Santa Isabel" 31
J) Fraccionamiento "Senderos del Sol" 32
VIII.1. Secciones Electroestratigráficas en los vasos de captación de los fraccionamientos afectados por planicies de inundación 39
A) Fraccionamiento "Puente Alto" 39
B) Fraccionamiento "Valle de los Cantaros" 40
C) Fraccionamiento "Villa Residencial del Real" 41
D) Predio "Centro Industrial Juárez" 43
E) Fraccionamiento "Manuel Gómez Morín" 43
F) Fraccionamiento "Villas del Sur" 47
G) Fraccionamiento "Palmas del Sol" 47
H) Fraccionamiento "Las Haciendas" 48

I) Fraccionamiento "Santa Isabel"..... 49

J) Fraccionamiento "Senderos del Sol" 50

I. INTRODUCCIÓN

En Ciudad Juárez, en el estado de Chihuahua, durante la temporada de lluvias se presentan situaciones de riesgo a causa de la intensidad con que se presenta la precipitación. El problema se genera aguas abajo de los principales arroyos y diques que desembocan hacia asentamientos urbanos, incrementando con esto los daños a la población y a la infraestructura urbana en general. Ante esta situación es imperativo llevar a cabo la actualización de los estudios hidrológicos requeridos para los diferentes periodos de retorno en las zonas con un marcado crecimiento urbano, de tal forma que podamos conocer a detalle las modificaciones que se han presentado en las cuencas, con el fin de diseñar las obras de control hidráulico requeridas para salvaguardar tanto la vida como de la propiedad en un ambiente de convivencia armónico y sustentable con el medio ambiente.

II. OBJETIVO

Analizar por medio de la aplicación de métodos indirectos (geofísica) de Tomografías Eléctricas Resistivas (TER´s) las condiciones electroestratigráficas del subsuelo en los vasos de captación y pozos de absorción localizados en los desarrollos que presentan poca seguridad hidrológica, y las condiciones del estrato de desplante del Bordo Miguel de La Madrid Hurtado (MMH).

III. ALCANCES

Generar un documento que englobe los principales hallazgos de los estudios de Tomografías Eléctricas Resistivas para inferir las condiciones de capacidad de infiltración en las obras de protección hidráulicas, diques y vasos de captación, dentro de los fraccionamientos afectados de acuerdo a la simulación hidrológica e hidráulica, asi como las condiciones del estrato de desplante del bordo MMH.

IV. Ubicación de la zona del proyecto

Los estudios a detalle de las obras de protección hidráulicas se localizan en los fraccionamientos afectados por las planicies de inundación de un periodo de retorno a 25 años en la parte Norte del Blvd. Manuel Talamás Camandarí, la zona del Triángulo delimitado por el Blvd. Manuel Talamás Camandarí, el Bordo Miguel de la Madrid Hurtado (BMMH) y el Blvd. Independencia, y la parte sur del Blvd. Independencia (Figura V.1.1).

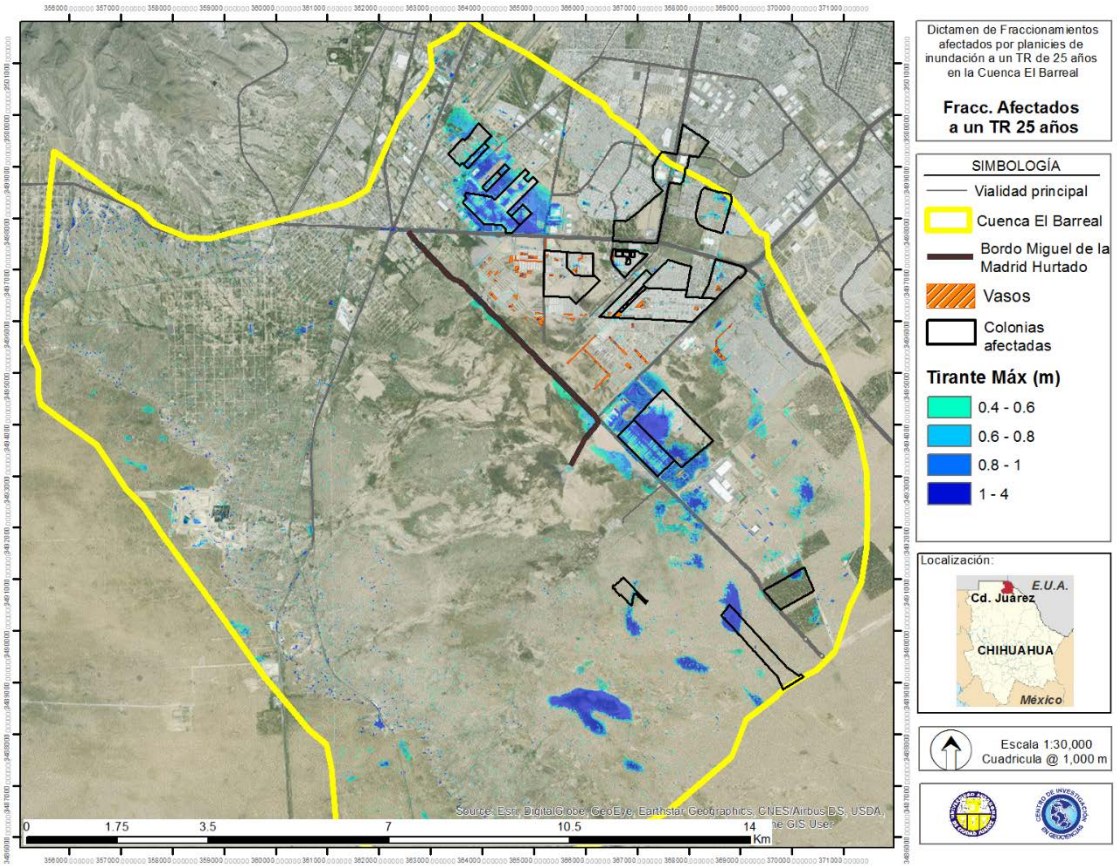


Figura IV.1.1. Localización general de la cuenca El Barreal en Cd. Juárez.

V. JUSTIFICACION

La seguridad hidráulica de los desarrollos habitacionales ubicados dentro de la poligonal que circunscriben las vialidades Miguel de la Madrid Hurtado, Boulevard Manuel Talamás Camandarí y Boulevard Independencia depende de la presencia e integridad estructural del Bordo MMH. De manera, los desarrollos urbanos dentro de este polígono deberán ser capaces de disponer de capacidad de manejo de escurrimientos por condiciones de lluvia por cuenca propia.

En esta etapa de este estudio, se analizaron las condiciones electroestratigráficas de las diferentes obras de mitigación hidráulica para establecer opciones de solución en las capacidades de almacenamiento en cada vaso de captación, dique, etc.

VI. ESTUDIOS GEOFÍSICOS

Descripción de los Estudios Geofísicos realizados

Los métodos geofísicos de exploración o Ingeniería Geofísica, están constituidos por una serie de técnicas que permiten medir las variaciones de diversas propiedades físicas en los materiales que forman la corteza terrestre tales como: densidad, susceptibilidad magnética, velocidad de propagación de ondas sísmicas, resistividad eléctrica o la radioactividad natural de las rocas, entre otras. La medición y distribución de estas variaciones, permite inferir algunas condiciones litológicas y estructurales del subsuelo, correlacionando los valores medidos o zonas anómalas, con los efectos calculados de los modelos de laboratorio, en los que se conocen las relaciones causa-efecto en términos de una función matemática.

En los métodos eléctricos la circulación de la corriente en el terreno, ocasiona diferencias de potencial, cuya magnitud, depende de la distribución de las resistividades en el subsuelo respecto a los diferentes tipos de materiales que lo constituyen. Las diferencias de tensión o de potencial se miden entre dos puntos del terreno, mediante el uso de un voltímetro de alta precisión integrado al sistema y con electrodos de inyección de corriente que se colocan en la superficie del terreno.

En el caso de los métodos sísmico se determinan las condiciones elásticas del subsuelo a través de mediciones de velocidad sísmica; parámetro que a su vez depende funcionalmente de la densidad. Este enfoque es considerado el más

certero en prospección geotécnica, ya que permite el perfilado continuo de las propiedades elásticas (mecánicas) del subsuelo.

Es importante aclarar que los métodos geofísicos son una herramienta de prospección, cuyo alcance es el inferir de forma indirecta las propiedades físicas del subsuelo, y que, aunque reduzca notablemente los gastos de sondeos exploratorios directos, no excluye estos últimos. Por lo que el modelo geológico debe ser calibrado mediante extracción de muestras *in-situ*, para finalmente ser extrapolado a un volumen continuo a través de los perfiles geofísicos. En el presente estudio la calibración in-situ se llevó a cabo mediante la excavación de dos trincheras o zanjas con una profundidad de 13 m aproximadamente. En la trinchera 1 se realizó también una prueba de permeabilidad tipo Lefranc. Es decir, tanto la interpretación litológica como la conductividad hidráulica son derivadas a partir de datos de campo.

VI.1. Tomografías Eléctricas Resistivas (TER's)

La Tomografía Eléctrica Resistiva es una técnica geofísica que genera secciones o perfiles del subsuelo en base a mediciones de caída de potencial eléctrico. Éste método consiste en inyectar una corriente al interior del suelo, la cual, regresa al voltímetro en forma de una diferencia de potencial (ΔV) producto de las variaciones en resistencias que resultan de cada tipo de material o estrato del suelo (Figura IV.1.1). Sabiendo de antemano que cada tipo de material tiene diferente manera de "resistir" una corriente eléctrica, los buenos conductores presentan una resistencia baja a la inyección de corriente, mientras que materiales aislantes presentan resistencias eléctricas mayores. Lo anterior, es relativo a diversos parámetros geológicos como el contenido mineralógico, porosidad y grado de saturación de agua. Durante décadas, los

Estudio de Resistividad Eléctrica han sido utilizados en investigación sobre hidrogeología, geotecnia y también actualmente en estudios ambientales (Loke 2004).

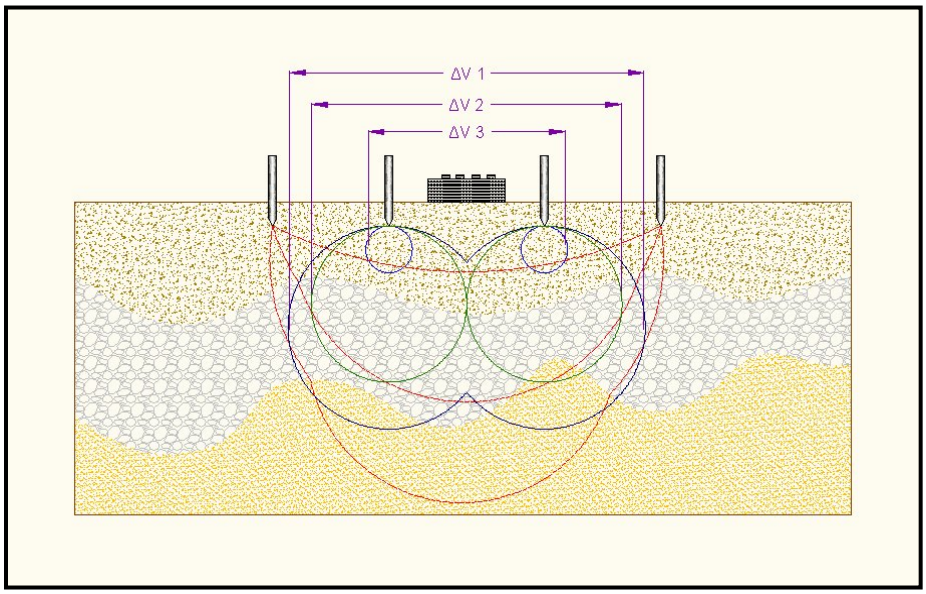


Figura IV.1.1. Método de inyección de corriente y variación de potencial eléctrico.

Existen diversos arreglos electródicos para determinar la resistividad del subsuelo (Figura IV.1.2), dependiendo de la configuración geométrica de electrodos (espaciamiento y colocación de electrodos de corriente y potencial) varía la profundidad y resolución de exploración.

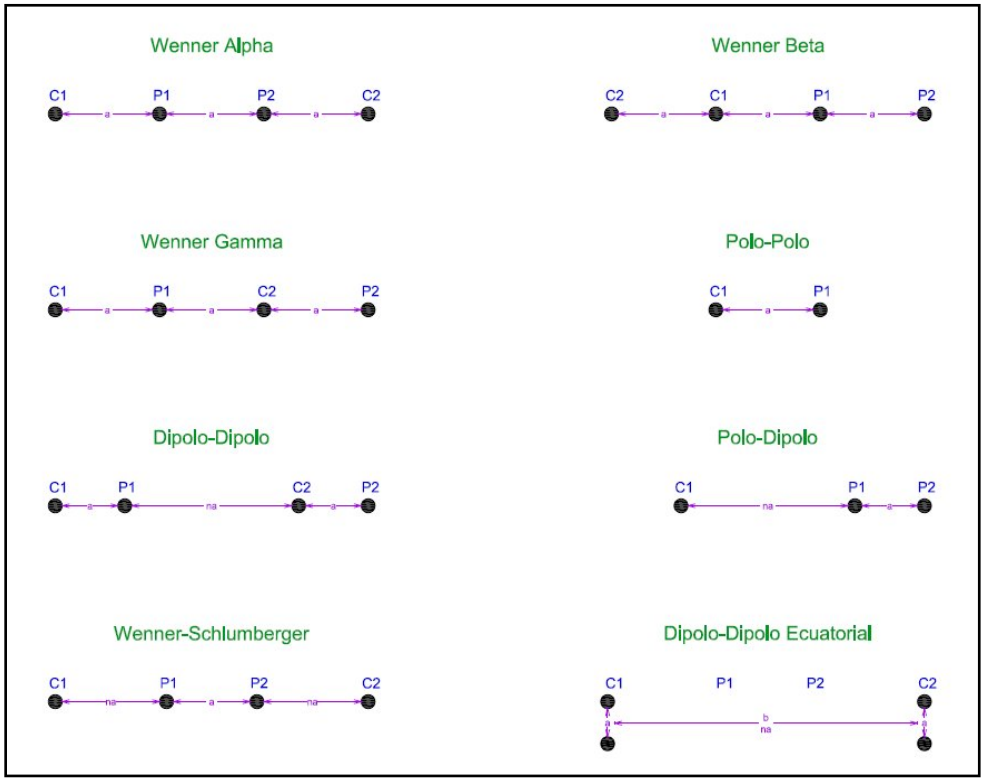
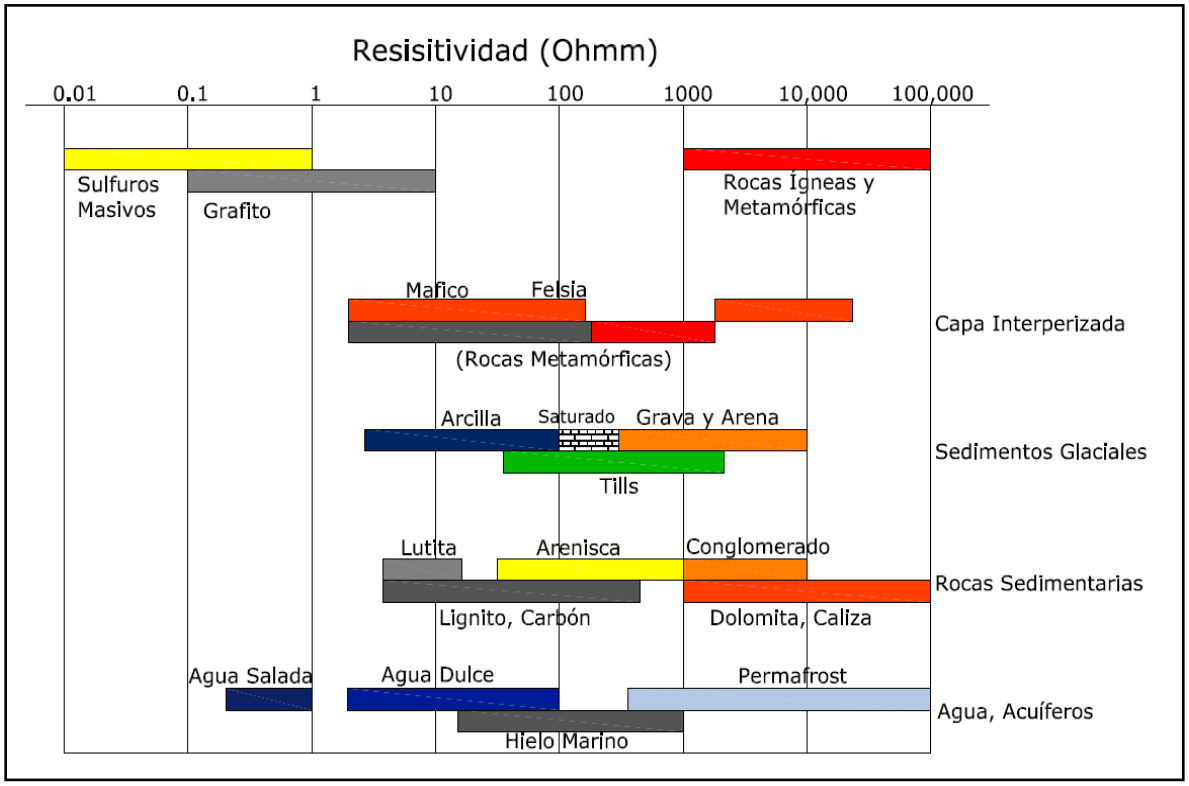


Figura IV.1.2 Arreglos electródicos en resistividad. C1, C2 y P1, P2 denotan la posición de los electrodos de corriente y potencial respectivamente.

VI.2. Resistividad

La resistividad eléctrica es una propiedad física de todos los materiales, no siendo la excepción los materiales geológicos que conforman la matriz del subsuelo. En general, los materiales de tamaño de grano grande, como arenas y gravas (no saturados), son más resistivos que los de granulometría fina como limos y arcilla (Doser et al., 2004).

Tabla I. Valores de resistividades comunes de las rocas y minerales (Palacky, 1987).



VI.3. Metodología de Adquisición de Datos

Para obtener la estratigrafía resistiva del subsuelo, se procedió utilizar el arreglo *Wenner alpha*, el cual fue pre-programado en el equipo multielectrodo inteligente ABEM Terrameter SAS-4000, generando la inyección de corriente y registrando el diferencial de potencial. La forma conceptual de la colocación de electrodos en el arreglo consiste en dos electrodos de acero (C1 y C2) para la inyección de corriente y dos electrodos de cobre (P1 y P2) para capturar la diferencia de potencial (Figura IV.3.1); los electrodos de corriente se colocan a una distancia mayor del centro del arreglo en comparación de los de potencial.

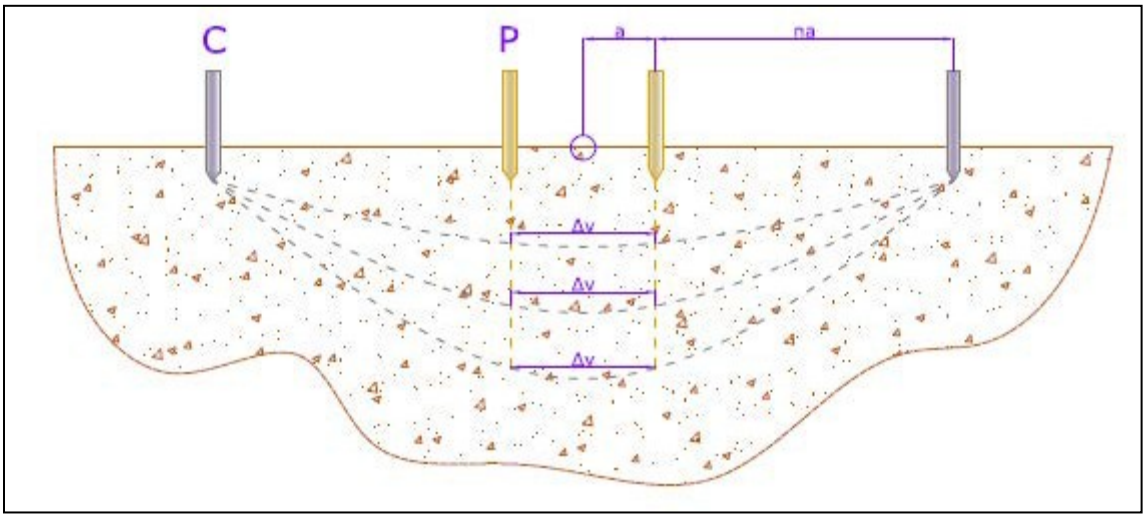


Figura IV.3.1 Fundamento básico de la Tomografía Eléctrica Resistiva.

VI.4. Procesamiento

Para el procesamiento de los datos de campo se utilizó el software RES2DINV, programa utilizado para interpolar a interpretar datos de resistividad. La inversión de los datos es elaborada por el método de mínimos cuadrados que envuelve métodos de elementos y diferencias finitas. El software acepta los distintos arreglos de tomografía (Wenner, Polo-Dipolo, Dipolo-Dipolo, Schlumberger, etc.) y como resultado mapea secciones transversales donde las resistividades quedan escaladas por contrastes de color, facilitando la interpretación de la TER (Figura VI.4.1).

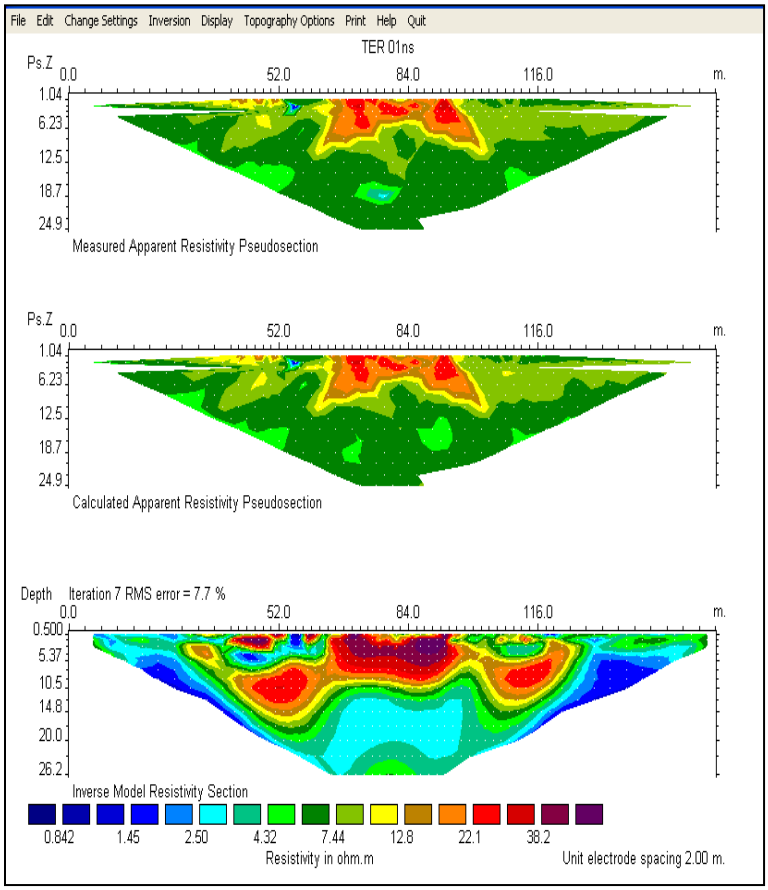


Figura VI.4.1 Sección invertida desplegada en el programa RES2DINV.

VII. TRABAJO DE CAMPO

Se realizaron quince (15) tendidos eléctricos resistivos de 40 m cada una en los vasos de captación y diques en los fraccionamientos que presentan afectación por las planicies de inundación a un TR de 25 años (Figura VII.1). Las 52 secciones correspondientes a la adquisición en campo, se muestran a partir de las Figuras VII.2 a la VII.17.

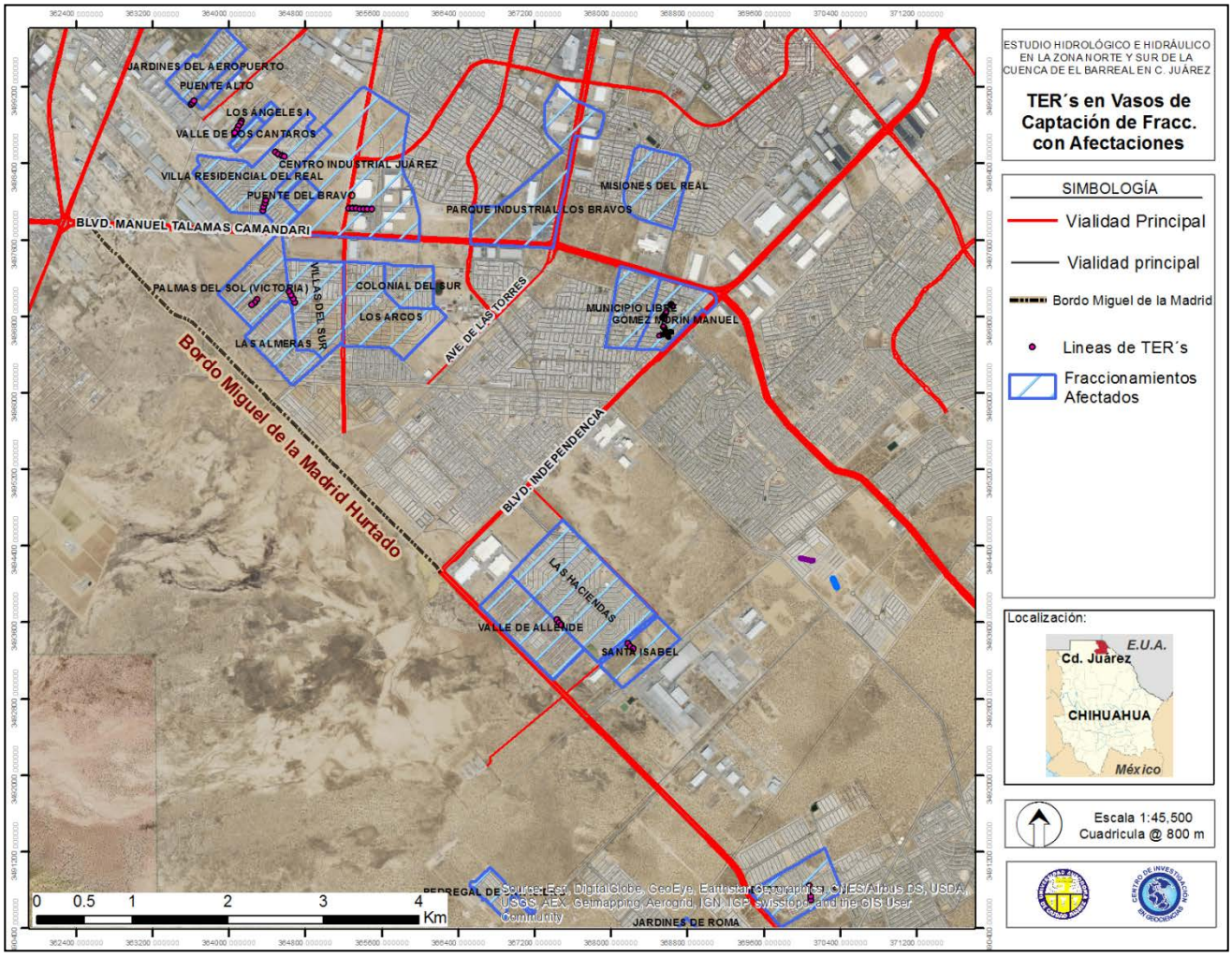


Figura VII.1 Localización de tendidos de TER en los fraccionamientos.

A) Fraccionamiento "Puente Alto"

Se realizó una línea de TER de 40 m de longitud en el vaso de captación del fraccionamiento Puente Alto (Figura VII.2) El tendido (TER 01) tiene una orientación Suroeste-Noreste y se ubica hacia el sur de los fraccionamientos Puente Alto y Jardines del Aeropuerto (Figura VII.3).

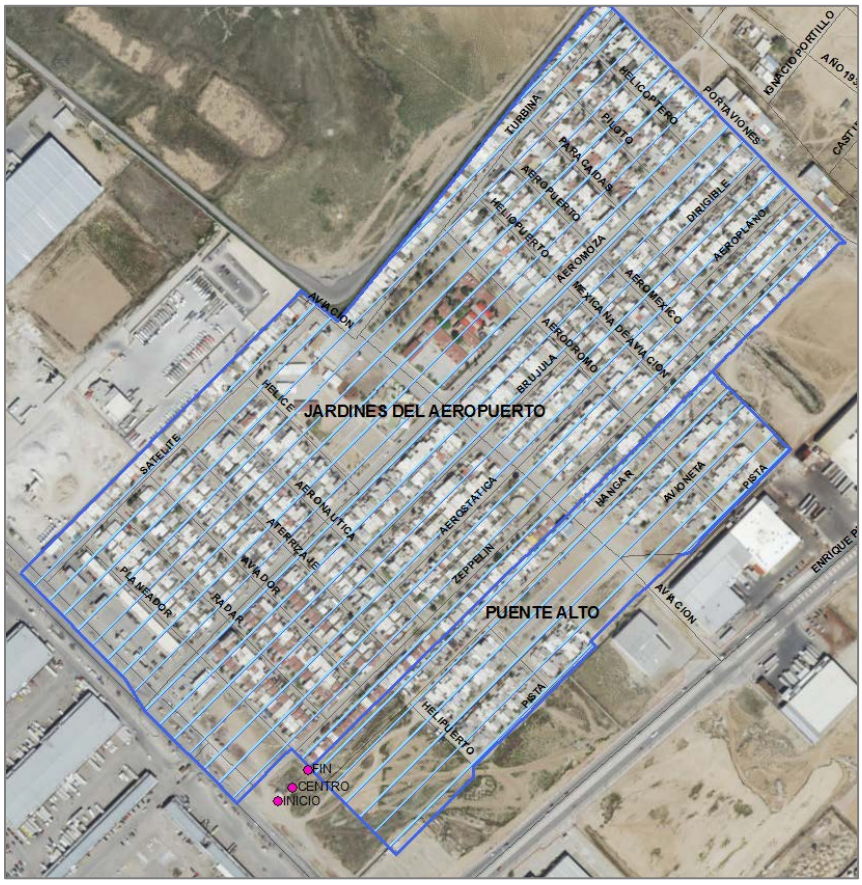


Figura VII.2. Localización de la TER 01 en el fraccionamiento Puente Alto.

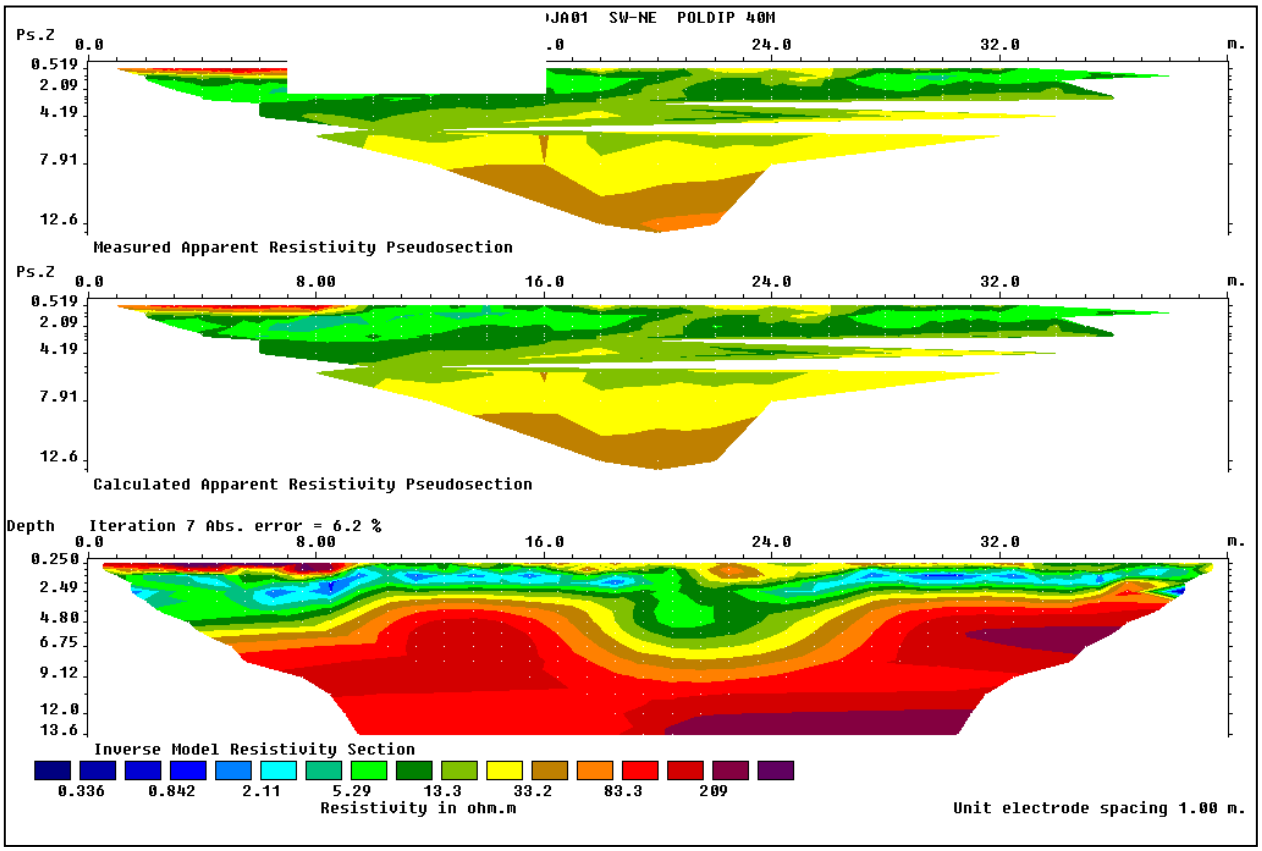


Figura VII.3. Sección TER 01, con orientación Suroeste-Noreste.

B) Fraccionamiento "Valle de los Cantaros"

Se realizó una línea de TER de 128 m de longitud en el vaso de captación al norte del fraccionamiento Valle de los Cantaros (Figura VII.4) ya que, dentro del polígono del fraccionamiento, se encontraban máquinas de construcción que impedían el acceso al lugar. El tendido (TER 02) tiene una orientación Noreste-Suroeste (Figura VII.5).

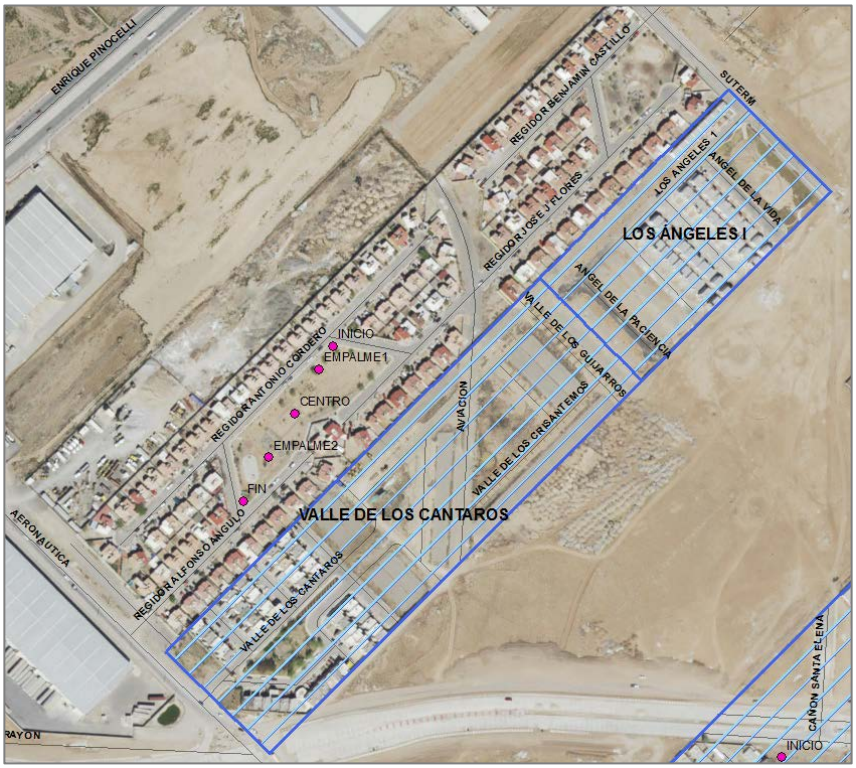


Figura VII.4. Localización de la TER 02 en el fraccionamiento Valle de los Cantaros.

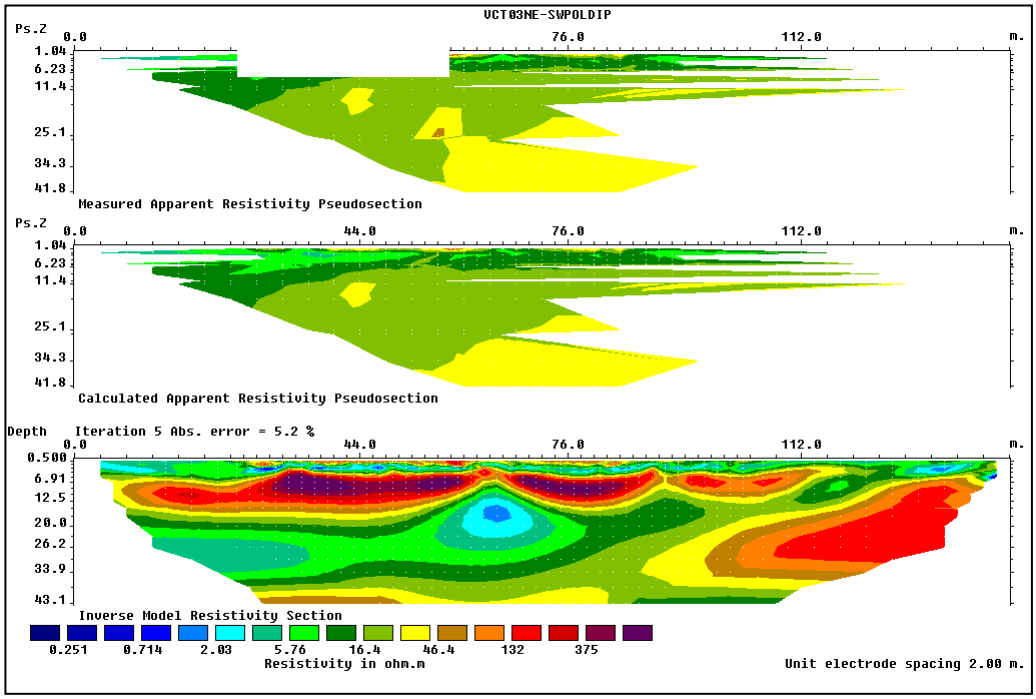


Figura VII.5. Sección TER 02, con orientación Noreste-Suroeste.

C) Fraccionamiento "Villa Residencial del Real"

Se realizaron dos líneas de TER de 92 y114 m de longitud, en los vasos de captación del fraccionamiento Villa Residencial del Real (Figuras VII.6 y VII.7). Las TER´s tienen una orientación Noroeste-Suroeste y se levantaron en los vasos de captación norte y sur, respectivamente (Figuras VII.8 y VII.9).

Figura VII.6. Localización de la TER 03 en el norte del fraccionamiento Villa Residencial del Real.

Figura VII.7. Localización de la TER 04 en el sur del fraccionamiento Villa Residencial del Real.

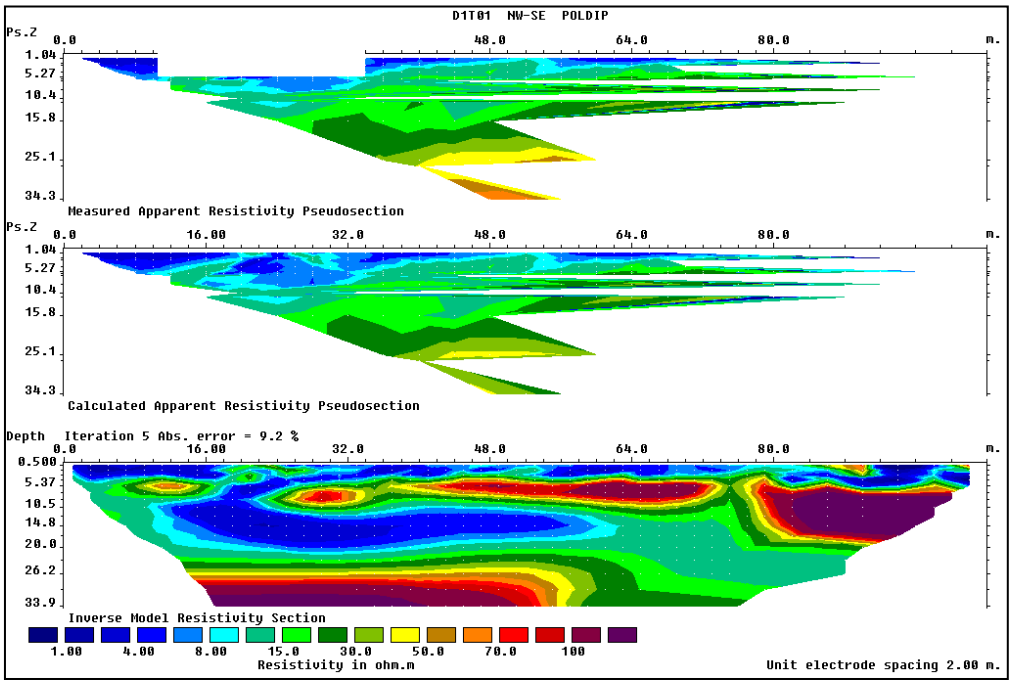


Figura VII.8. Sección TER 03, con orientación Noroeste-Sureste.

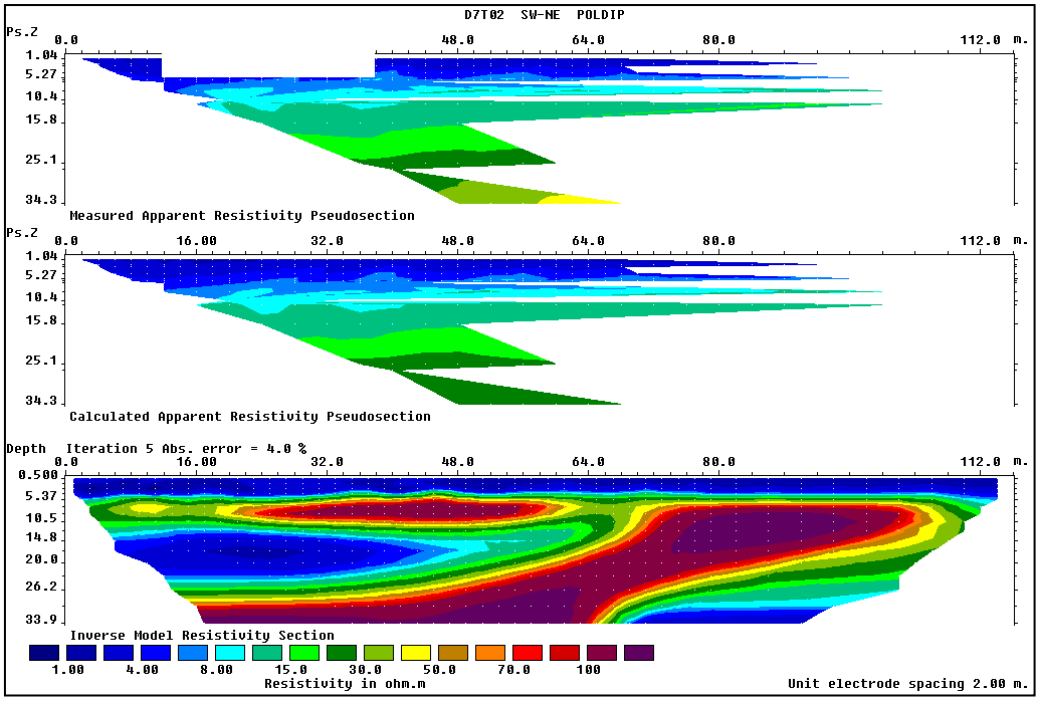


Figura VII.9. Sección TER 04, con orientación Noroeste-Sureste.

D) Predio "Centro Industrial Juárez"

Se realizó una línea de TER de 230 m de longitud en el vaso de captación sur del predio parque industrial Centro Industrial Juárez (Figura VII.10), con una orientación Oeste-Este (Figura VII.11).

Figura VII.10. Localización de la TER 05 en el sur del parque Centro Industrial Juárez.

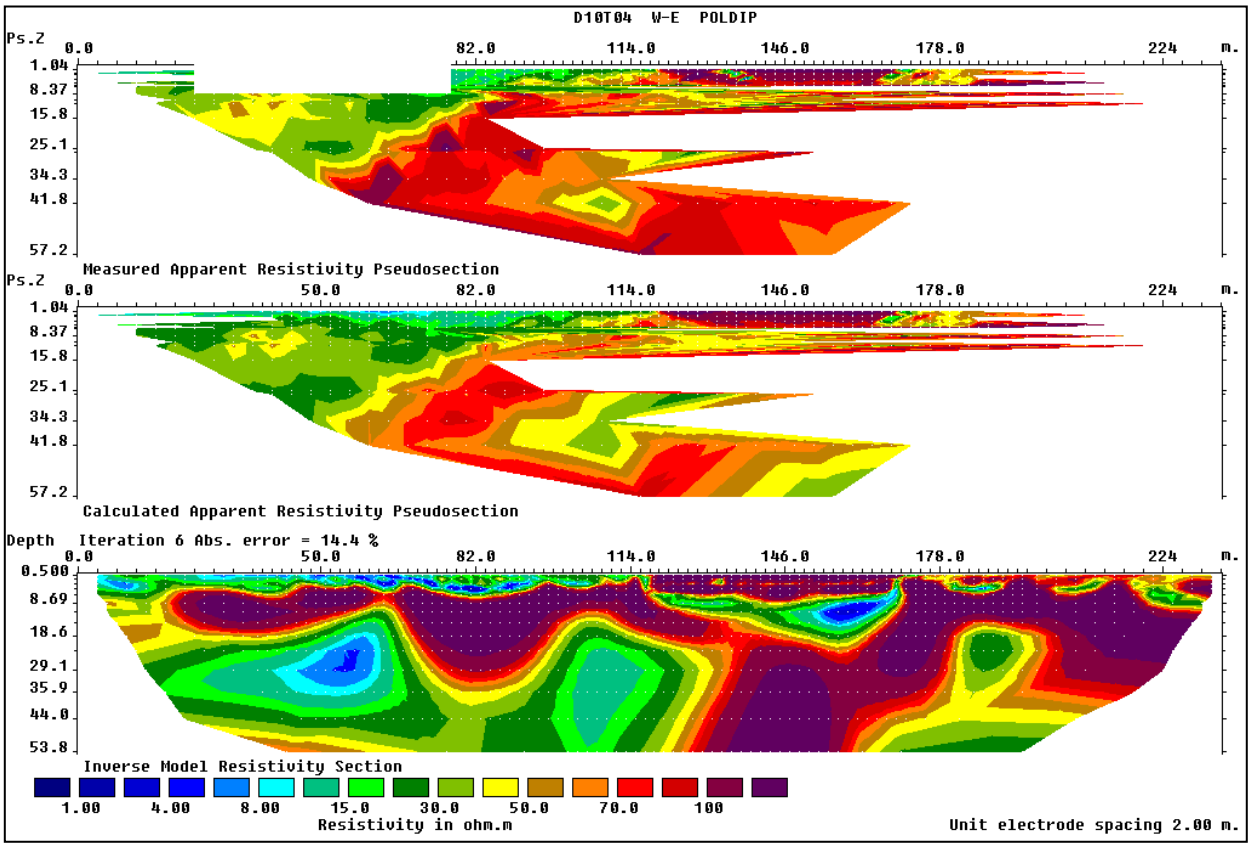


Figura VII.11. Sección TER 05, con orientación Oeste-Este.

E) Fraccionamiento "Manuel Gómez Morín"

Se realizaron cuatro líneas de TER de 40, 120, 124 y 80 m de longitud, en los vasos de captación del fraccionamiento Manuel Gómez Morín (Figuras VII.12). La TER 06 de 40 m de longitud se adquirió en campo al norte del fraccionamiento con una orientación Noroeste-Suroeste. La TER 07, de 120 m, se levantó en el vaso sur del fraccionamiento con una orientación Sureste-Noroeste y la TER 08 de 124 m de longitud con orientación Este-Oeste (ambas TER´s en cruz). Finalmente, la TER 09 se realizó en el vaso centro del

fraccionamiento con una longitud de 80 m y orientación Suroeste-Noreste (Figura VII.13 a la VII.16).

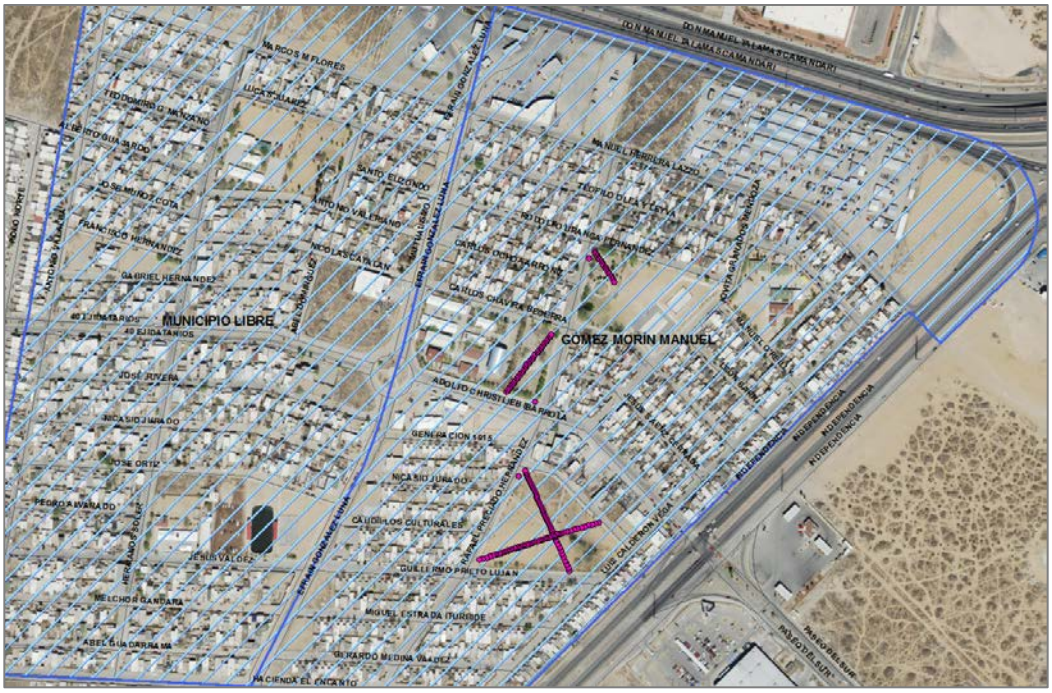


Figura VII.12. Localización de las TER´s en el fraccionamiento Manuel Gómez Morín.

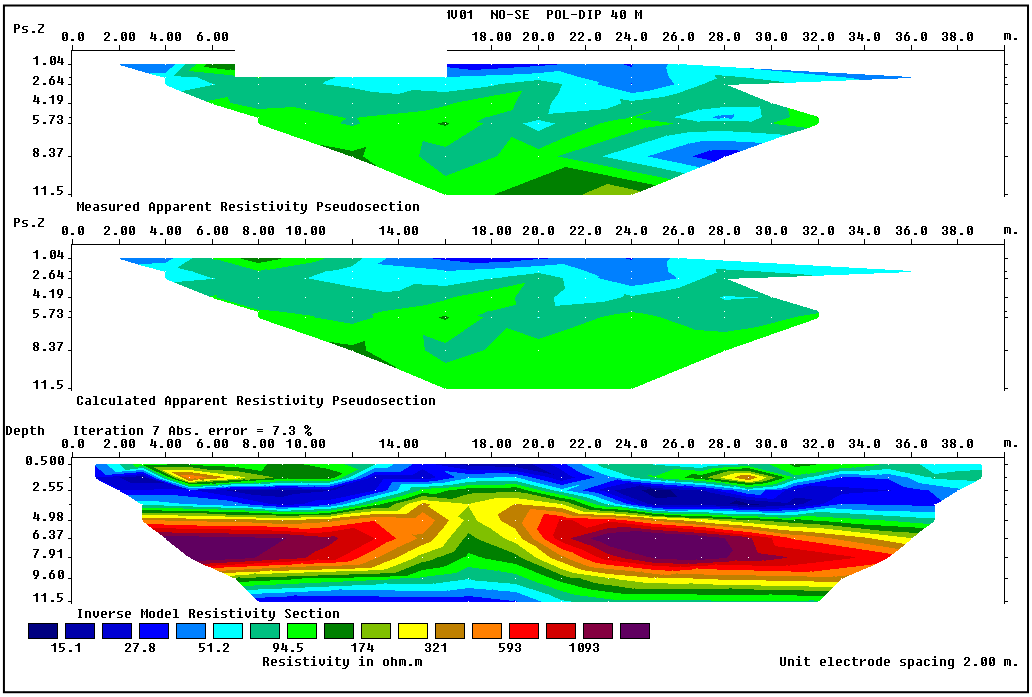


Figura VII.13. Sección TER 06, con orientación Noroeste-Sureste.

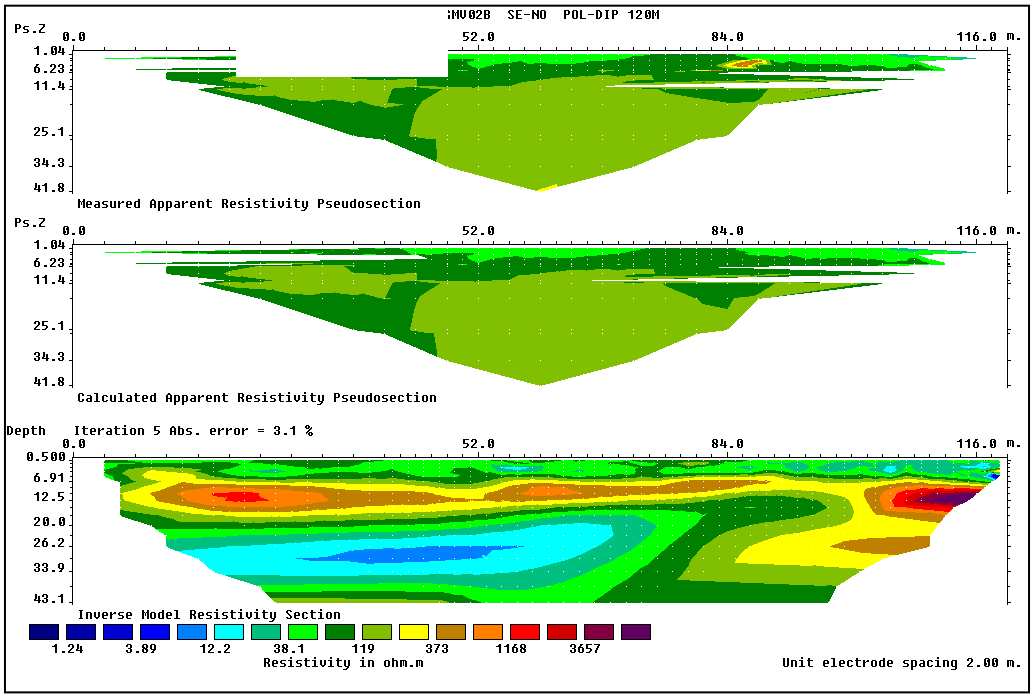


Figura VII.14. Sección TER 07, con orientación Sureste-Noroeste.

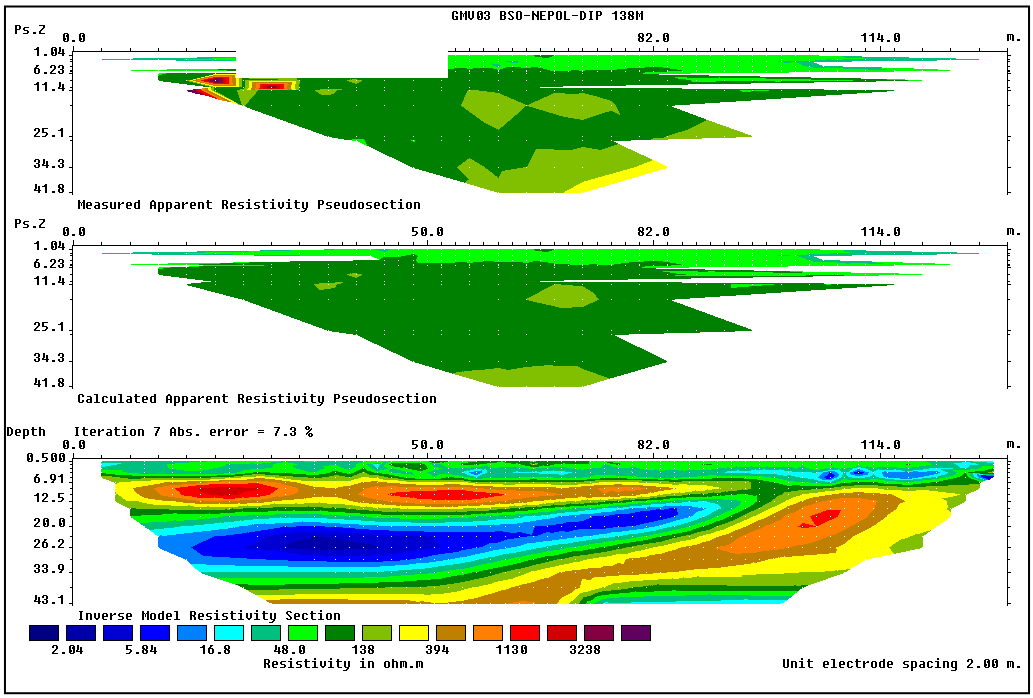


Figura VII.15. Sección TER 08, con orientación Este-Oeste.

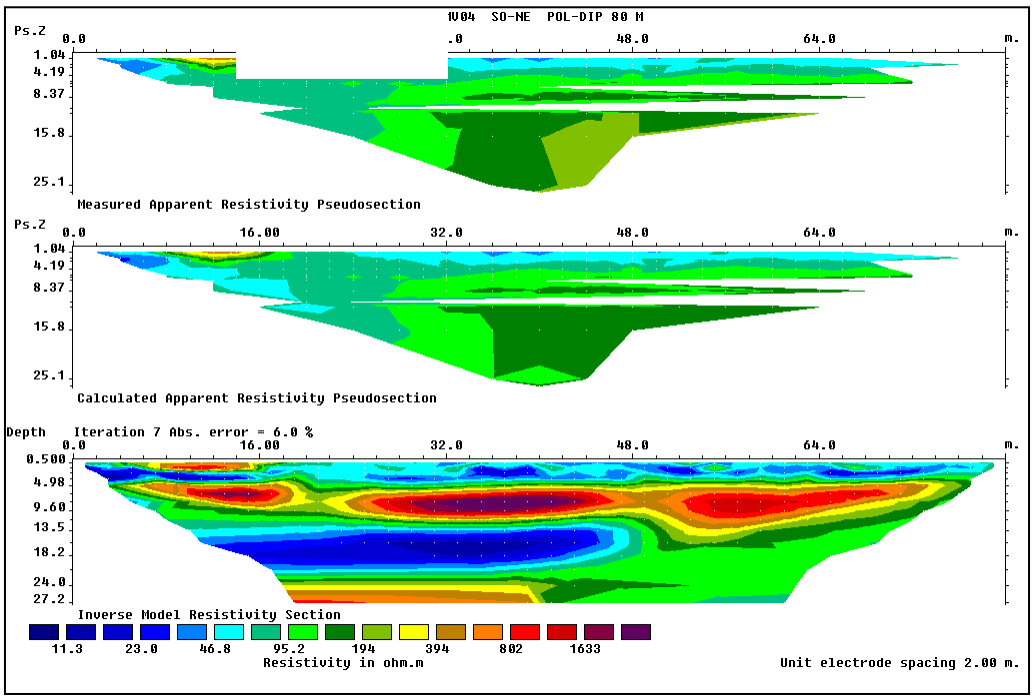


Figura VII.16. Sección TER 09, con orientación Suroeste-Noreste.

F) Fraccionamiento "Villas del Sur"

Se levantó en campo una línea de TER de 120 m de longitud en el vaso de captación oeste del fraccionamiento Villas del Sur (Figura VII.17), con una orientación Sureste-Noroeste (Figura VII.18).

Figura VII.17. Localización de la TER 10 en el fraccionamiento Villas del Sur.

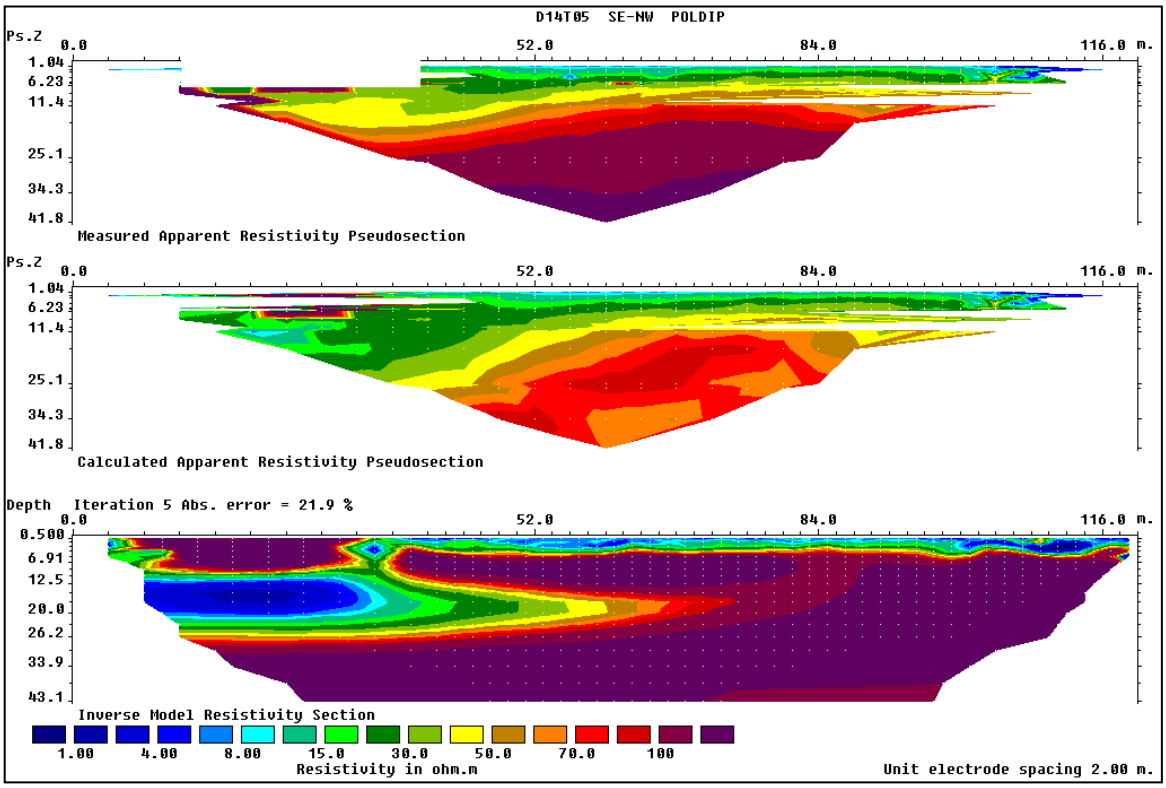


Figura VII.18. Sección TER 10, con orientación Sureste-Noroeste.

G) Fraccionamiento "Palmas del Sol"

Se levantó en campo una línea de TER de 80 m de longitud en el vaso de captación centro del fraccionamiento Palmas del Sol, los demás vasos tenían un tirante considerable de agua al momento del levantamiento, por lo que no se pudieron realizar las demás líneas de TER´s (Figura VII.19), con una orientación Sureste-Noroeste (Figura VII.20).

Figura VII.19. Localización de la TER 11 en el fraccionamiento Palmas del Sur.

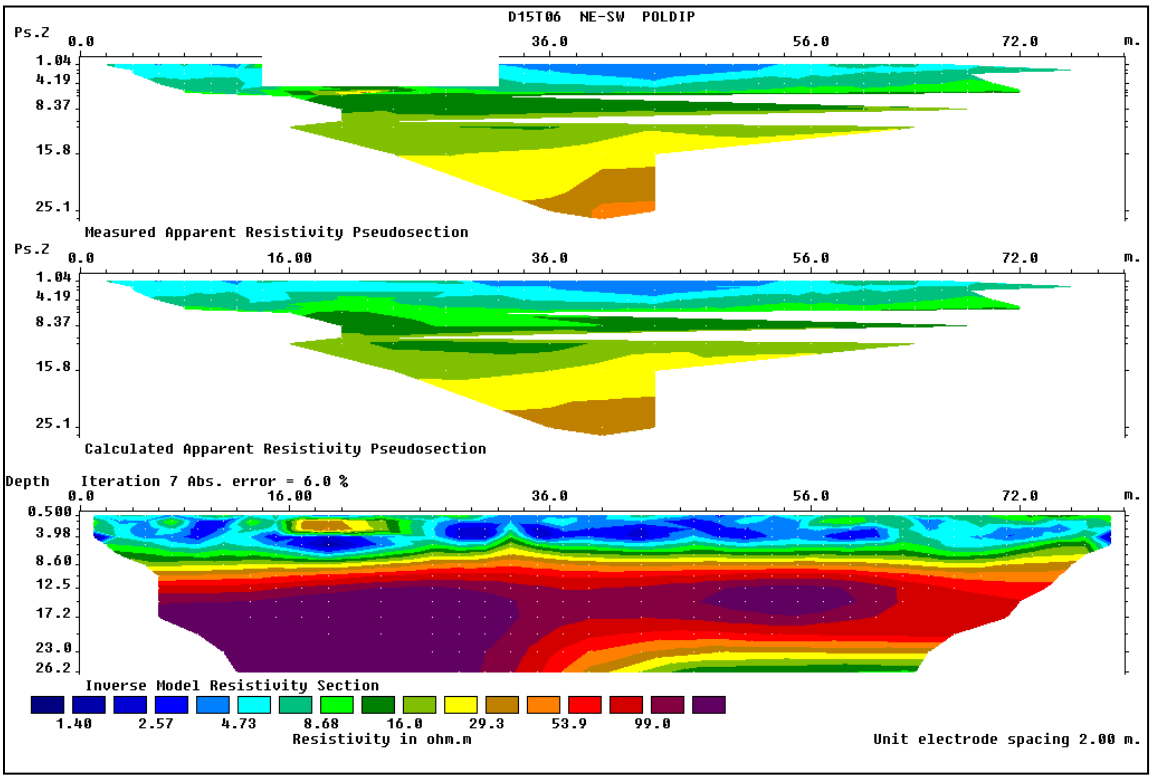


Figura VII.20. Sección TER 11, con orientación Sureste-Noroeste.

H) Fraccionamiento "Las Haciendas"

Se realizó una TER de 70 m de longitud en el vaso de captación centro del fraccionamiento Las Haciendas, el vaso sur tenía un tirante considerable de agua al momento del levantamiento, por lo que no se pudieron realizar las demás líneas de TER´s (Figura VII.21). La TER tiene una orientación Noroeste-Sureste (Figura VII.22).

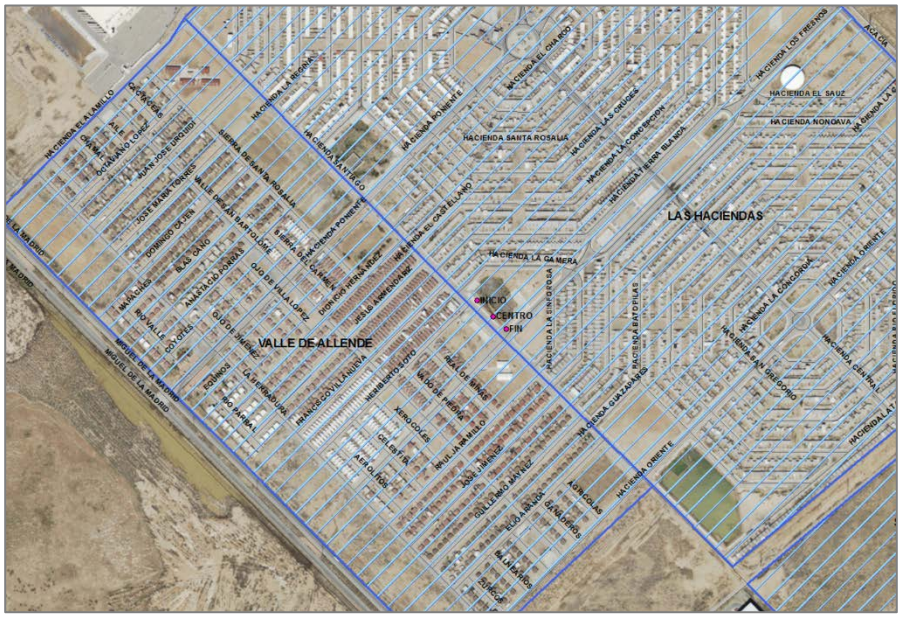


Figura VII.21. Localización de la TER 12 en el fraccionamiento Las Haciendas.

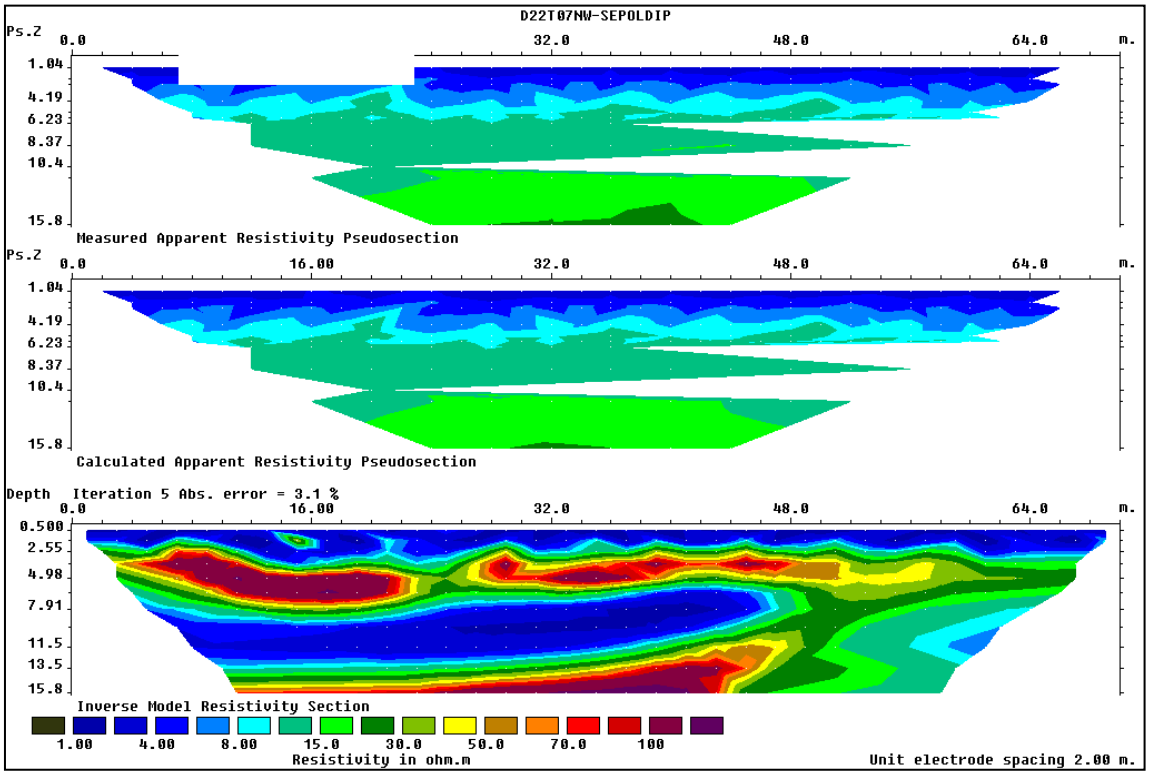


Figura VII.22. Sección TER 12, con orientación Noroeste-Sureste.

I) Fraccionamiento "Santa Isabel"

Se realizó una TER de 82 m de longitud en el vaso de captación del fraccionamiento Santa Isabel (Figura VII.23), con una orientación Noroeste-Sureste (Figura VII.24).

Figura VII.23. Localización de la TER 13 en el fraccionamiento Sta. Isabel.

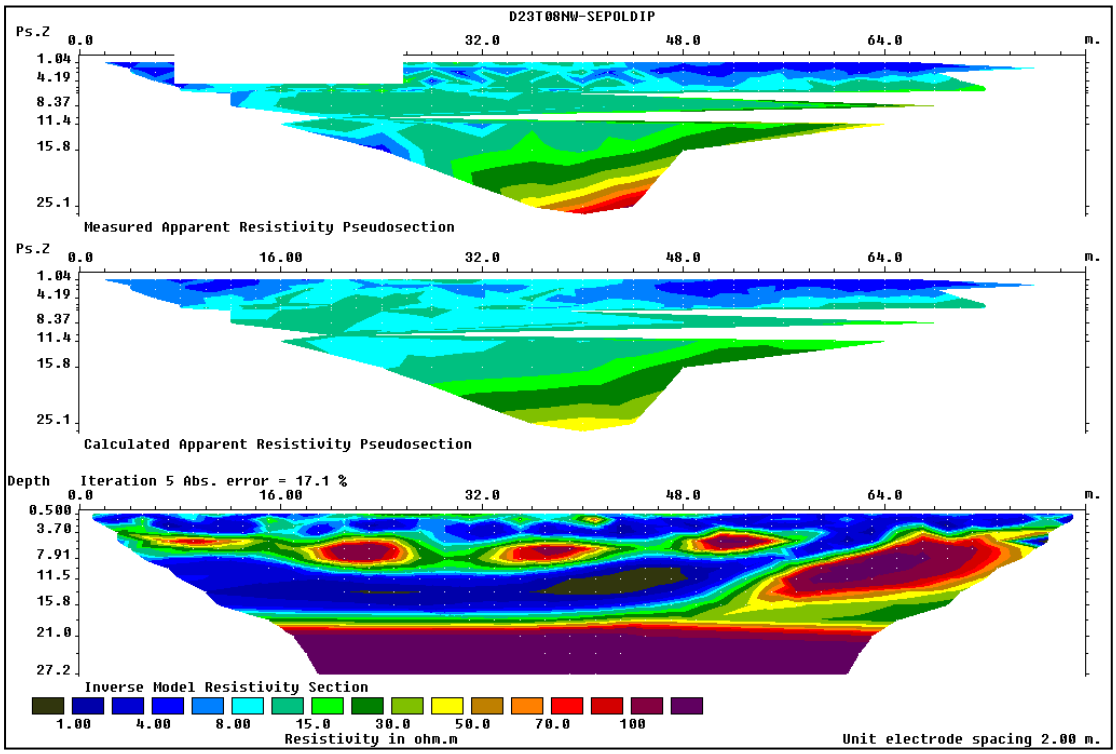


Figura VII.24. Sección TER 13, con orientación Noroeste-Sureste.

J) Fraccionamiento "Senderos del Sol"

Se realizó una TER de 140 m de longitud en el vaso de captación del fraccionamiento Senderos del Sol (Figura VII.25), con una orientación Sur-Norte (Figura VII.26).

Figura VII.25. Localización de la TER 14 en el fraccionamiento Senderos del Sol.

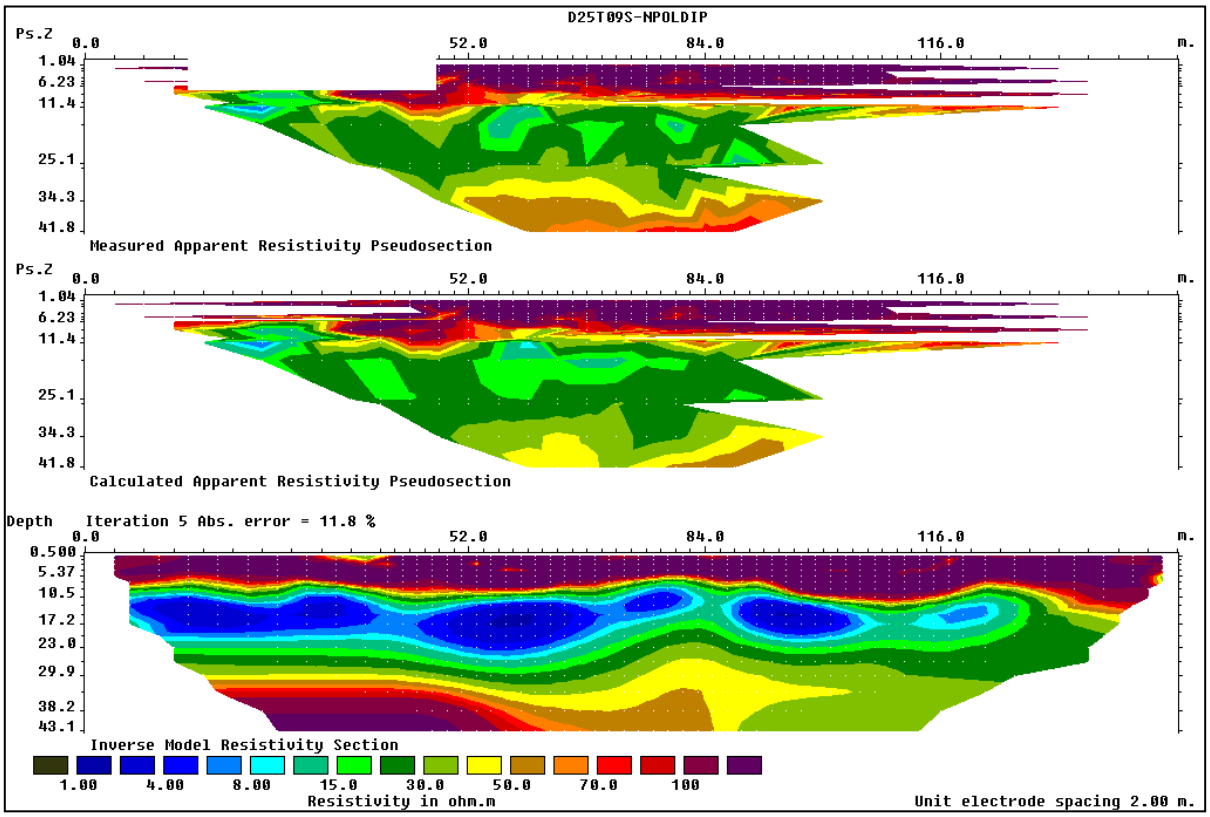


Figura VII.26. Sección TER 14, con orientación Sur-Norte.

VIII. RESULTADOS EINTERPRETACION DE LAS TER´s

Los resultados e interpretación de los perfile geoeléctricos se realizó en base a la clasificación de los rangos resistivos en términos de Unidades Geoeléctricas (UGE´s). Las UGE´s fueron a su vez asociadas con las litologías esperadas en la zona, tales como arenas, arenas limosas y arcillas.

El proceso de interpretación de los datos geoeléctricos a unidades litológicas se llevó a cabo a través de la integración de la información generada en este estudio. Las variaciones en profundidad registradas en el campo resistivo se consideraron consistentes con las observaciones geológicas superficiales en las cuales se observan horizontes litoestratigráficos interestratificados.

La correlación entre rangos resistivos y unidades litológicas se realizó, no solo tomando en consideración el hecho de que el tamaño de grano es directamente proporcional al registro electro resistivo publicados extensivamente en literatura especializada (Palacky, 1987), sino que en este estudio, además, se incluyeron los resultados de dos sondeos exploratorios directos practicados en dos trincheras o zanjas practicadas en la zona de estudio (Figura X), de manera que los rangos litológicos están acotados con observaciones directas de campo (Figura Y). Por lo tanto, la correlación entre UGEs y contenidos litológicos (Tabla II) se considera calibrada in-situ por observación directa.

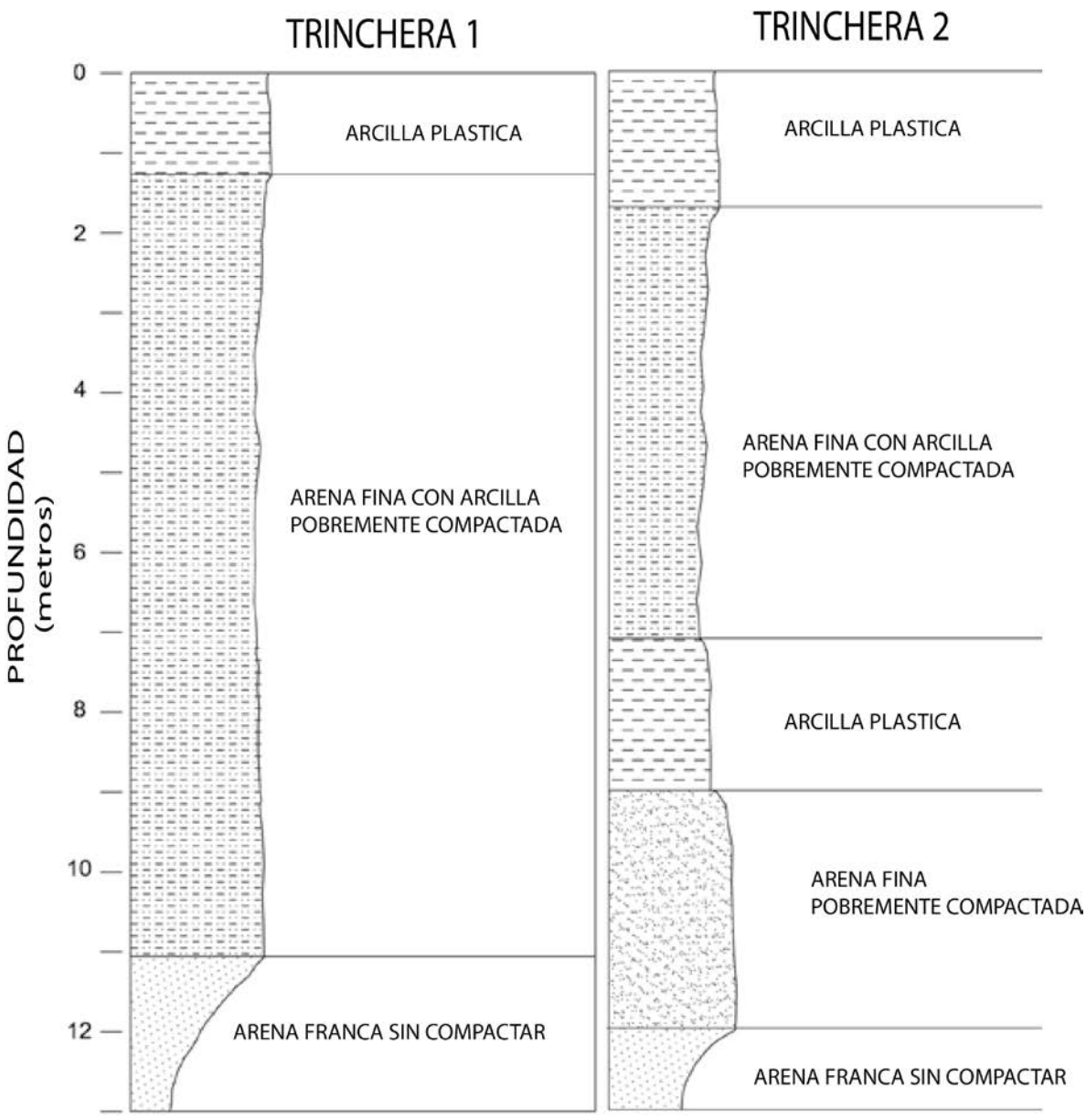


Figura VIII.a. Calibración Litológica "in-situ".

Tabla II. Rangos resistivos y Unidades Geoeléctricas.

Unidad	Litologia	ρ (Ohm-m) Resistividad
UGE 1	ARCILLA (plastica)	< 10
UGE 2	Arena de grano fino	10 - 50
UGE 3	Arean de grano fino compactada	50 - 80
UGE 4	Areana de grano medio con arcilla	80-160
UGE 5	Arena franca no compactada	160-270

VIII.1. Secciones Electroestratigráficas en los vasos de captación de los fraccionamientos afectados por planicies de inundación

A) Fraccionamiento "Puente Alto"

La sección geoeléctrica del vaso de este fraccionamiento muestra, en primer lugar que la máxima longitud de tendido es de solo 40 m, por lo que este vaso adolece de falta de capacidad de almacenamiento. En cuanto a la capacidad de infiltración, el campo electro-resistivo muestra que a partir de los 7 m se localiza un estrato con registros resistivos mayores a los 50 ohm-m, asociados con arenas de grano medio, las cuales, en base a la prueba de permeabilidad reportada por Dena et. al. (2012), tendrían una permeabilidad de 2.7 m/d.

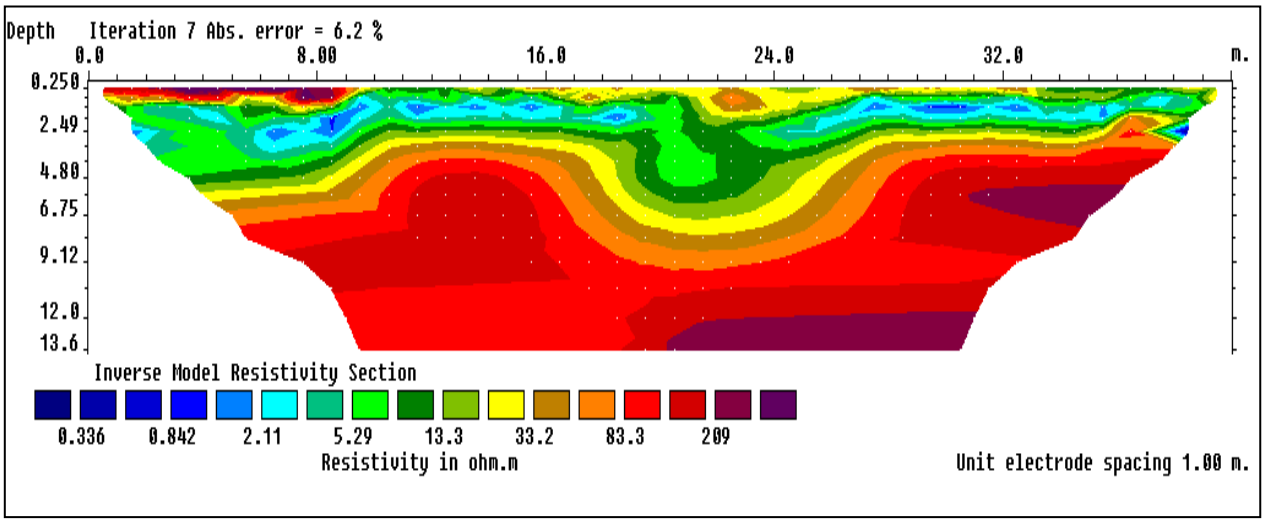


Figura VIII.1. Sección TER 01, con orientación Suroeste-Noreste.

B) Fraccionamiento "Valle de los Cantaros"

La sección geoeléctrica con una longitud máxima de 160 m, muestra que, en este vaso, se localiza un estrato con registros resistivos mayores a los 50 ohm-m a partir de los 7 m de profundidad. Sin embargo, este paquete presenta un espesor de solo 4 m, subyaciéndole, a partir de los 14 m, un paquete de arcillas no permeables con un espesor de 14 a 16 m. Nuevamente, partir de los 40 m se localiza un estrato con registros resistivos mayores a los 50 ohm-m asociados con arenas de grano medio, las cuales, en base a la prueba de permeabilidad reportada por Dena et. al. (2012), tendrían una permeabilidad de 2.7 m/d.

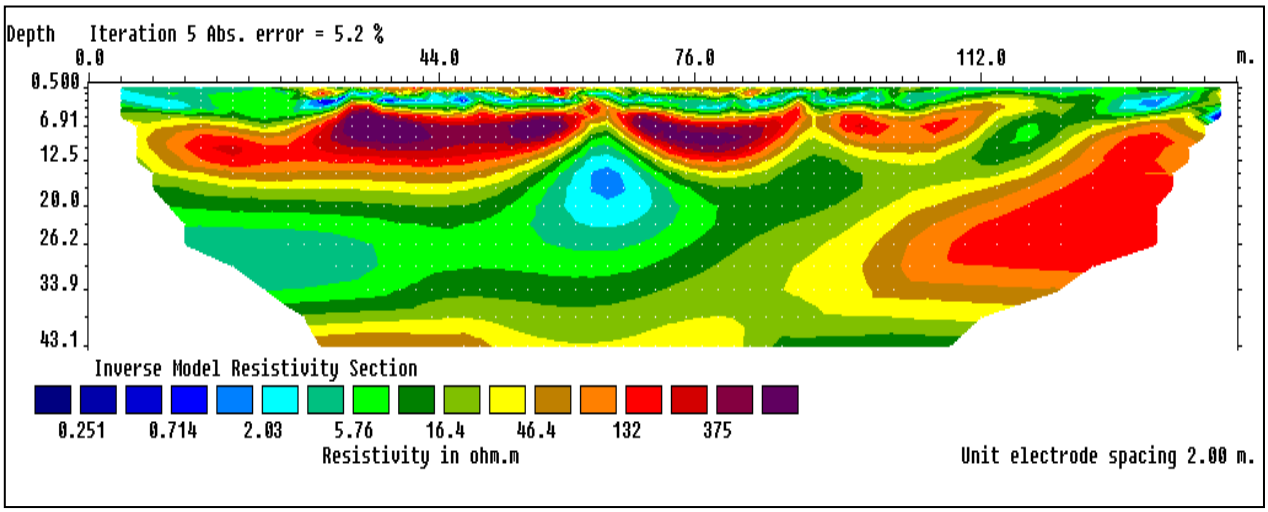


Figura VIII.2. Sección TER 02, con orientación Noreste-Suroeste.

C) Fraccionamiento "Villa Residencial del Real"

En la sección geoeléctrica TER 03 del vaso Norte de este fraccionamiento, con una longitud máxima de 92 m, se observa en los primeros 5 m de profundidad material con bajos valores resistivos asociados a arcillas, subyaciendo un estrato con registros resistivos mayores a los 50 ohm-m a partir de los 6 m de profundidad. Sin embargo, este paquete presenta un espesor de solo 3 m, subyaciéndole, a partir de los 10 m, un paquete de arcillas no permeables con un espesor considerable aproximadamente de 12 m y adelgazándose a partir de la C.M. 64 m relacionándose mas a material limosos. Nuevamente, a partir de los 26 m se localiza un estrato con registros resistivos mayores a los 50 ohm-m asociados con arenas de grano medio, las cuales tendrían una permeabilidad de 2.7 m/d (Dena et. al., 2012) (Figura VIII.3). En la TER 04 localizada en el vaso Sur, se muestra la misma tendencia interestratificada de materiales arcillosos y arenosos, sin embargo, a partir de la C.M. de 64 m se

observa un paquete de altos valores resistivos de más de 50 ohm-m, muy somero a tan solo 7 m de profundidad y que se comunica hasta los 26 m de profundidad (Figura VIII.4).

.

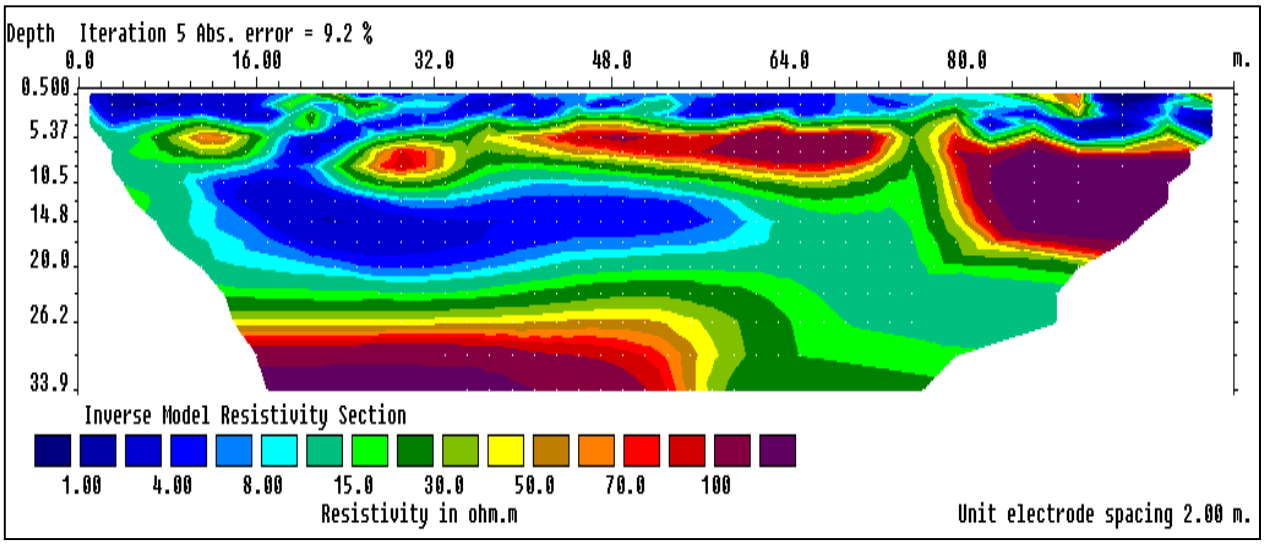


Figura VIII.3. Sección TER 03, con orientación Noroeste-Sureste.

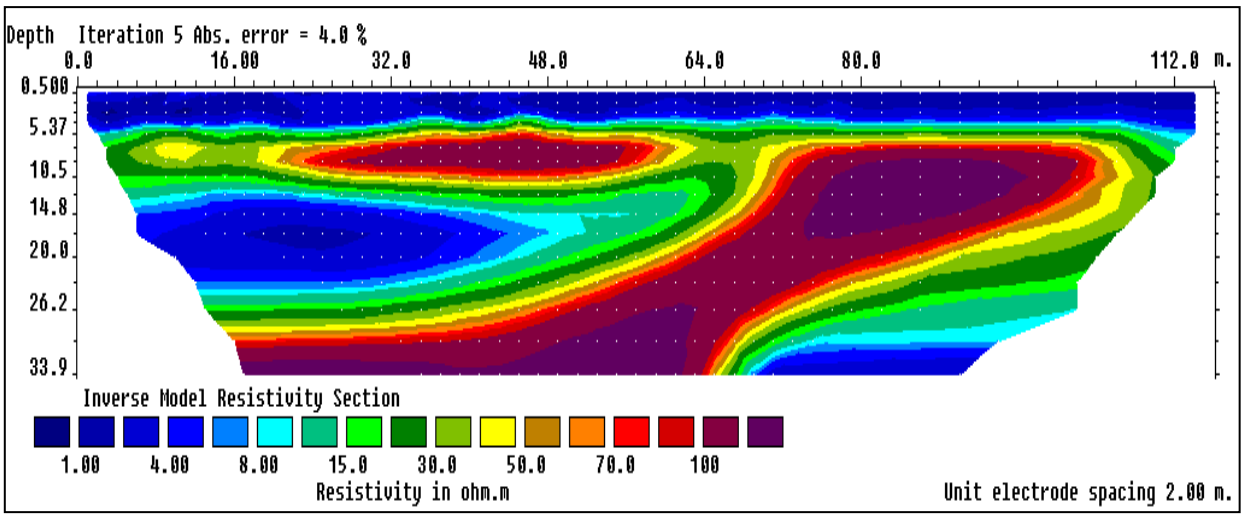


Figura VIII.4. Sección TER 04, con orientación Noroeste-Sureste.

D) Predio "Centro Industrial Juárez"

Los resultados muestran una sección en la cual se presentan valores resistivos de más de 50 ohm-m a partir de la C-M. de 114 m de forma somera en el vaso de captación del parque industrial. En la parte Oeste de la TER se observa un estrato limo-arcilloso a los 4 m de profundidad, a los 18 m de profundidad y en la C.M. de 114 m hasta 170 m, a una profundidad de aproximadamente 8 m.

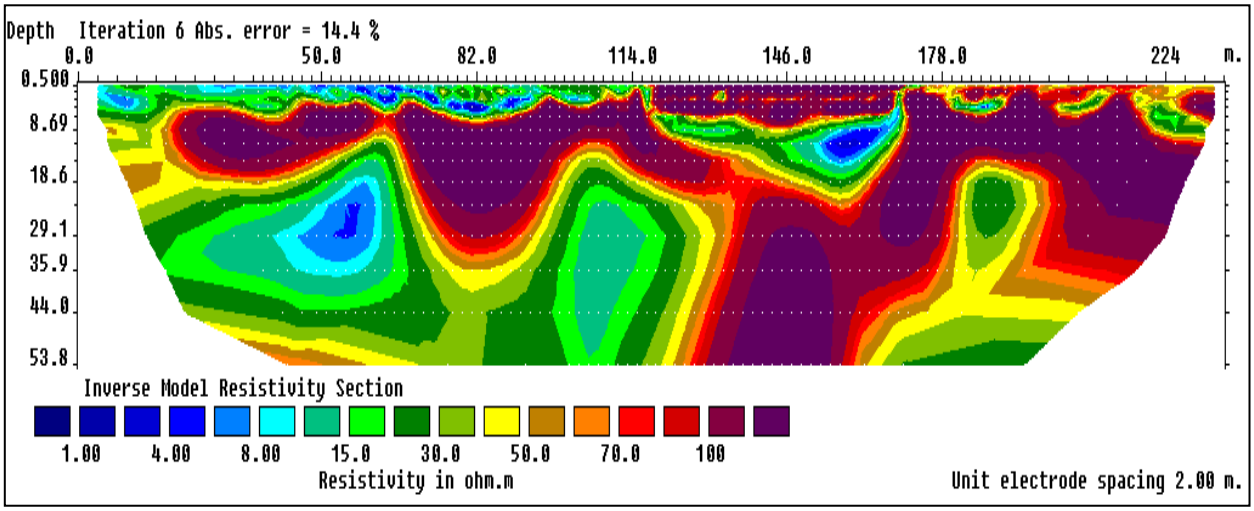


Figura VIII.5. Sección TER 05, con orientación Oeste-Este.

E) Fraccionamiento "Manuel Gómez Morín"

En los vasos de captación de este fraccionamiento, en la TER 06 se observa una interestratificación más homogénea, en la cual los valores bajos resistivos

asociados a arcillas plásticas y a limos, en los extremos de la TER, desde la superficie hasta los 5 m de profundidad. Le subyace registros altos en resistividad asociados con arenas con un espesor de 5 m aproximadamente (Figura VIII.6).

La TER 07 presenta una capa continua de limos con un espesor de 7 m, subyaciendo esta capa se observa material asociado a arenas a partir de los 7 m hasta los 20 m de profundidad, para finalmente terminar la sección con un paquete considerable de limos o arenas de grano fino, con un espesor de 18 m hasta la C.M. 74 m (Figura VIII.7).

La TER 08 presenta una capa continua de limos con un espesor de 7 m, subyaciendo a esta capa se observa material asociado a arenas a partir de los 7 m hasta los 16 m de profundidad, para finalmente terminar la sección con un paquete considerable de arcillas, con un espesor de 28 m, adelgazándose hasta la C.M. 90 m con un espesor de 6 m (Figura VIII.8).

En la TER 09 se observa una interestratificación más homogénea, en la cual los valores bajos resistivos asociados a limos, se encuentran desde la superficie hasta los 5 m de profundidad. Le subyacen valores altos en resistividad asociados a arenas con un espesor de 9 m aproximadamente. A partir de los 15 m de profundidad se presentan valores bajos asociados a limos con un espesor de 6 m hasta la C.M. de 48 m, presentando así en el extremo noreste, arenas de grano fino de los 15 m hasta los 27 m de profundidad (Figura VIII.9).

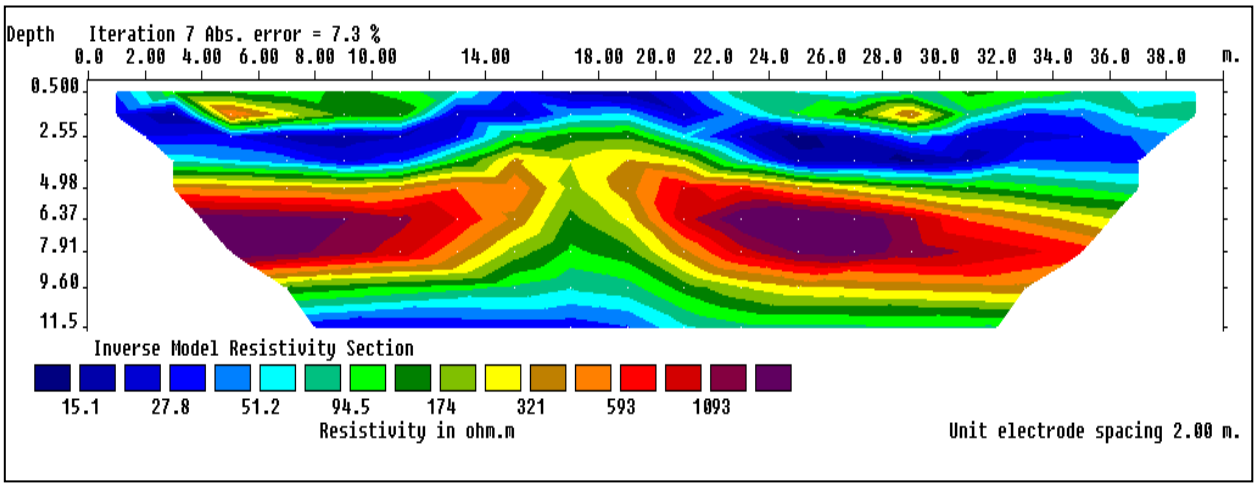


Figura VIII.6. Sección TER 06, con orientación Noroeste-Sureste.

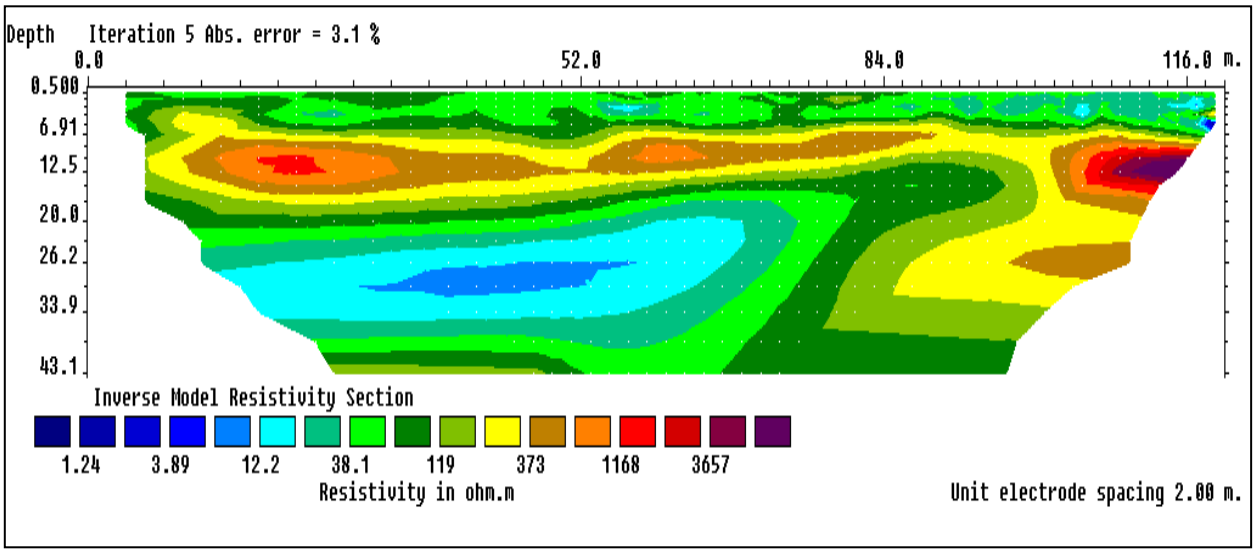


Figura VIII.7. Sección TER 07, con orientación Sureste-Noroeste.

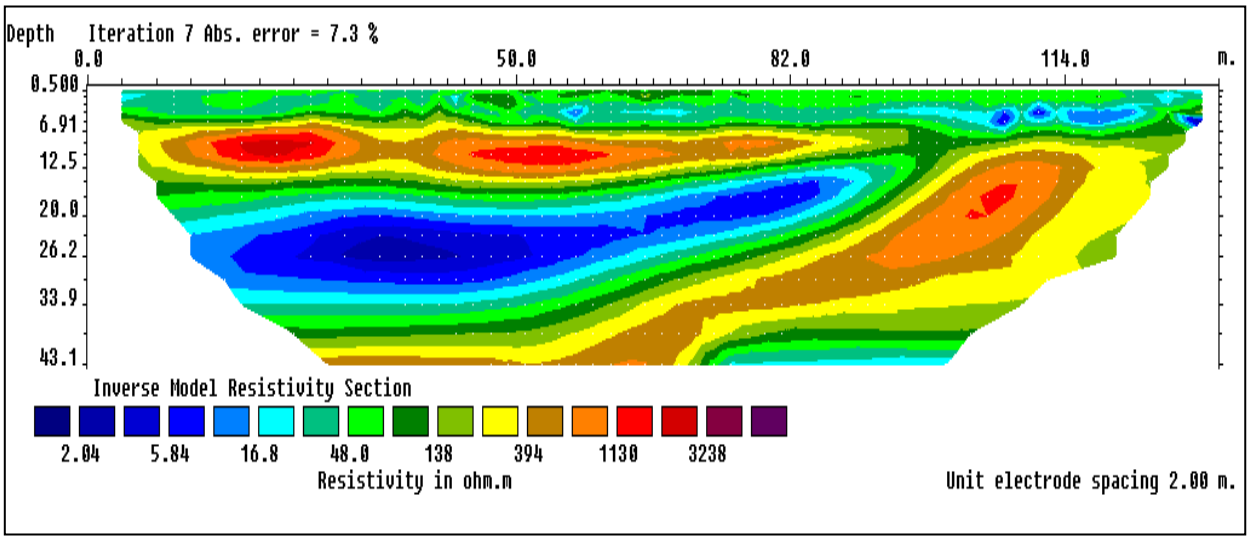


Figura VIII.8. Sección TER 08, con orientación Este-Oeste.

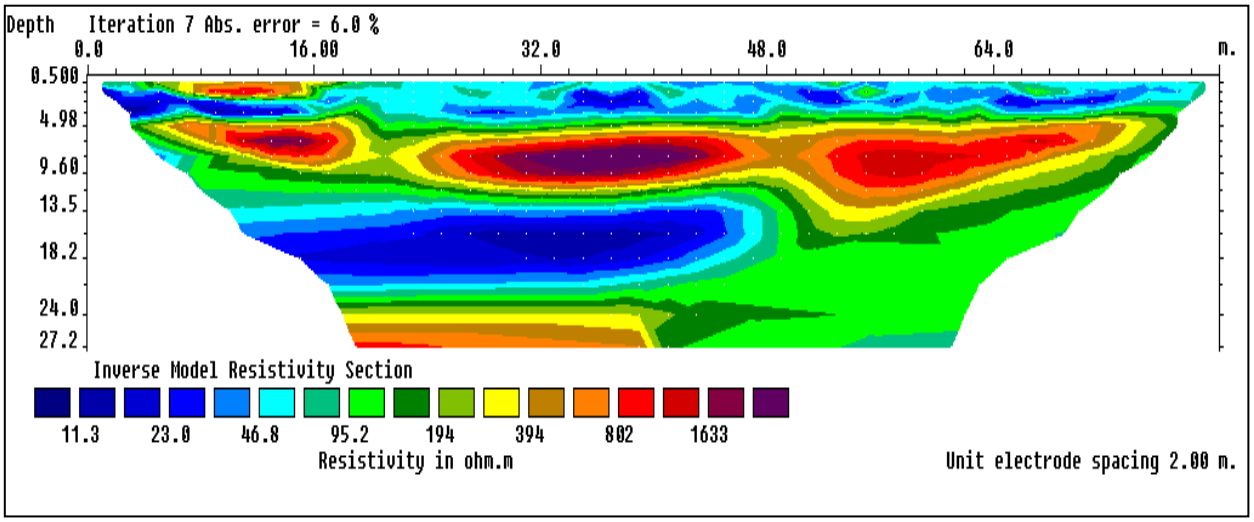


Figura VIII.9. Sección TER 09, con orientación Suroeste-Noreste.

F) Fraccionamiento "Villas del Sur"

La TER 10, a partir de la C.M. de 34 m presenta una capa continua de arcillas con un espesor de 3 m, subyaciendo esta capa se observa material asociado a arenas a partir de los 7 m hasta los 20 m de profundidad. En la parte final del perfil , a partir de los 34 m y hasta los 116 m en C.M. se observa la presencia de un paquete homogéneo con registro resistivo asociado con arenas de grano fino (Figura VIII.7).

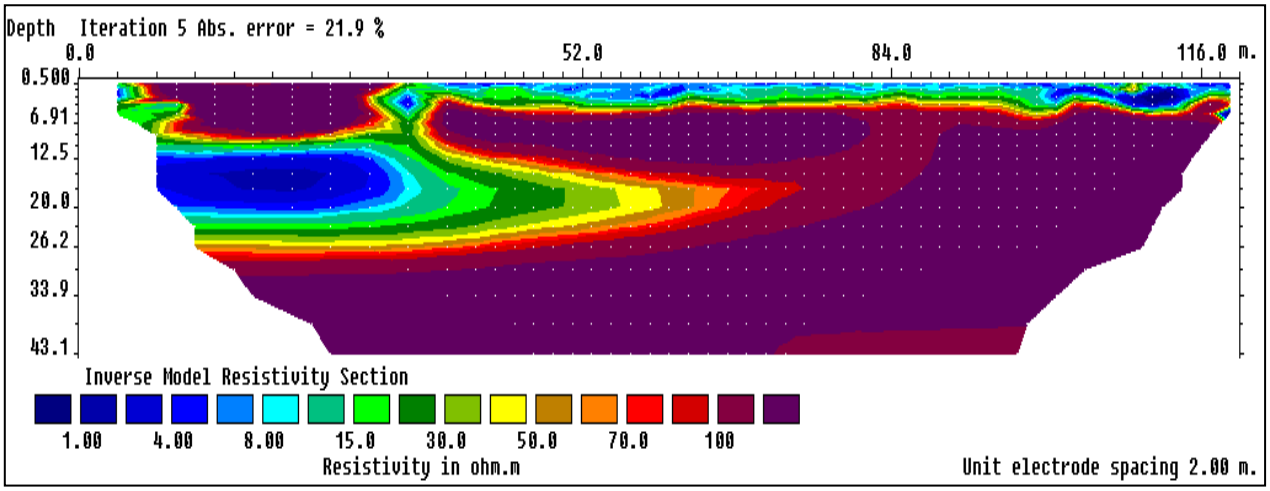


Figura VIII.10. Sección TER 10, con orientación Sureste-Noroeste.

G) Fraccionamiento "Palmas del Sol"

La sección tomografía geoeléctrica del vaso de captación de este fraccionamiento (Figura VIII.11) muestra una sección homogénea o continua compuesta por un paquete de arcillas de casi 9 m de espesor al cual le subyace un paquete electroresistivo de más de 50 ohm-m asociado con arenas de grano medio que alcanza profundidades de hasta 26 m.

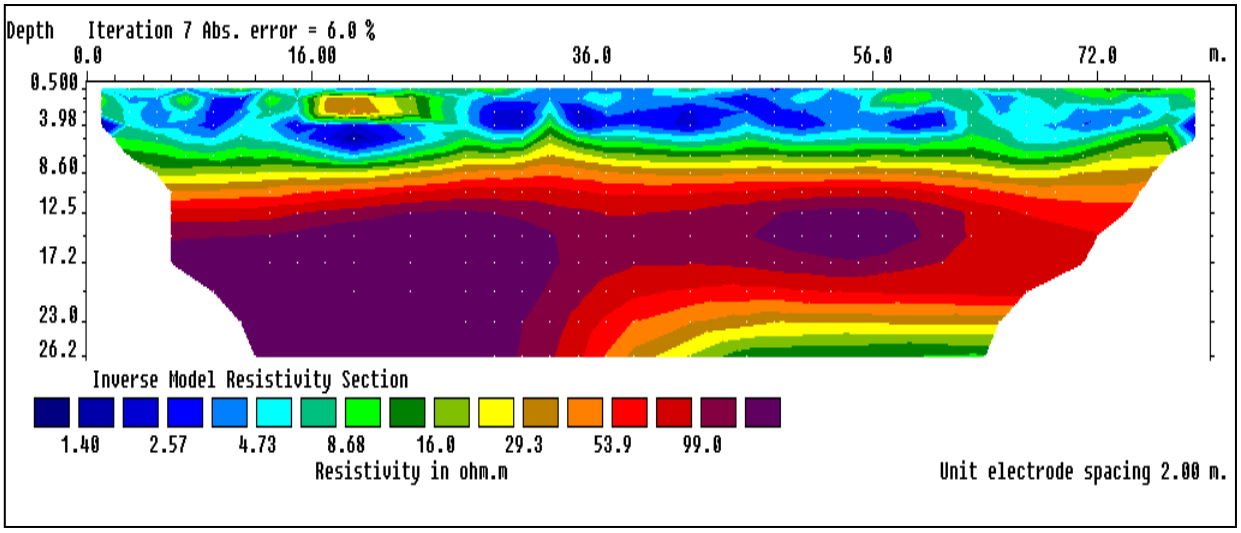


Figura VIII.11. Sección TER 11, con orientación Sureste-Noroeste.

H) Fraccionamiento "Las Haciendas"

La sección tomografía geoeléctrica del vaso de captación de este fraccionamiento (Figura VIII.12) muestra una sección homogénea o continua compuesta por un paquete de arcillas de casi 3 m de espesor, al cual le subyace un paquete electro-resistivo de más de 50 ohm-m asociado con arenas de grano medio con un espesor de 5 metros aproximadamente. A partir de una profundidad promedio de 8 m, el campo resistivo es dominado por registros muy bajos asociados con arcillas. Este paquete sobreyace sobre un horizonte de valores resistivos mayores a 50 ohm-m asociados con arenas de granos fino a partir de los 15 m aproximadamente.

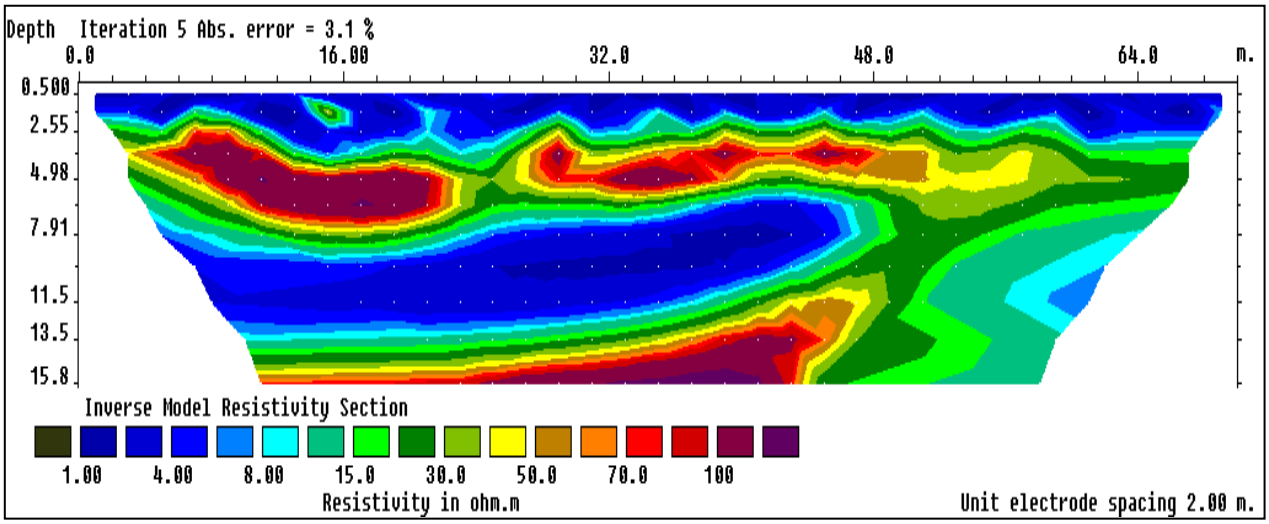


Figura VIII.12. Sección TER 12, con orientación Noroeste-Sureste.

I) Fraccionamiento "Santa Isabel"

La sección tomografía geoeléctrica del vaso de captación de este fraccionamiento (Figura VIII.13) muestra una sección casi homogénea o continua compuesta por un paquete de arcillas de casi 4 m de espesor, al cual le subyace un paquete electro-resistivo de más de 50 ohm-m asociado con arenas de grano medio con un espesor de 3 metros aproximadamente. A partir de una profundidad promedio de 8 m, el campo resistivo es dominado por registros muy bajos asociados con arcillas. A este paquete le subyace un cuerpo resistivo homogéneo con valores resistivos mayores a 100 ohm-m asociados con arenas de granos medio a partir de los 20 m de profundidad aproximadamente.

.

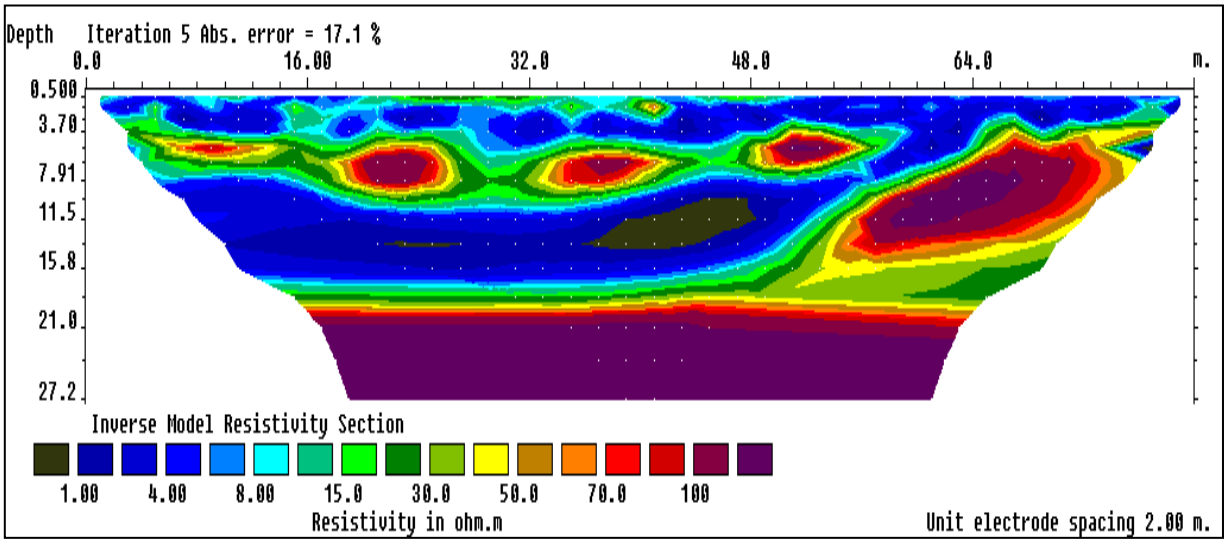


Figura VIII.13. Sección TER 13, con orientación Noroeste-Sureste.

J) Fraccionamiento "Senderos del Sol"

La sección tomografía geoeléctrica del vaso de captación de este fraccionamiento (Figura VIII.14) muestra una sección casi homogénea o continua compuesta por un paquete arenoso de casi 6 m de espesor, al cual le subyace un paquete electro-resistivo de más de 8 ohm-m asociado con arcillas plásticas, con un espesor de 13 metros aproximadamente. A partir de una profundidad promedio de 23 m, el campo resistivo es nuevamente dominado por registros altos asociados con arenas de grano fino a medio.

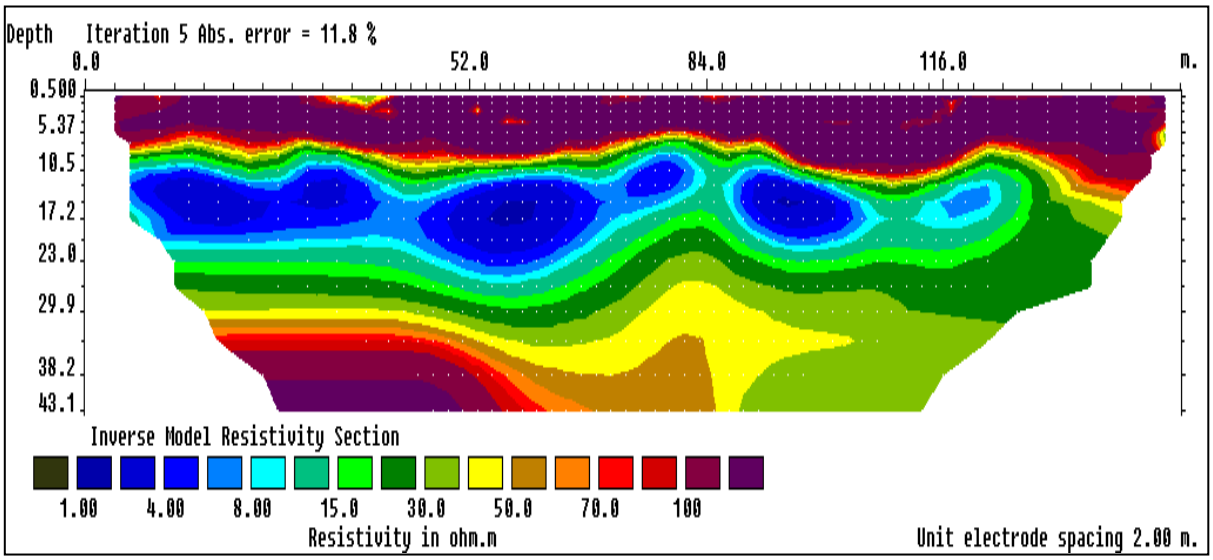


Figura VIII.14. Sección TER 14, con orientación Sur-Norte.

Finalmente los resultados del análisis de las condiciones geohidrológicas o capacidad de infiltración de los vasos de captación se pueden resumir conforme a la Tabla

ID	DESARROLLO	OBRA INFILTRACION	PROFUNDIDAD ESTRATO PERMEABLE (m)	COMENTARIOS
1	VALLE DE LOS CANTAROS	SI	40	Requiere lefranc
2	PUENTE ALTO	SI	7	Requiere lefranc
3	VILLA RESIDENCIAL DEL REAL 1	SI	26	Requiere lefranc
4	VILLA RESIDENCIAL DEL REAL 2	SI	26	Requiere lefranc
5	CENTRO INDUSTRIAL JUAREZ	SI	5	Requiere lefranc
6	VILLAS DEL SUR	SI	7	Requiere lefranc
7	PALMAS DEL SOL	SI	10	Requiere lefranc
8	LAS HACIENDAS	SI	16	NO OPERA
9	SANTA ISABEL	SI	20	Requiere lefranc
10	SENDEROS DEL SOL	SI	25	Requiere lefranc
11	GOMEZ MORIN 1	NO	entre 5 y 10	Requiere lefranc
12	GOMEZ MORIN 2	SI	43	Requiere lefranc
13	GOMEZMORIN 3	SI	43	Requiere lefranc
14	GOMEZ MORIN 4	SI	43	Requiere lefranc

La interpretación del resumen de los resultados muestra que los estratos de desplante son, en todos los casos, a profundidades mayores a los 5 m. Sin embargo, en la mayoría de los vasos analizados la alternancia arcillas, arenas, arcillas, arenas requiere infiltrar a mas de 20 de profundidad e incluso a mas de 40 m en el fraccionamiento Gómez Morín.

Respecto de la velocidad de infiltración, en las trinchera 1 se realizoo una prueba de permeabilidad tipo Lefranc. Los resultados de la prueba de permeabilidad (Tabla III) indican una conductividad hidráulica promedio de 2.5 m/d.

Tabla III. PRUEBA DE PERMEABILIDAD.

Tiempo (min)	Profundidad	H0-H1 (m)	t0-t1 (min)	C (1/m)	A (m2)	k (m/min)	k (m/d)
8	0.160	0.600	8	1.5665	0.03243	0.001499	2.16
18	0.340	0.420	10	1.5665	0.03243	0.001672	2.41
28	0.444	0.316	10	1.5665	0.03243	0.001590	2.29
39	0.551	0.209	11	1.5665	0.03243	0.001680	2.42
49	0.620	0.140	10	1.5665	0.03243	0.001752	2.52
66	0.712	0.048	17	1.5665	0.03243	0.002124	3.06
81	0.760	0.000	15	1.5665	0.03243		
						PROMEDIO:	**2.48**

Asumiendo entonces, en base a la correlación de Unidades Geoeléctricas, una permeabilidad de 2.5 m/d para la zona, debe considerarse entonces, que la taza de infiltración es de aproximadamente 4 litros por segundo, lo que permite desalojar un volumen maximo de hasta 1000 m^3 en 72 horas. Sin embargo, debe considerarse que esta taza de infiltración, no es significativa para impactar la velocidad de captación correspondientes a gastos hidráulicos mucho mayores, por lo que los vasos deberán tener capacidad de manejo para

volúmenes escurridos asociados con lluvias con periodo de retorno de 25 años, como lo marca la normatividad de la ciudad.

IX. ANALISIS DEL ESTRATO DE DESPLANTE DEL BORDO MIGUEL DE LA MADRID HURTADO

Para efectos de este análisis, fue necesario re-interpretar las 52 TERs realizadas sobre el Bordo MMH y los sondeos de exploración directa en términos de la elevación de terreno aguas arriba de esta estructura. En términos generales se seleccionaron aquellas tomografías en que la elevación del pie de talud es coincidente con un registro geoeléctrico con valores mayores a los 50 ohm-m, asociados con arenas de grano medio a grueso, consideradas ya como una unidad litológica permeable. La zona donde se observó mayor concordancia con el criterio mencionado, fue la parte Noroeste del Bordo. Sin embargo, donde efectivamente se corroboró, por medio de estudios geoeléctricos y sondeos geotécnicos, que la estructura sí estuviera desplantados sobre estratos arenosos, fue la zona geográfica comprendida entre las tomografías 41, 42, 43 y 44 (Figura IX.1). En esta zona, aun y cuando el numero de golpes de la prueba de penetración estándar es muy alto (N > 30), la cohesion es prácticamente nula, además de que la condición de drenaje favorecería el flujo de agua por debajo del bordo, el cual carece de dentellon de arcilla, por lo que este subdrenaje se considera como una condición desfavorable para esta estructura.

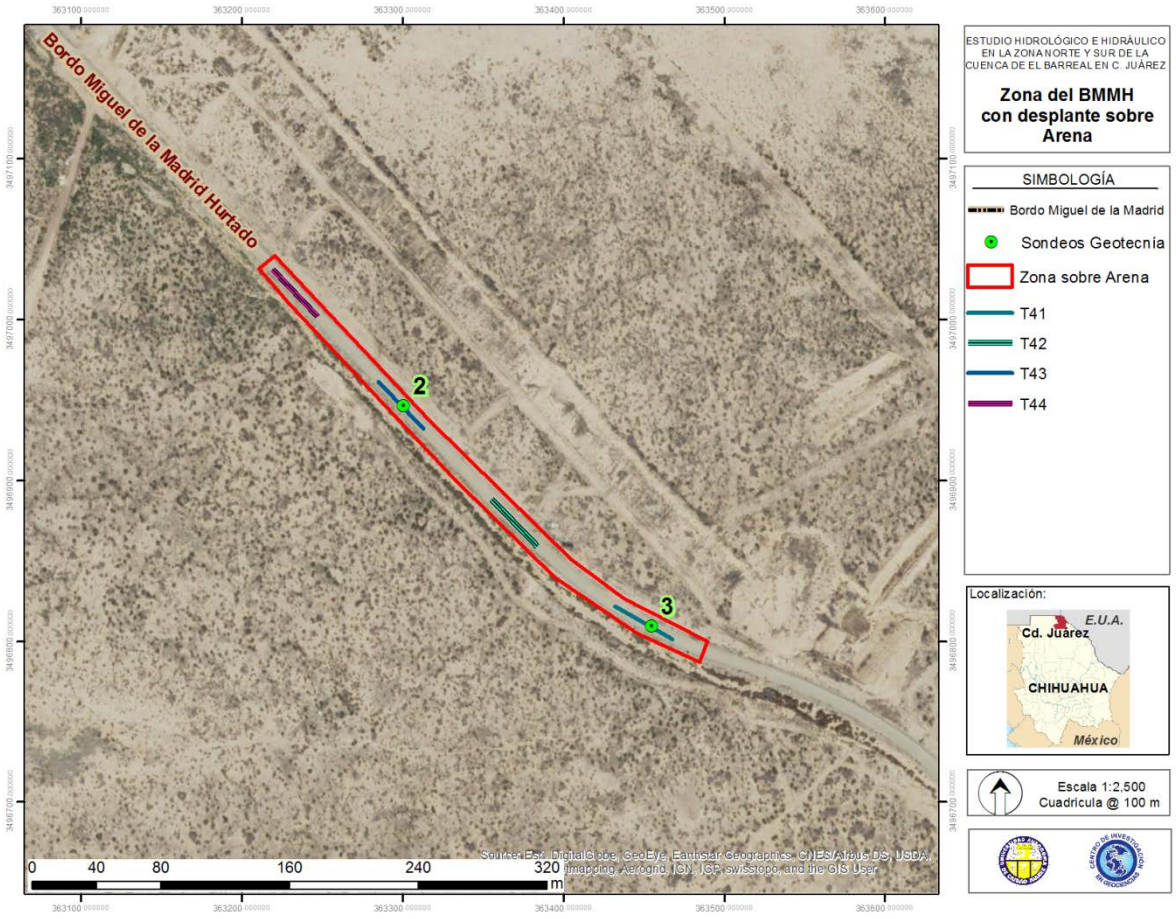


Figura IX.1 Zona en que el bordo MMH esta desplantado sobre materiales permeables.

X. CONCLUSIONES

Conforme a los términos de referencia, las conclusiones de los entregables de esta etapa son:

I. Análisis de pozos de absorción:

a. Las profundidades de las estructuras de infiltración deberán ser mayores a la profundidad del paquete de arcillas plásticas existentes en la zona lagunar del barreal (en algunos zonas mayores a los 40 m).

b. No considerar como eficientes, en términos hidráulicos, obras de infiltración emplazadas en el paquete "intermedio" de arcillas (entre 5 m a 10 m de profundidad).

c. Aun y cuando la mayoría de las obras existentes sí disponen de estructura de infiltración, debe revisarse tanto en memorias de diseño como con pruebas de permeabilidad "in-situ" su capacidad real de infiltración al estrato de arena más profundo (revelado por la TER).

d. La velocidad de infiltración de 4 lps aproximadamente garantiza un manejo de solo 1000 m^3 en 72 horas.

e. Los vasos de captación deben ser capaces entonces de almacenar completamente el volumen correspondiente a una tormenta con periodo de retorno de 25 años sin considerar la capacidad de infiltración.

II. Análisis estrato de desplante del bordo Miguel de la Madrid Hurtado:

a. La zona de 344 m, comprendida entre las TERs 41, 42, 43 y 44, esta desplantada sobre materiales permeables.

b. El desplante en estratos permeables favorece condiciones de subdrenaje.

c. En la zona desplantada sobre estratos permeables no existe la trinchera de material compacto no permeable requerida en zonas de desplante sobre materiales permeables.

XI. BIBLIOGRAFÍA

1) Loke M.H, Akworth I. and Dhalin, T., 2003, A comparison of smooth and blokcy inversions methods in 2D electrical imaging surveys, Exploration Geophysics, 32, 182-187.

2) Palacky, G. I., 1987, Resistivity characteristics of geological targets. In: M. Nabighian, Editor, Electromagnetic Methods in Applied Geophysics-Theory, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, pp.53-129.

3) Sharma P., 1997. Environmental and engineering geophysics, Cambridge University Press, pp. 500, ISBN: 0521576326.

INSTITUTO DEL FONDO NACIONAL DE LA VIVIENDA PAR LOS TRABAJADORES

I N F O N A V I T

"ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO EN LA ZONA NORTE Y SUR DE LA CUENCA DE EL BARREAL EN CIUDAD JUAREZ, CHIHUAHUA"

REPORTE

PROPUESTA DE OBRAS DE NUEVAS OBRAS DE MITIGACION, ESTRATEGIAS DE SOLUCION GLOBAL Y RESUMEN EJECUTIVO

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN 3
II. OBJETIVO 3
III. ALCANCE 3
IV. LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO 4
VI. CARACTERISTICAS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO 10
VI.1.1.- Clima 10
VI.1.2.- Precipitación pluvial 11
VI.1.3.- Topografía 13
VI.1.4.- Fisiografía 14
VI.1.5.- Geología 15
Depósitos de Abanico Aluvial 16
Depósitos Lacustres 17
Sedimentos Fluviales 17
Sedimentos Eólicos 18
VI.1.6.- Suelos y Vegetación 19
VII. ESTRATEGIAS PARA EL CONTROL Y MANEJO DE AGUA PLUVIAL 20
VII.2. ANALISIS DE LOS HALLAZGOS HIDROLOGICOS E HIDRAULICOS 22
VII.2.2. CONCLUSIONES HIDROLOGIA 32
VII.3. HIDRAULICA 32
VIII. GEOTECNIA DEL BORDO MMH Y PROPUESTA DE MEJORAMIENTO 40
VIII.1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 44
A. ESTRATEGIA A CORTO PLAZO 45
VIII.2. Proyecto Geométrico de Prolongación del Bordo MMH 47
B. ESTRATEGIAS A PLAZO MEDIANO 51
VIII.3. ACCIONES DE LA ESTRATEGIA A MEDIANO PLAZO 52

I. INTRODUCCIÓN

En Ciudad Juárez, en el estado de Chihuahua, durante la temporada de lluvias se presentan situaciones de riesgo a causa de la intensidad con que se presenta la precipitación. El problema se genera aguas abajo de los principales arroyos y diques que desembocan hacia asentamientos urbanos, incrementando con esto los daños a la población y a la infraestructura urbana en general. Ante esta situación es imperativo llevar a cabo la actualización de los estudios hidrológicos requeridos para los diferentes periodos de retorno en las zonas con un marcado crecimiento urbano, de tal forma que podamos conocer a detalle las modificaciones que se han presentado en las cuencas, con el fin de diseñar las obras de control hidráulico requeridas para salvaguardar tanto la vida como de la propiedad en un ambiente de convivencia armónico y sustentable con el medio ambiente.

II. OBJETIVO

Emitir un instrumento ejecutivo a nivel solución hidrológica e hidráulica global que sintetice las condiciones hidrológicas y esquemas de solución de la subcuenca El Barreal actualizado al 2018.

III. ALCANCE

Generar un documento que englobe la problemática general y condiciones de operación hidráulica actual de la subcuenca El Barreal ante eventos hidrometeorológicos.

NORMATIVIDAD

Al ser El Barreal una cuenca de tipo cerrado o endorreico, sin drenaje a ninguna corriente que desemboque al mar, los escurrimientos y cuerpos de agua de esta cuenca no se consideran como aguas nacionales conforme a la definición de este concepto en el artículo 27 de la Constitución de los Estados Unidos Mexicanos, por lo que el manejo y regulación de este sistema hídrico no se somete a la ley de Aguas Nacionales ni a la jurisdicción de la

Comisión Nacional del Agua.

Es entonces la autoridad local quien define la estrategia de manejo de escurrimientos en esta zona. Los instrumentos de ordenamiento territorial en cuanto a escurrimientos disponibles al momento son el *Plan Sectorial de Manejo de Aguas Pluviales* publicado por el IMIP en el 2004 y el *Estudio, Estrategias y Propuestas para el Control y Manejo de agua Pluvial en las zonas Sur y Oriente de Ciudad Juárez, Chih*., publicado por el Gobierno del Estado de Chihuahua en el 2009.

IV. LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO

IV.1. Ubicación de la zona del proyecto

El proyecto en cuestión se localiza en el municipio de Ciudad Juárez, Estado de Chihuahua, en la Región Hidrológica "**Bolsón del Hueco**", en la cuenca definida por el Plan Sectorial de Manejo de Agua Pluvial (PSMAP) Zona **VIII - El Barreal** al sur de la ciudad, tal como se puede ver en la Figura IV.1.1.

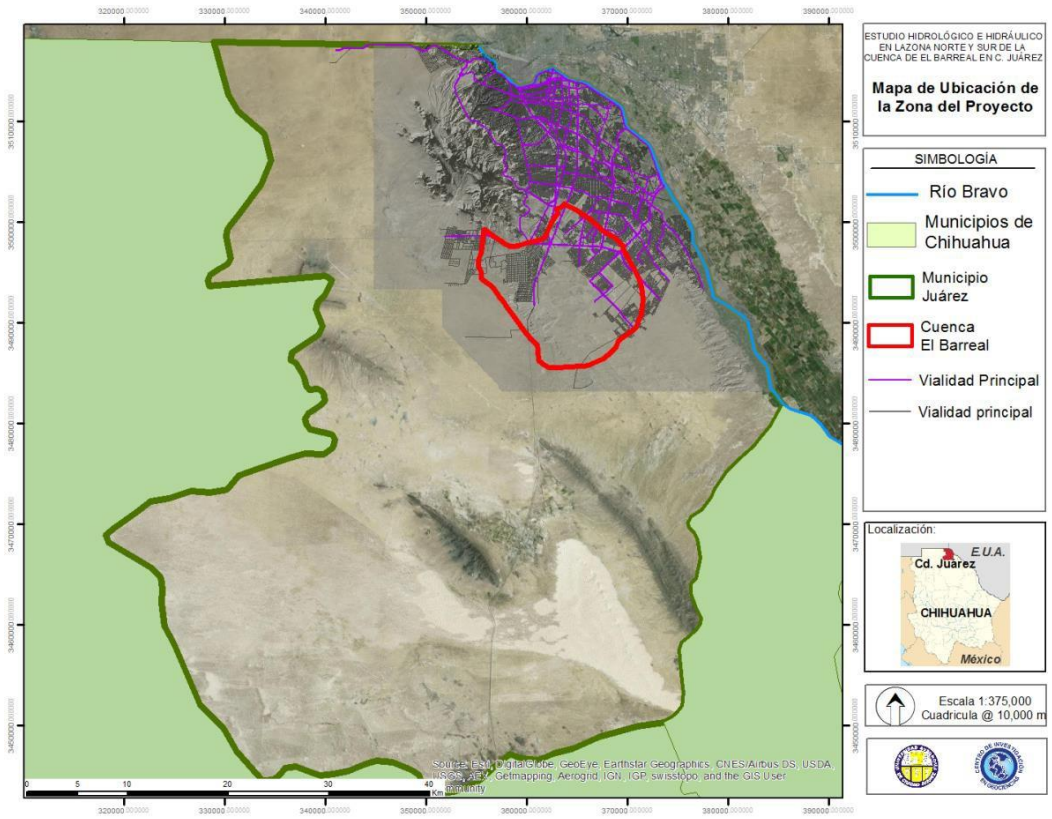


Figura IV.1.1. Localización general de la cuenca El Barreal en Cd. Juárez.

V. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA HIDROLÓGICO

La cuenca hidrológica del Barreal es una cuenca endorreica donde todos los escurrimientos de tipo intermitente convergen en una zona baja definida como laguna de patos. En esta laguna se han reportado recientemente (2006 y 2008) inundaciones ante eventos de lluvia de hasta 25 años de periodo de retorno. Las inundaciones registradas en esta zona obedecieron al efecto combinado de un tren de lluvias con periodo de retorno de 25 años y falla de estructuras aguas arriba tales como la ruptura de la Presa Santa Elena I, la falta de capacidad de los diques Charly y Santa Elena II, la carencia de una última barrera de blindaje hidráulico de la zona ya desarrollada, además de la colmatación de estructuras de infiltración en algunos de los vasos de contención de cada desarrollo o fraccionamiento localizados en la zona lagunar.

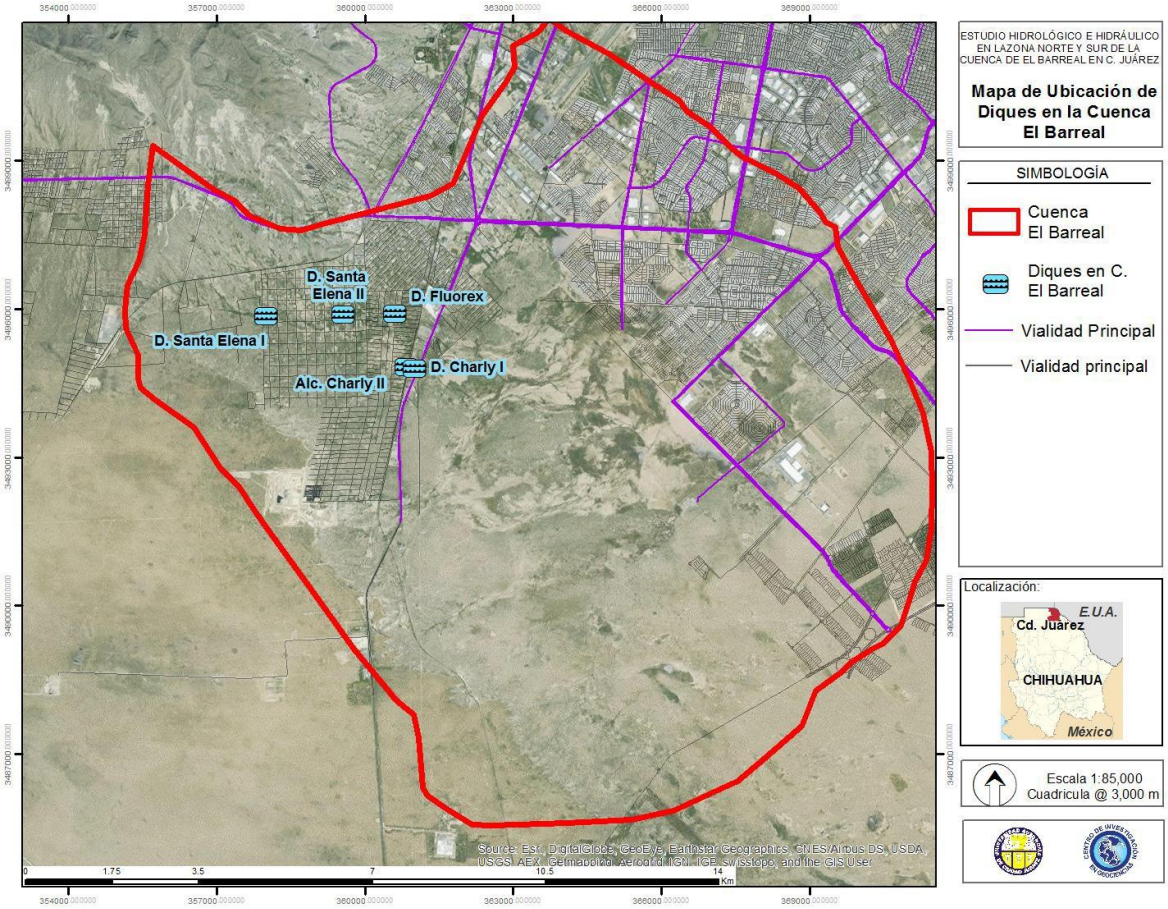


Figura V.1. Localización general de la cuenca El Barreal en Cd. Juárez.

V.1. Descripción de la problemática

Los constantes embates de los fenómenos hidrometeorológicos extremos, tales como lluvias extraordinarias en los últimos años han ocasionado pérdidas humanas y materiales cuantiosas, así como daños a la infraestructura urbana de la ciudad.

El Barreal es una cuenca cerrada que drena la zona sureste de la Sierra de Juárez (Figura V.1.1). El centro de la cuenca está ocupado por una llanura plana con una superficie de 2,3 km^2. Existen 50 m de diferencia en elevación topográfica entre el punto más bajo en el centro de la cuenca y el punto más alto en la parte noroccidental de la cuenca más cercana a la Sierra de Juárez (Figura V.1.2), así como 15 m y 4 m de desnivel, respectivamente, a las terrazas occidental y oriental más cercana desde el centro de la cuenca o zona lagunar (Figura V.1.3). Los sedimentos acumulados en lo alto de la cuenca se definen por un tamaño de grano más grueso como arenas, mientras que van disminuyendo en tamaño de limos y arcillas hacia el centro de la cuenca.

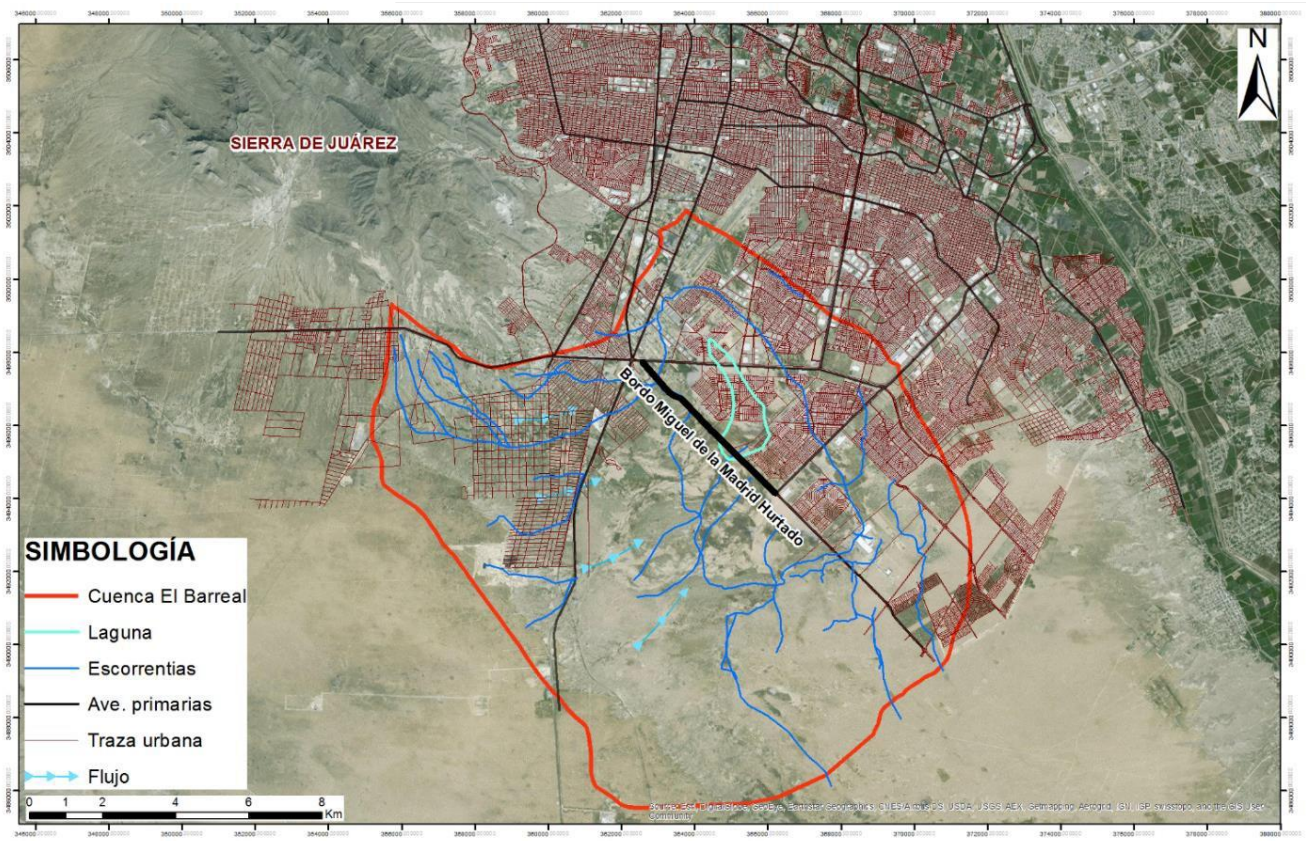


Figura V.1.1. Localización y escurrimientos de la Cuenca Barreal y la subcuenca MMH-TC-BI.

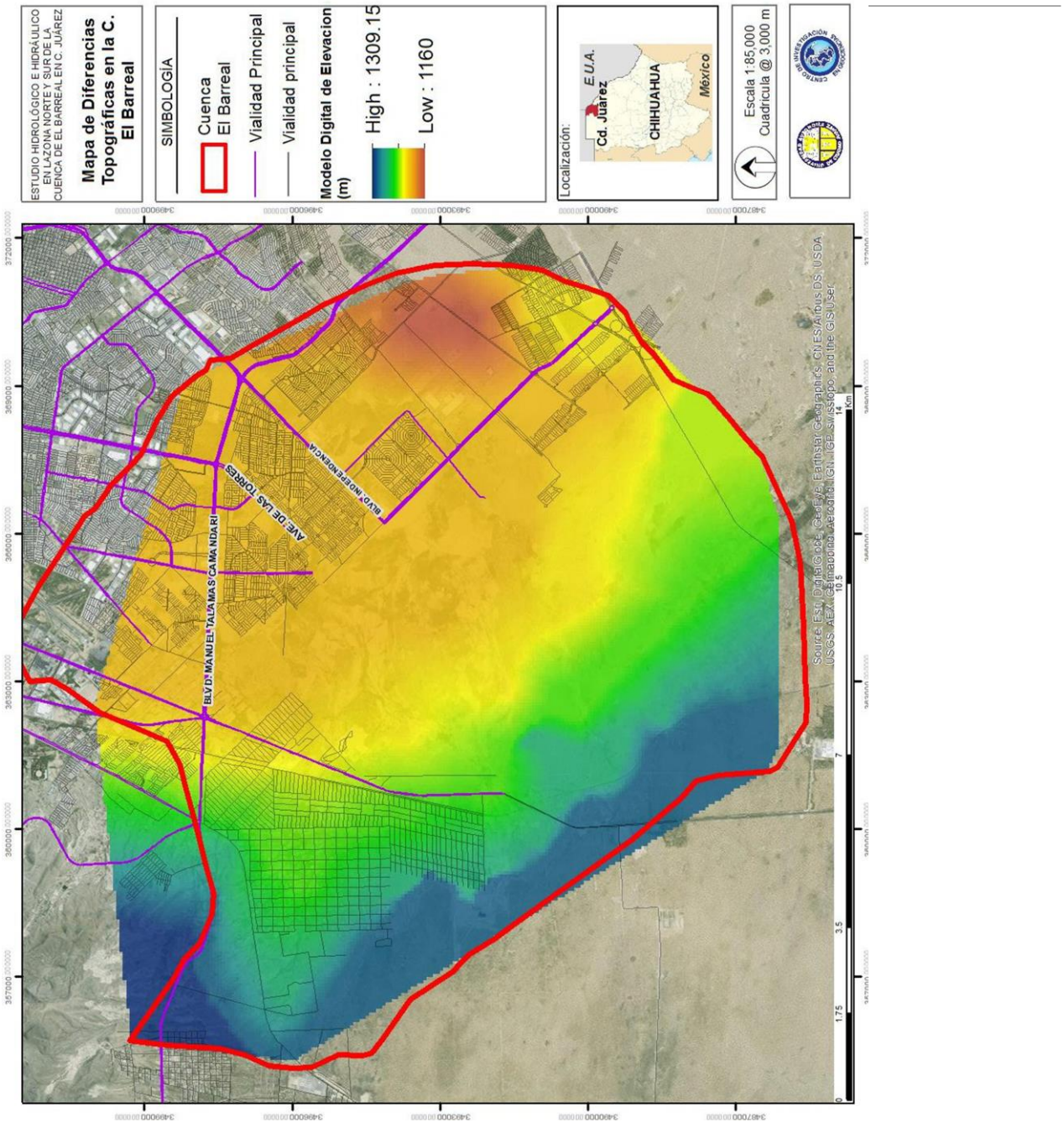


Figura V.1.2. Diferencia de elevación entre las vertientes y centro de la subcuenca Barreal.

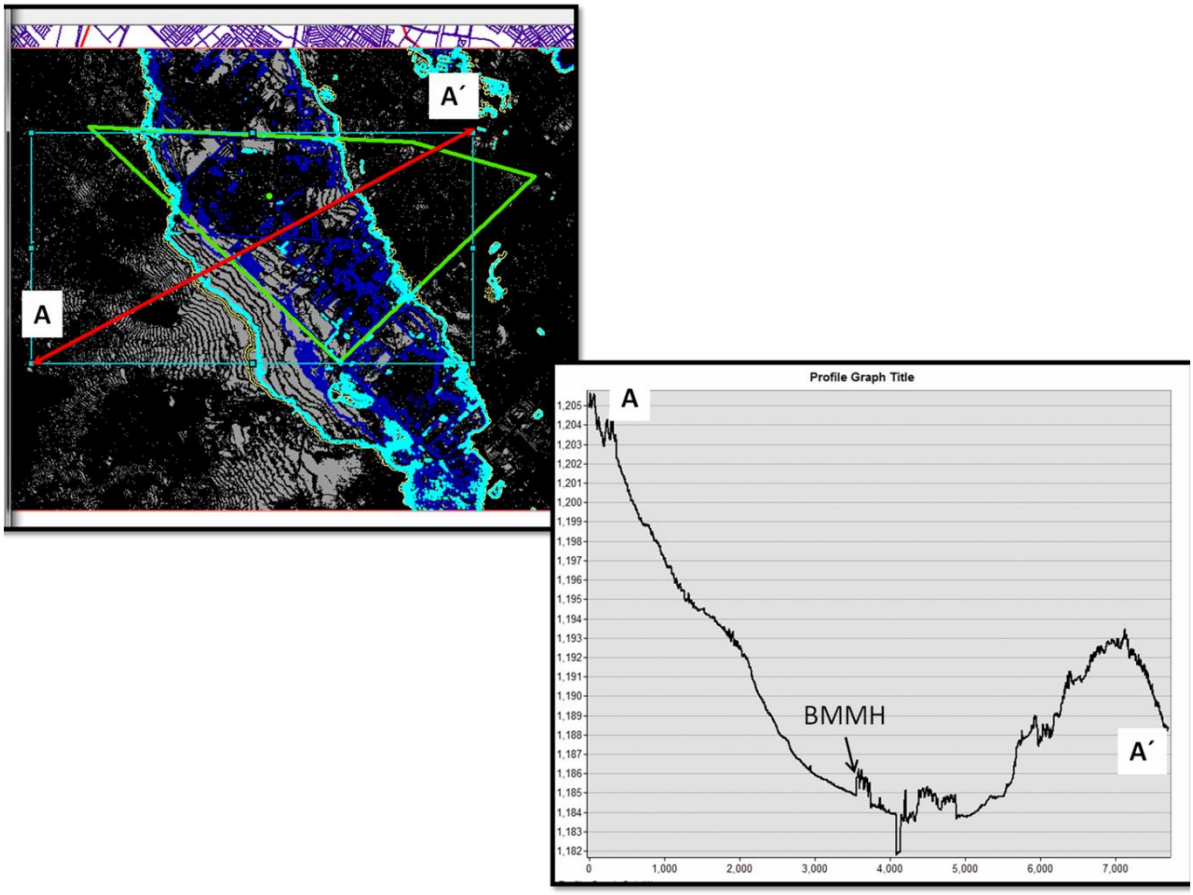


Figura V.1.3. Diferencia de elevación entre las terrazas y centro de la subcuenca Barreal. En verde se muestra el triangulo conformado por las vialidades Miguel de la Madrid, Boulevard Independencia y Talamas Camandari como referencia.

VI. CARACTERISTICAS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO

VI.1.1.- Clima

El área de estudio se localiza en una franja mundial de clima árido-cálido, lo que genera un clima muy seco, desértico con verano cálido y con temperaturas extremas. La temperatura media anual oscila entre los 12 y 18 grados centígrados. Los meses más fríos se presentan entre noviembre y marzo con temperaturas de menos 3 °C a 18°C, en promedio, y llega a registrar hasta menos 10 °C., siendo enero el mes más frío. En promedio se tienen 47.8 días de bajas temperaturas al año, período durante el cual, se presentan heladas. Los meses con mayor elevación en la temperatura, son los meses de junio, julio y agosto, en los que se registran temperaturas que varían de los 18°C, hasta los 44°C., con una insolación del 80% durante este periodo.

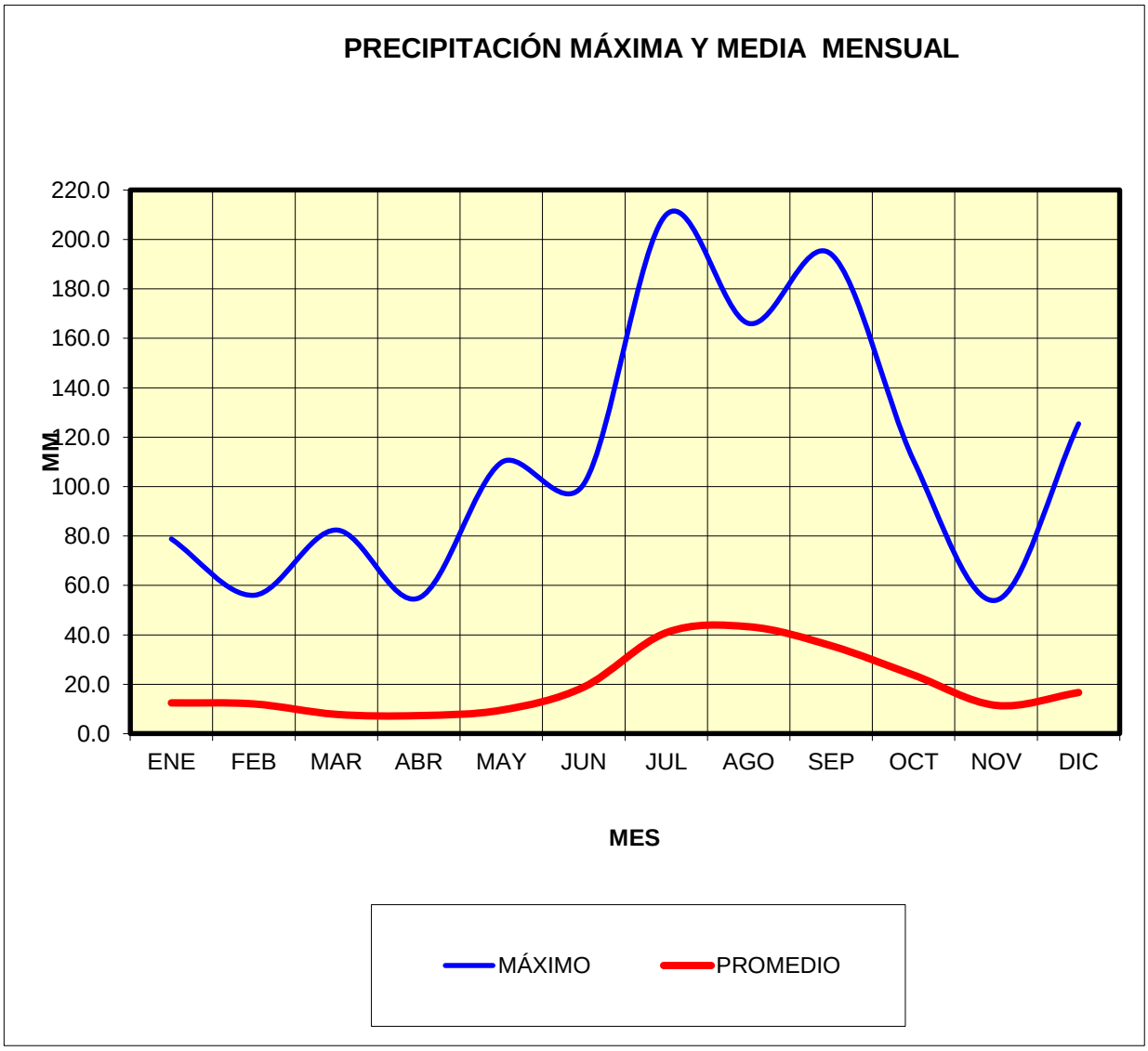
El clima de la zona de acuerdo a la clasificación de Köeppen modificada por García (1981) es BWkx'(e), seco desértico templado con las siguientes temperaturas: media anual de 17.2ºC, mínima promedio de 8.5ºC y máxima promedio de 25.6ºC; con verano cálido y lluvias escasas todo el año. El mes más caliente es julio y el mes más frío es enero. Los vientos predominantes son del Norte y del SW, durante todo el año.

VI.1.2.- Precipitación pluvial

Por lo que respecta a las precipitaciones pluviales, estas son escasas, con un registro promedio anual de 238 mm., las cuales se presentan principalmente en el verano, siendo estas las más importantes. A continuación en la Tabla 1, se presenta la precipitación máxima, media y mínima mensual obtenida del periodo de 1931 al 2006 correspondiendo a un total de 75 años de registro.

Tabla 1. Precipitación media mensual Cd. Juárez, Chih.

PRECIPITACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MÁXIMO	78.8	56.0	82.4	54.9	109.7	101.0	210.0	166.0	194.0	110.5	54.0	125.4	463.5
PROMEDIO	12.5	12.1	7.8	7.3	9.5	18.9	40.8	43.2	35.6	23.7	11.5	16.6	238.5
MINIMO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	94.0


PRECIPITACIÓN MÁXIMA Y MEDIA MENSUAL
220.0
200.0
180.0
160.0
140.0
120.0
100.0
80.0
60.0
40.0
20.0
0.0
MM
ENE
FEB
MAR
ABR
MAY
JUN
JUL
AGO
SEP
OCT
NOV
DIC
MES
MÁXIMO
PROMEDIO

VI.1.3.- Topografía

La zona tiene un relieve muy particular, característico de una cuenca lacustre, con pendientes topográficas muy suaves, es decir de muy baja pendiente, lo que provoca escurrimientos laminares hacia la depresión conocida también como El Barreal, siendo así que la zona presenta pendientes muy ligeras, con valores promedio de 5 al millar, y en general se puede decir que es una zona extremadamente plana, con pocos cambios topográficos, a excepción de algunos sectores en que se ubican pequeños acumulamientos de arenas y limos que son atrapadas por la escasa vegetación en el área (Figura VI.1.3.1).

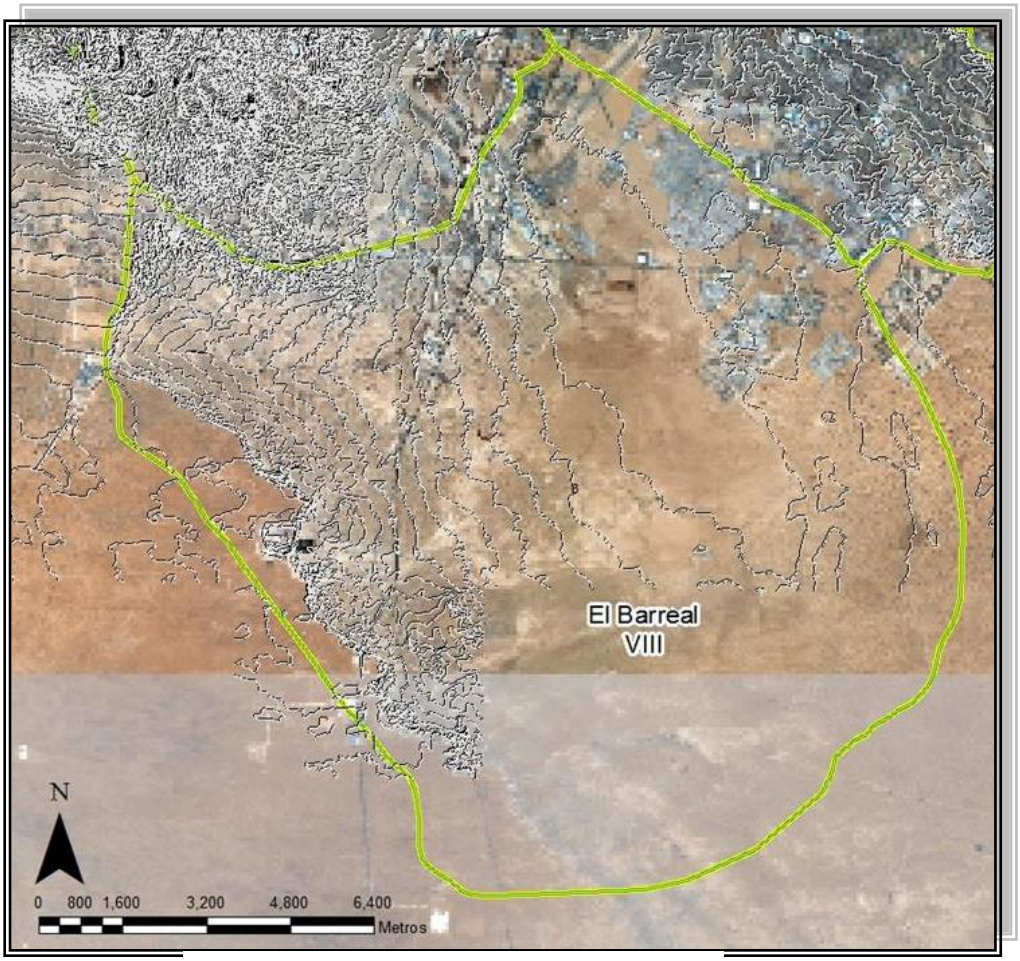


Figura VI.1.3.1 Topografía área de El Barreal.

VI.1.4.- Fisiografía

De acuerdo a la clasificación de Provincias Fisiográficas realizada por E. Raisz, (1964), la zona se localiza en la porción centro occidental de la Provincia Cuencas y Sierras, la cual está limitada al oriente por la Sierra Madre Oriental, al sur por las Sierras Transversales y al occidente por la Sierra Madre Occidental. La Provincia Fisiográfica de Cuencas y Sierras, esta caracterizada por ser una amplia zona desértica en la que sobresalen grandes bloques montañosos, principalmente de rocas sedimentarias marinas de edad cretácica separados por amplios valles, las que durante el Terciario y Cuaternario han sido rellenadas por depósitos aluviales, fluviales y lacustres, a lo que se le ha denominado bolsones, típicos de esta provincia, y caracterizados por su escasa pendiente, y por presentar, en la mayoría de los casos, una laguna en su porción central, a la cual Ordóñez llamó barrial, que en la mayoría de los casos son temporales.

Esta zona también constituye una parte del Bolsón del Hueco, acuifero que se ubica entre los dos paises (Mexico-Estados Unidos), corresponde a un graben asimétrico, rodeado por sierras, principalmente bloques fallados inclinados. El fallamiento produjo escarpes fuertes en los flancos orientales de las sierras y moderados en los flancos del poniente. En la porción sur del bolsón la forma asimétrica de la cuenca y el espesor de los rellenos se mantiene casi constante, incluyendo la porción mexicana.

Localmente los rasgos morfológicos más importantes en la zona de estudio son: el Valle del Río Bravo/Río Grande denominado localmente Valle de Juárez/El Paso, las sierras aisladas, angostas y alargadas que presentan una orientación preferencial noroeste-sureste, como la Sierra de Juárez, Presidio, Guadalupe, La Esperanza y San Ignacio; en México; y Montañas Franklin y Hueco en los Estados Unidos, sierras que generalmente presentan un flanco escarpado y el otro con pendiente fuerte, seguido de una zona de transición constituida por lomeríos suaves que desaparecen hacia el centro del bolsón y en las cercanías del río, donde se forma la planicie aluvial del Río Bravo/Río Grande. En el caso de la zona de estudio se tiene una amplia meseta ondulada (terraza) en la parte alta,

que separa la planicie del Valle de Juárez de la Sierra de Presidio, mientras que hacia el sureste la meseta se convierte en una serie de lomeríos, aumentando notoriamente su pendiente y los escurrimientos se inician desde las sierras de Presidio y de Guadalupe.

La zona de estudio presenta características homogéneas en prácticamente toda su extensión, caracterizándose principalmente por planicies onduladas y lacustres aún cuando también se observan formaciones irregulares de quebradas con lomeríos, tal como se describen en el siguiente Tabla 2.

Tabla 2. Características del Relieve

Unidades Geomorfológicas	Descripción
Planicie Ondulada	Relieve formado por un conjunto de dunas fijas, Constituidas por arenas finas bien clasificadas, producto de intensa actividad eólica, que actuó sobre las rocas existentes, dándole una forma ondulada.
Planicie lacustre	Es la parte topográfica mas baja de la zona y de pendiente muy suave, constituida por depósitos lacustres, de arenas, limos y arcillas: a esta geoforma pertenece a la zona de inundación de la laguna de El Barreal
Quebradas con lomeríos	Esta zona presenta relieves accidentados por la presencia de lomeríos con diferentes grados de pendiente. Estos relieves son moldeados por la erosión de viento y lluvia, se puede encontrar una combinación de arcilla-arena.

VI.1.5.- Geología

La geología de la zona está representada por sedimentos aluviales, eólicos y lacustres, consistentes en estratos intercalados de arena y arcillas, en estos sedimentos, el tamaño de las partículas dominantes es el de las arcillas y arenas cementadas en los primeros metros, a mayor profundidad predominan los estratos arenosos.

En la porción mexicana del bolsón, las rocas que afloran son del Mesozoico y Cenozoico. Las primeras están representadas por una secuencia marina depositada en un marco sedimentológico transgresivo en la paleocuenca de Chihuahua y en el borde de la

paleopenínsula de Aldama. Esta secuencia es de carácter arcillo-arenoso hacia la base, calcáreo-arcilloso en su parte media y termina en calcáreo de facies postarrecifal.

El Cenozoico en la región evolucionó como un área continental: la cual es representada en el Terciario por rocas intrusivas de composición ácida e intermedia, y por depósitos conglomeráticos durante el Terciario, y por depósitos de sedimentos clásticos gruesos a finos de origen aluvial, lacustre, fluvial y eólico durante el Cuaternario. En la Figura se presenta el plano geológico De acuerdo a un pozo perforado en la porción estadounidense, estos depósitos presentan un espesor máximo de 2743 m (Meyer, 1976), acuñándose hacia las estribaciones de las sierras que los limitan al este y oeste. En la porción mexicana del bolsón de acuerdo a un estudio de geofísica (Burgos, 1996), el espesor de los sedimentos es del orden de los 2000 m.

Estratigráficamente estos sedimentos de bolsón en donde presentan el máximo espesor, sobreyacen discordantemente a un granito de edad precámbrica, y más al este, a una formación calcárea del Paleozoico; y subyacen a los depósitos de edad cuaternaria consistentes en arenas eólicas y en sedimentos fluviales recientes

En los pozos de agua potable de Cd. Juárez, los sedimentos de depósitos de bolsón perforados, consisten principalmente en estratos de arena, arcilla y ocasionalmente de grava. En forma general los depósitos de bolsón presentan una granulometría gruesa en las estribaciones de la sierra, y fina en el centro del valle, en ambos lados de la frontera internacional. Los sedimentos de bolsón presentan cuatro facies sedimentarias: depósitos de abanico aluvial, lacustres, fluviales y eólicos.

Depósitos de Abanico Aluvial

Estos depósitos son conglomerados poco consolidados, constituidos por estratos gruesos de gravas, arenas y arcillas, o mezclas de dos o de los tres constituyentes. Los estratos de estos depósitos son de espesor y extensión muy irregular, desapareciendo o cambiando

lateral y verticalmente su granulometría en forma gradual, predominando generalmente, los estratos con alto contenido de grava y arcilla; y existiendo en menor proporción estratos de arena y/o arcilla.

Estos conglomerados están asociados a depósitos de abanicos aluviales de edad Terciaria y probablemente en algunos casos, la edad de estos abanicos se extienda hasta finales del Terciario y principios del Cuaternario (Plio-Cuaternario).

Depósitos Lacustres

Hacia el este y sureste de la porción estadounidense del bolsón, los depósitos lacustres están constituidos de gruesos depósitos de limos y arcillas depositados en ambiente de baja energía (Heywood, 2001), mientras que en la zona urbana de Juárez, consiste de arenas finas, limos y arcillas, al menos los primeros 300 m de profundidad; mientras hacia el Valle de Juárez (sureste) encontramos arcillas y limos con pocos estratos de arena, al menos hasta los 500 m de profundidad.

Sedimentos Fluviales

Estos sedimentos son aquellos que han sido depositados principalmente por el Río Bravo/Río Grande y por algunas corrientes menores, variando en edad del Terciario al Reciente. Los sedimentos fluviales de edad terciaria, corresponden a los sedimentos depositados en el paleocanal del Río Bravo/Río Grande localizado al oriente de las Montañas Franklin con una orientación de norte a sur y consisten principalmente en estratos de arenas finas y gravas con intercalaciones de limos y arcillas. Los sedimentos fluviales recientes se encuentran distribuidos en los cauces de los arroyos principales de la zona y en las márgenes del Río Bravo/Río Grande. En los cauces de los arroyos, los depósitos son de gravas y arenas mal clasificadas y de poco espesor; mientras que los sedimentos depositados por el Río Bravo consisten de arenas finas y gruesas con poca arcilla en la

zona urbana de Juárez, mientras que aguas abajo pasan a un predominio de arenas, gravas y arcillas. Estos sedimentos tienen espesores que varían de 30 a 90 m.

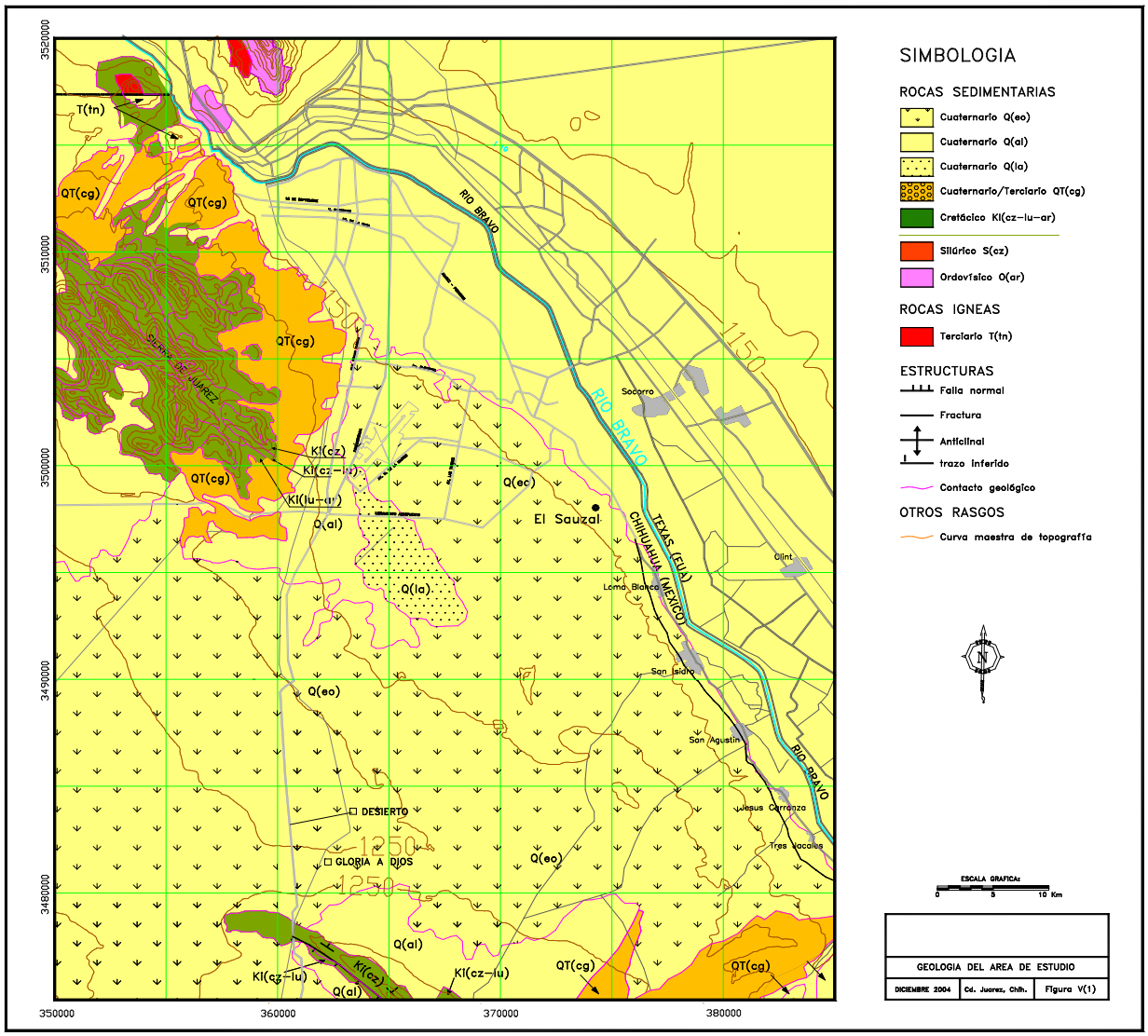


Figura 3. Geología área de estudio

Sedimentos Eólicos

Los depósitos de sedimentos eólicos están constituidos de arenas finas y limos, conformando un sistema de dunas fijas y móviles, generalmente de poco espesor.

Estratigráficamente los sedimentos aluviales y eólicos sobreyacen, a los depósitos de abanico aluvial y a los sedimentos lacustres del Terciario.

VI.1.6.- Suelos y Vegetación

El suelo del área de estudio, presenta una constitución uniforme, principalmente arenas arcillosas y limos, o que le da su característica de suelo impermeable, primordialmente en la zona deprimida de El Barreal. Al Sur-oriente del aeropuerto, se encuentra una unidad de suelo *Vertisol*, caracterizado por grietas anchas y profundas y de consistencia chiclosa en presencia de agua.

La vegetación identificada presenta características desérticas, de matorral espinoso. La flora que conforma al matorral espinoso presenta una fisonomía compuesta de ramificaciones (muy quebradas y alargadas) recubiertas con espinas de tipo xerófilo arbustivo como la Gobernadora (*Larrea tridentata*), el Hojasén (*Flourensia cernua)*, el Mezquite (*Prosopis Spp*), la lechuguilla (*Agave lechuguilla*) y cactáceas. En las zonas sujetas a inundación se observa escasa vegetación, compuesta principalmente por comunidades halófitas con pastos, por ejemplo, *Hilaria berlandieri,* chamizo, *Atriplex Spp. y* por gramíneas con alta tolerancia a la salinidad y típicas de suelos arcillosos. En las áreas ocupadas o con perturbación urbana, se tiene la presencia de vegetación inducida, constituida principalmente por rosales, álamos, olmos lilas y moros. Por el escaso porcentaje ocupado con relación al área de estudio, porcentualmente esta vegetación no es representativa.

VII.ESTRATEGIAS PARA EL CONTROL Y MANEJO DE AGUA PLUVIAL

VII.1.-CRITERIOS GENERALES

Los criterios para el control y manejo de los escurrimientos pluviales para ciudad Juárez, donde se incluyó la Zona VIII.- "El Barreal" fueron definidos por el Plan Sectorial de Manejo de Agua Pluvial (PSMAP), el cual establece los lineamientos generales normativos en la materia y cada uno de los planes parciales define los criterios específicos aplicables a sus propias superficies, constituyendo estos instrumentos de planeación, el marco de actuación aplicable para la autoridad en materia de desarrollo urbano y de observancia obligada para los promotores del desarrollo urbano.

Las condiciones actuales del desarrollo urbano en la zona, han sido ampliamente analizadas y discutidas en los Planes Parciales mencionados, sin embargo, los eventos climatológicos que se presentaron en los últimos años han mostrado que aun cuando la mayoría de los proyectos de las obras propuestas dentro de los fraccionamientos para la captación, conducción y disposición de agua pluvial, tienen las características y capacidad adecuadas, no se realizó el mantenimiento requerido y no se construyeron las obras de retención de agua necesarias para el control total de los escurrimientos pluviales, originando inundaciones en áreas habitacionales ubicadas en las partes más bajas de la cuenca de El Barreal.

Por lo anterior, es necesario establecer nuevos lineamientos técnicos que permitan el control total de los escurrimientos pluviales en la zona y en cualquier otra zona de crecimiento, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- Hidrológicamente el área está constituida por cuencas cerradas cuyos parteaguas están definidos por la topografía natural o por vialidades.
- Evitar los riesgos por inundación mediante el control total de los escurrimientos de agua provenientes de la lluvia

- El área de estudio será totalmente urbanizada modificando el tipo de superficie que incrementa significativamente los volúmenes excedentes de la precipitación pluvial.

- Almacenar y aprovechar el agua pluvial captada para riego de áreas verdes, recarga al acuífero o en cualquier otro uso que acepte la calidad del agua pluvial

El planteamiento técnico de solución para el manejo del agua pluvial en el área de estudio puede ser factible, solo si se observan y se siguen las estrategias de manejo y la construcción de la infraestructura pluvial requerida, fundamentando dicho razonamiento, en el análisis de los procesos urbanos desarrollados hasta la fecha y las condiciones actuales que presenta la zona. La propuesta de solución se fundamenta en estudios hidrológicos realizados en donde se incluye el análisis estadístico de la precipitación para varios periodos de retorno, condiciones actuales de uso del suelo, características topográficas de la zona, planeación del crecimiento urbano a largo plazo, características estratigráficas del subsuelo, tenencia de la tierra y cálculo de volúmenes de agua escurrida para superficies con diferentes niveles de urbanización.

Las propuestas de solución que se presenta para la zona de El Barreal permite definir las acciones y criterios técnicos del control y manejo del agua pluvial, los cuales serán observados por quien(es) lleve(n) a cabo cualquier acción urbana previa autorización de la administración municipal quien finalmente será quien supervise y reciba las obras proyectadas. Se deberá promover el desarrollo urbano de acuerdo con los instrumentos de planeación vigentes, tales como el Plan Director, Planes Sectoriales y Planes Parciales, por lo que la normatividad enunciada en cada uno de estos instrumentos, deberá ser observada obligatoriamente.

La característica fundamental de la zona de estudio es su constitución hidrológica como una serie de cuencas cerradas. Estas cuencas están en proceso de urbanización lo cual modifica el tipo de superficie de natural a la mezcla de suelos pavimentados, construcciones, áreas verdes, etc. que en suma incrementan el volumen de agua excedente de la lluvia convirtiéndose en escurrimientos pluviales que se concentran en las áreas de menor elevación topográfica. Debido a lo anterior, el proceso de urbanización debe

contemplar como acción primaria, el control de los escurrimientos y el manejo de los volúmenes de agua pluvial y dada sus características de cuencas cerradas, es necesario planear la forma, dirección y capacidad de las estructuras de conducción así como dimensionar las áreas que recibirán estos flujos, la capacidad de almacenamiento necesaria, las obras para el manejo de materia flotante, azolves, sólidos suspendidos y cualquier otro elemento que ingrese a los sitios de concentración de agua como podrían ser residuos contaminantes o de alto riesgo.

En este proceso de planeación, es necesario también incluir programas formales de una continua operación, mantenimiento y administración de las estructuras, siendo necesario para ello destinar recursos suficientes y por tiempo indefinido para estas actividades.

Las estrategias de solución global conforme a los resultados del presente estudio se subdividen en dos grandes grupos:

A. ***Estrategia a corto plazo:*** Conjunto de acciones tendientes a garantizar la resiliencia de la zona actualmente urbanizada del Barreal en la antigua zona lagunar.

B. ***Estrategia a mediano plazo:*** Conjunto de acciones enfocadas a incrementar la resiliencia hidrológica de la cuenca el Barreal en la zona de restitución lagunar, la cual actualmente no esta urbanizada.

VII.2. ANALISIS DE LOS HALLAZGOS HIDROLOGICOS E HIDRAULICOS

HIDROLOGIA

La zona actualmente urbanizada requiere de una obra hidráulica de mitigación que contenga los escurrimientos que descienden de la cuenca, de forma que los desarrollos urbanos ya existentes regulen solamente los flujos generados por cuenca propia tal y como lo marca el PSMAP. Para ello, desde el 2016 se realizó un estudio de la operación hidráulica del BMMH en las condiciones imperantes en ese entonces. El modelo se realizó conforme a la tormenta de lluvia aprobada por la CONAGUA en la cual se aplica un esquema de

ponderación de la lluvia ajustada por área de tormenta, de forma que se garantice que todo el volumen de la precipitación sea transformado de manera 100% efectiva a escurrimiento y perdidas por absorción.

El resultado de este análisis hidrológico (2016) se resume en las siguientes tablas:

TR100

ELEMENTO HIDROLOGICO	ÁREA (Km^2)	DESCARGA PICO (m^3/S)	VOLUMEN (X1000 m^3)
Total	96.0039	325.8	4505.1

TR500

ELEMENTO HIDROLOGICO	ÁREA (Km^2)	DESCARGA PICO (m^3/S)	VOLUMEN (X1000 m^3)
Total	96.0039	479	6376.4

Posteriormente, ya en este estudio (2017) se realizaron corridas hidrológicas con una tormenta de diseño aplicada bajo in esquema de distribución de frecuencia. La discretización de este modelo hidrológico consiste en 3 subcuencas principales localizadas aguas arriba del bordo Miguel de la Madrid Hurtado:

Cuenca Poniente: Esta subcuenca (Figura VII.2.1. en color blanco) capta los escurrimientos de la zona de granjas de Sta Elena, y en ella se localizan los diques Sta. Elena I, Sta. Elena II, Fluorex, Charly I, Charly II y Yonkes.

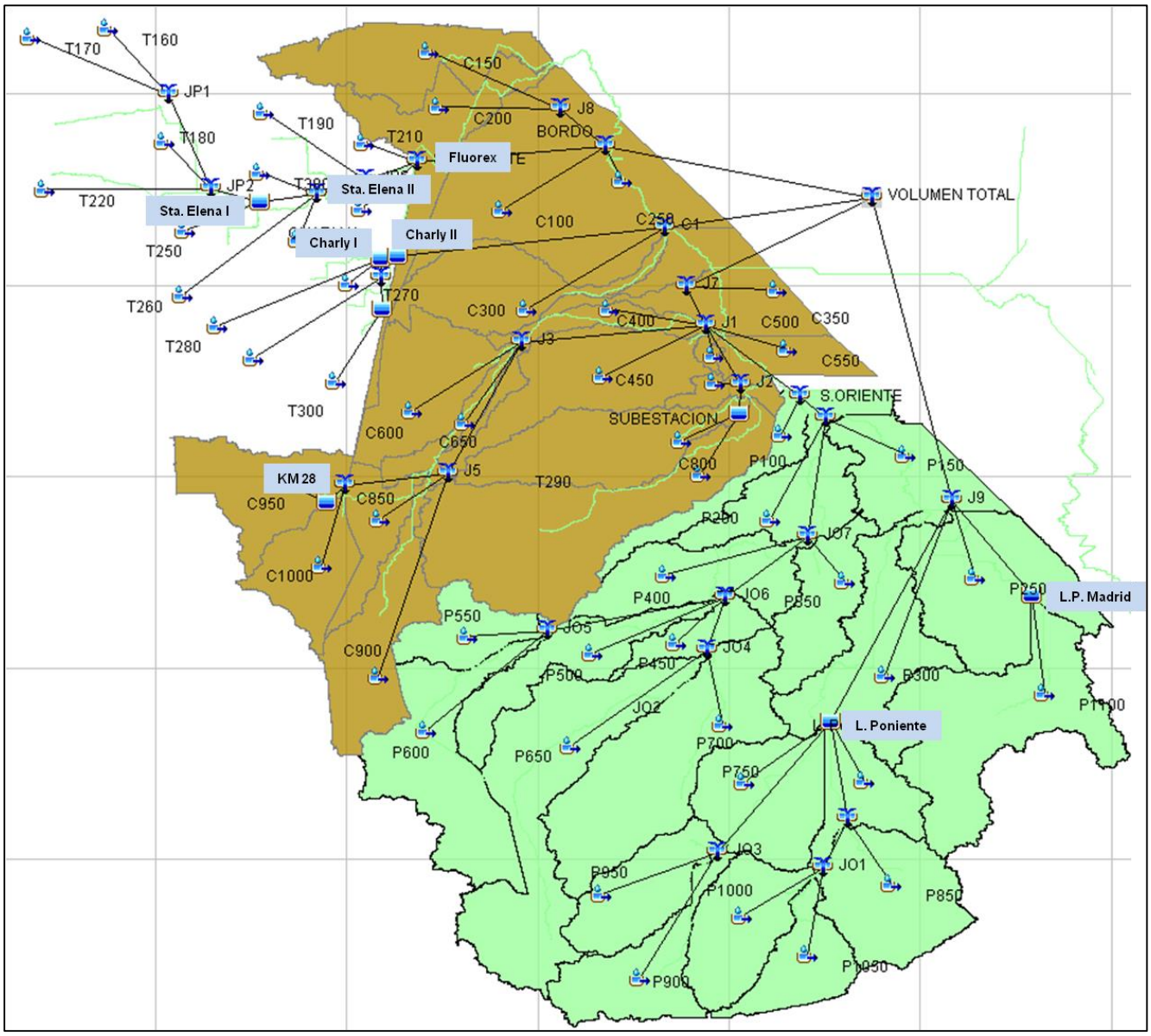


Figura VII.2.1. Localización de las obras hidráulicas de la zona poniente al Bordo MMH.

Cuenca Centro: Esta subcuenca (Figura VII.2.1. en color café) capta escurrimientos de la parte central de la cuenca el Barreal. En esta subcuenca se localiza el dique Km 28 y el dique Subestación o Herradura.

Cuenca Surponiente: Esta subcuenca capta un importante volumen de escurrimientos provenientes de la parte suroeste de la cuenca El Barreal. En esta subcuenca se localizan varias lagunas subsidiarias o secundarias que actúan como reservorios en caso de lluvia. Las mas importantes se modelaron hidrológicamente como vasos de captación: Laguna Poniente y Laguna P. Madrid.

La curvas de almacenamiento descarga de las diferentes estructuras hidráulicas de las subcuencas mencionadas (Figuras VII.2.2 a la VII.2.9) muestra que para eventos hidrometeorológicos asociados con una tormenta con un periodo de retorno de 500 años, solo las lagunas subsidiarias son capaces de contener los volúmenes transportados aguas abajo.

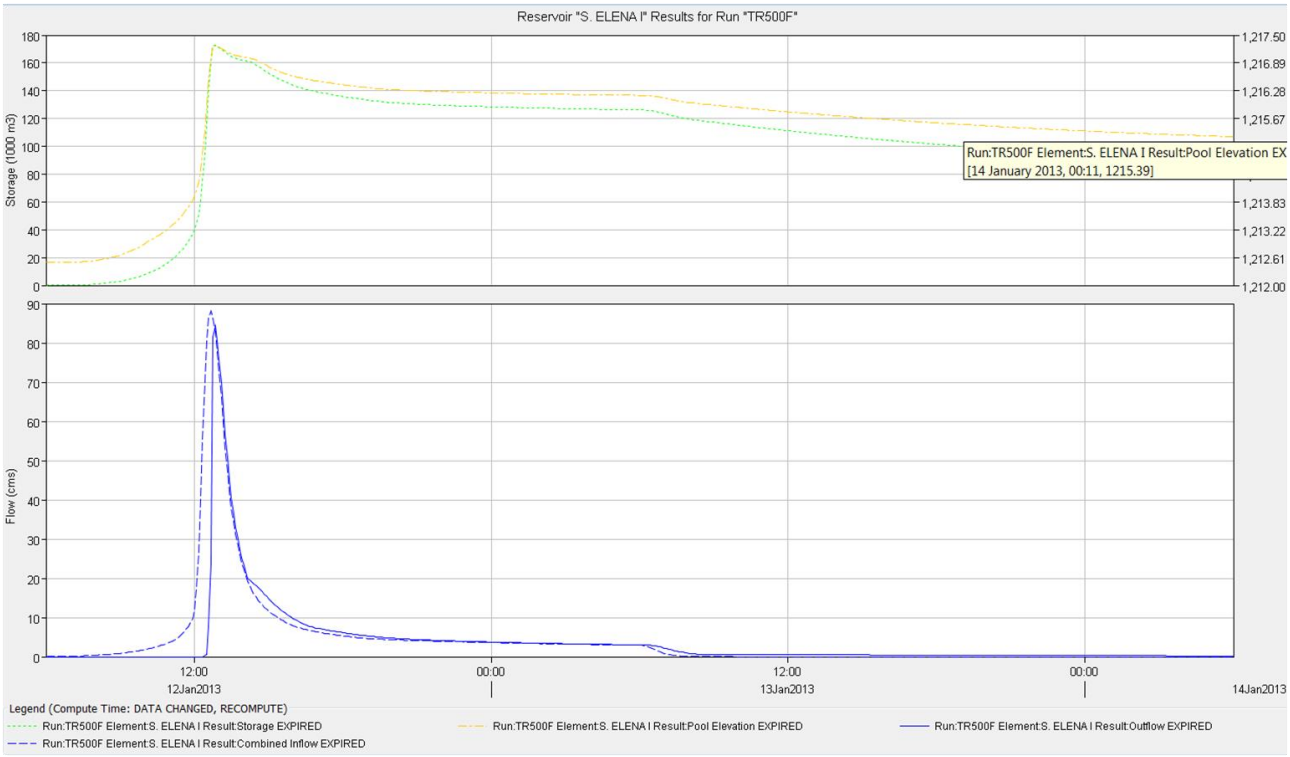


Figura VII.2.2. Volumen de agua almacenada en vasos de captación Santa Elena I.

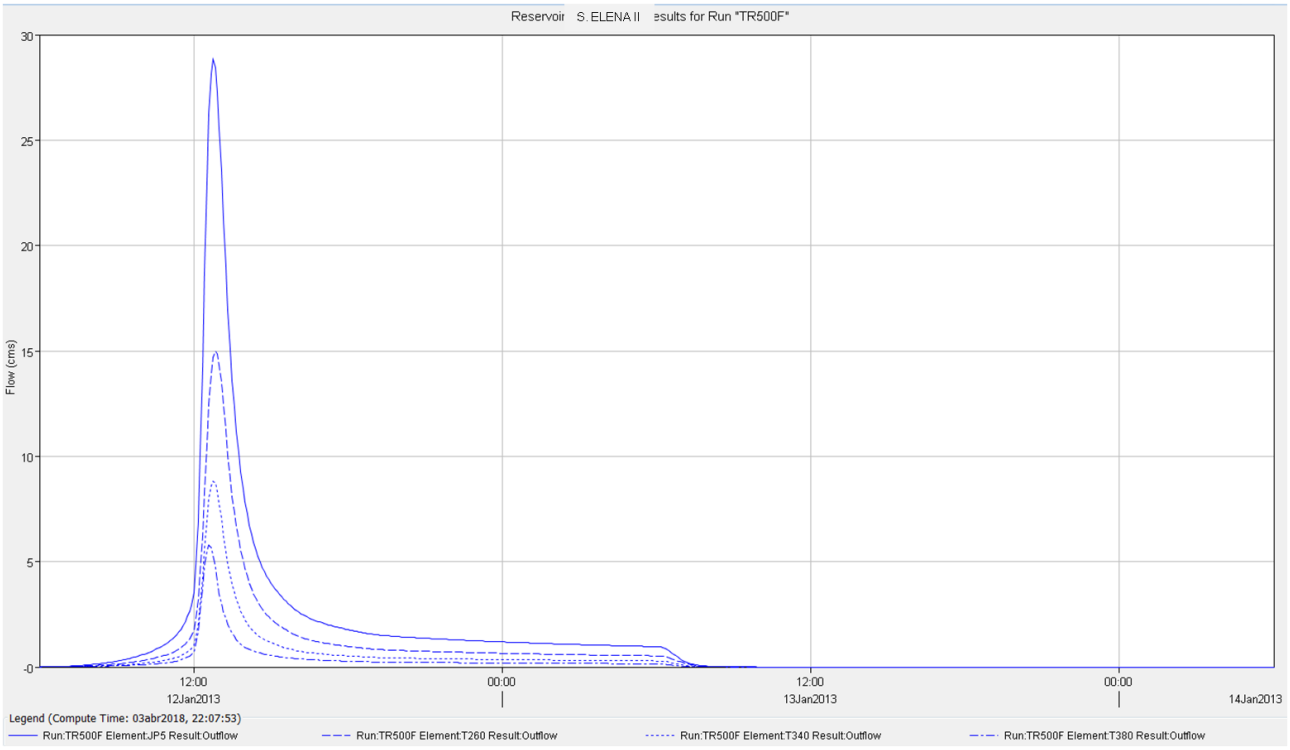


Figura VII.2.3. Volumen de agua almacenada en vasos de captación Santa Elena II.

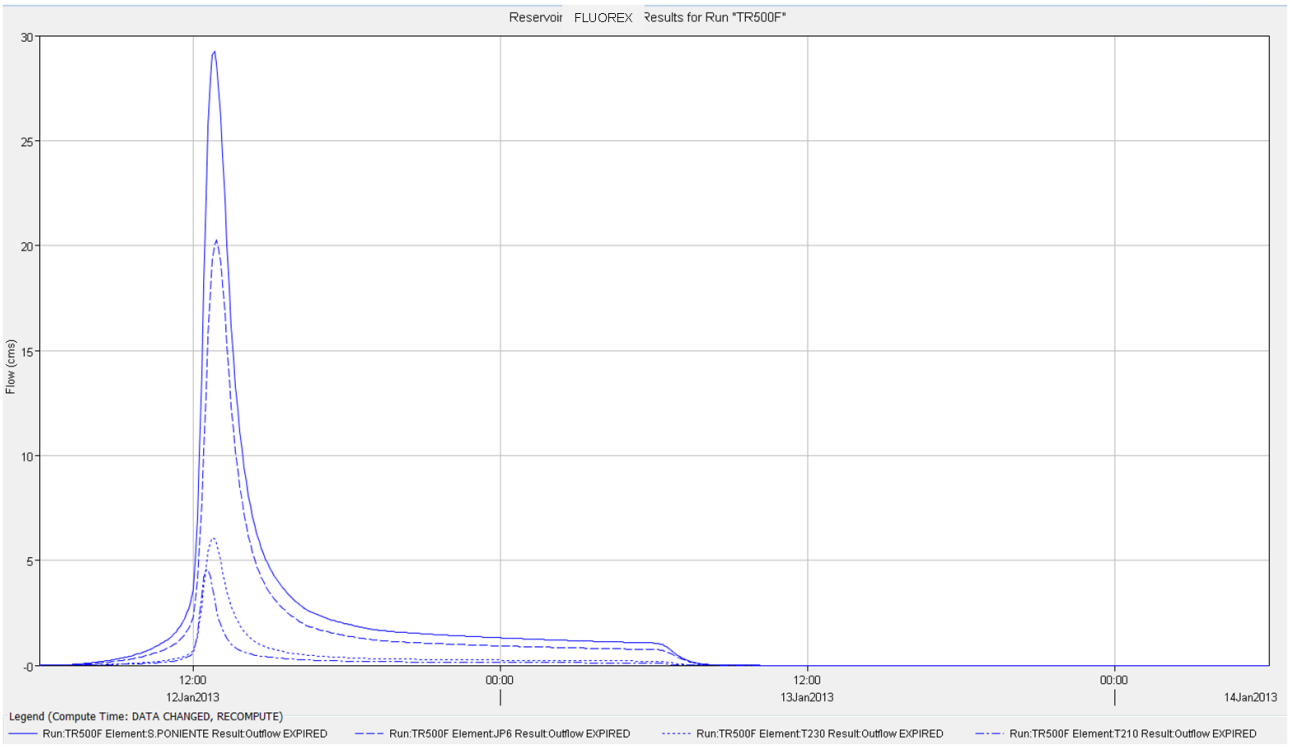


Figura VII.2.4. Volumen de agua almacenada en vasos de captación Fluorex.

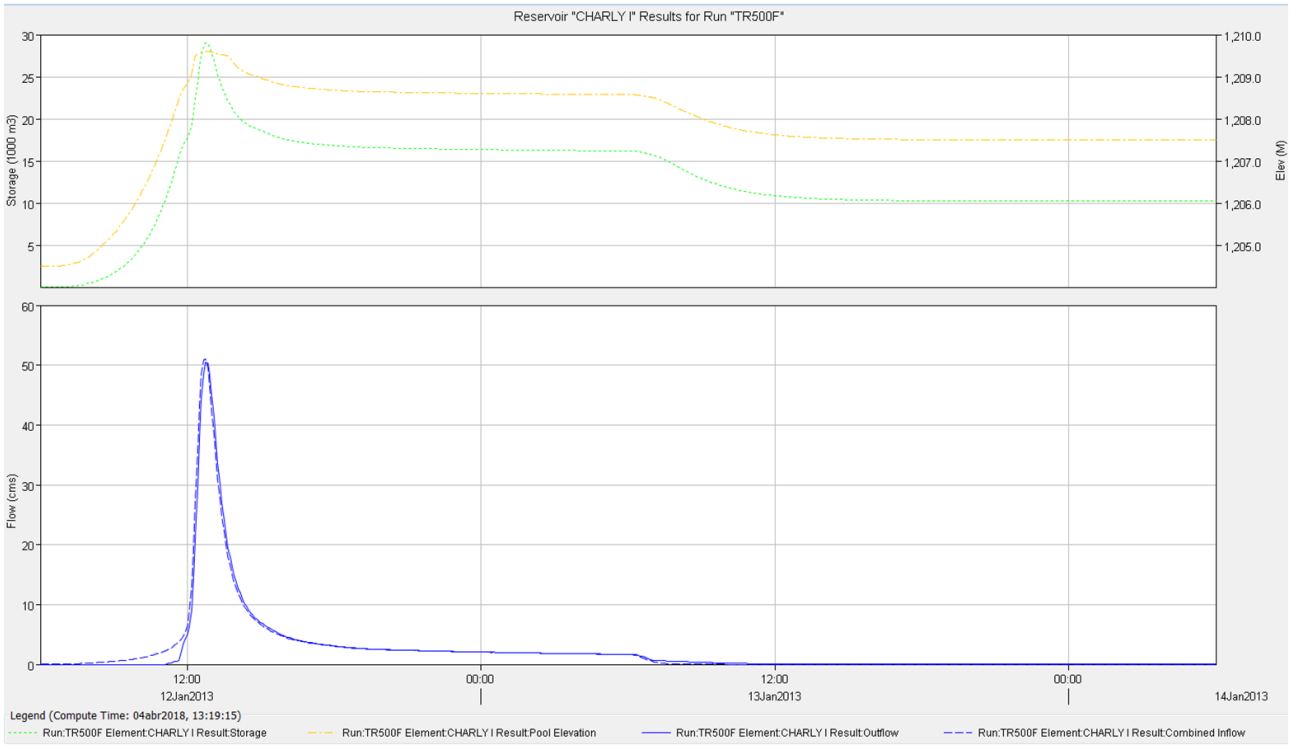


Figura VII.2.5. Volumen de agua almacenada en vasos de captación Charly I.

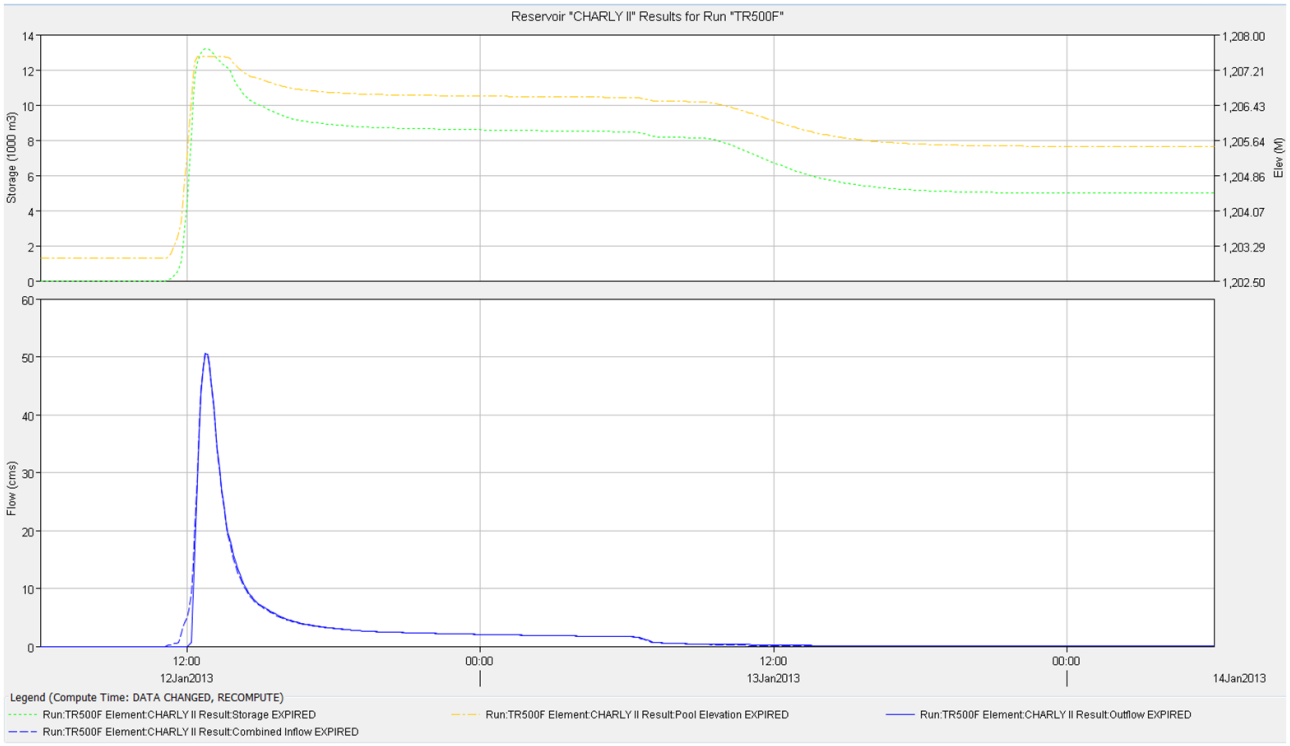


Figura VII.2.6. Volumen de agua almacenada en vasos de captación Charly II.

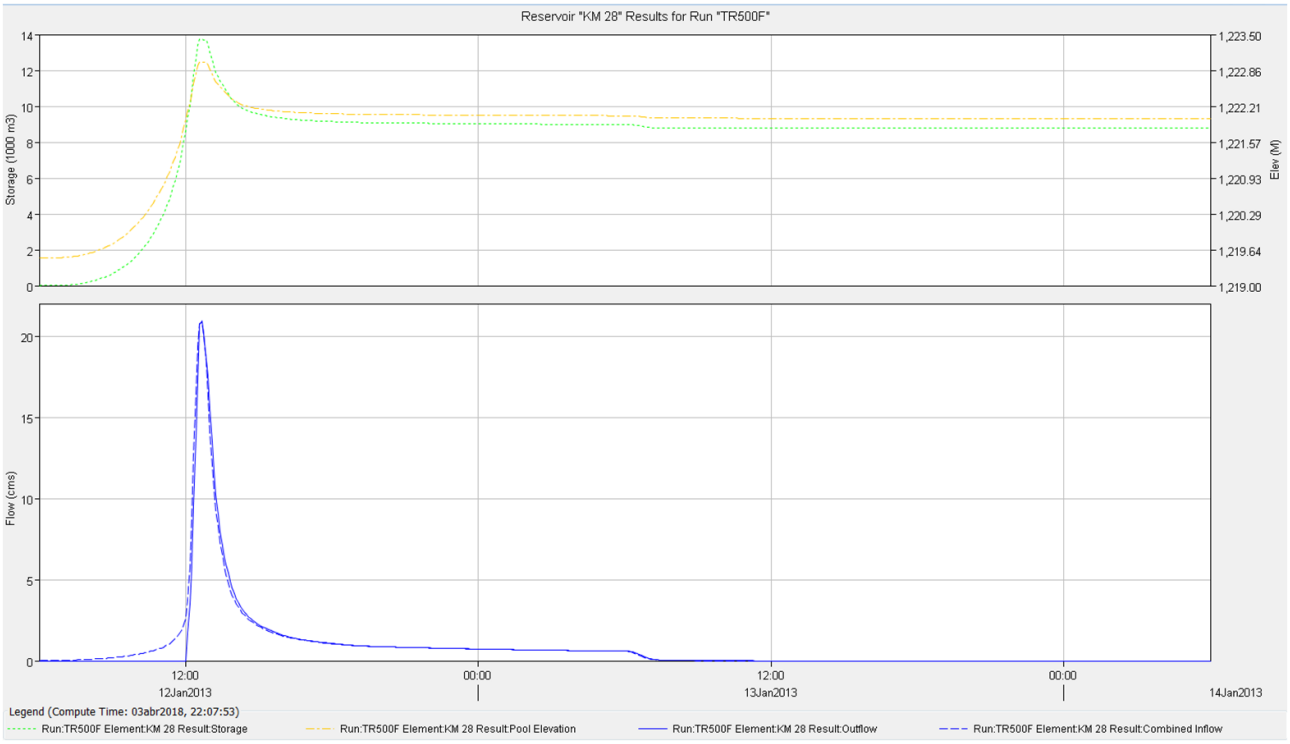


Figura VII.2.7. Volumen de agua almacenada en vasos de captación KM 28.

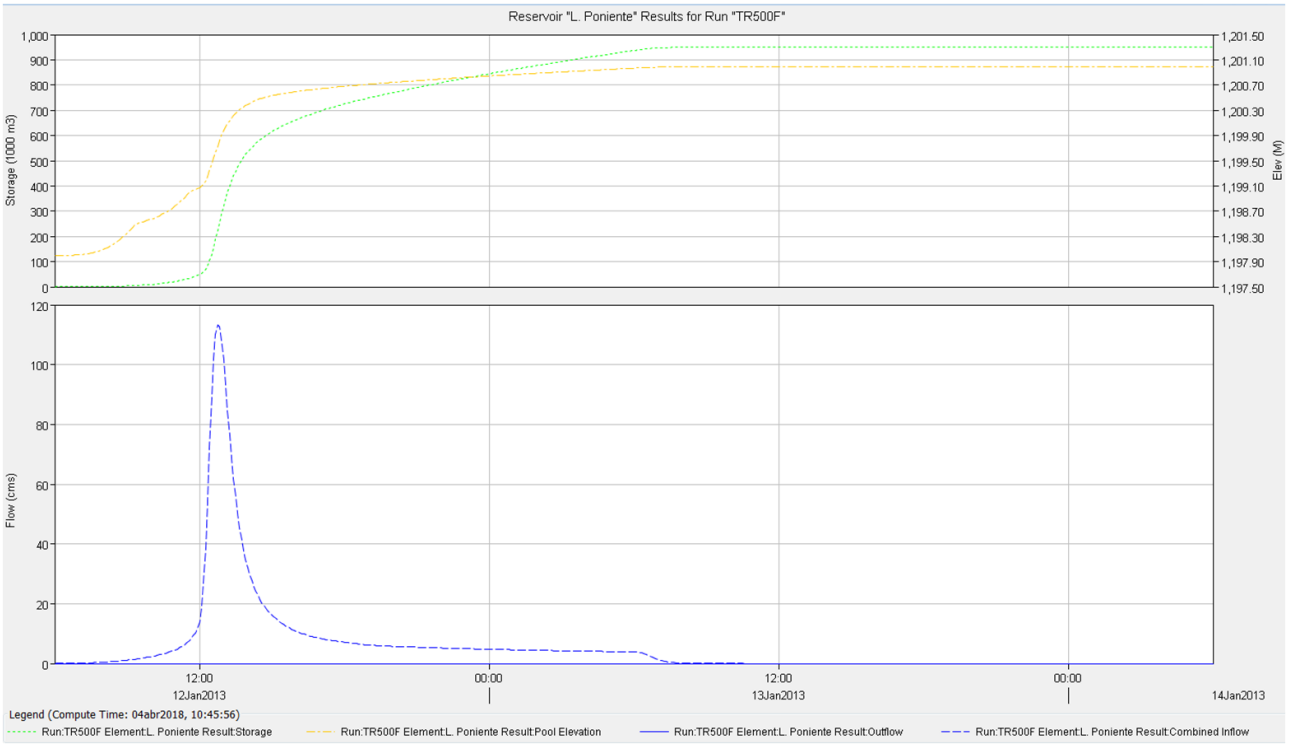


Figura VII.2.8. Volumen de agua almacenada en zona lagunar L. Poniente.

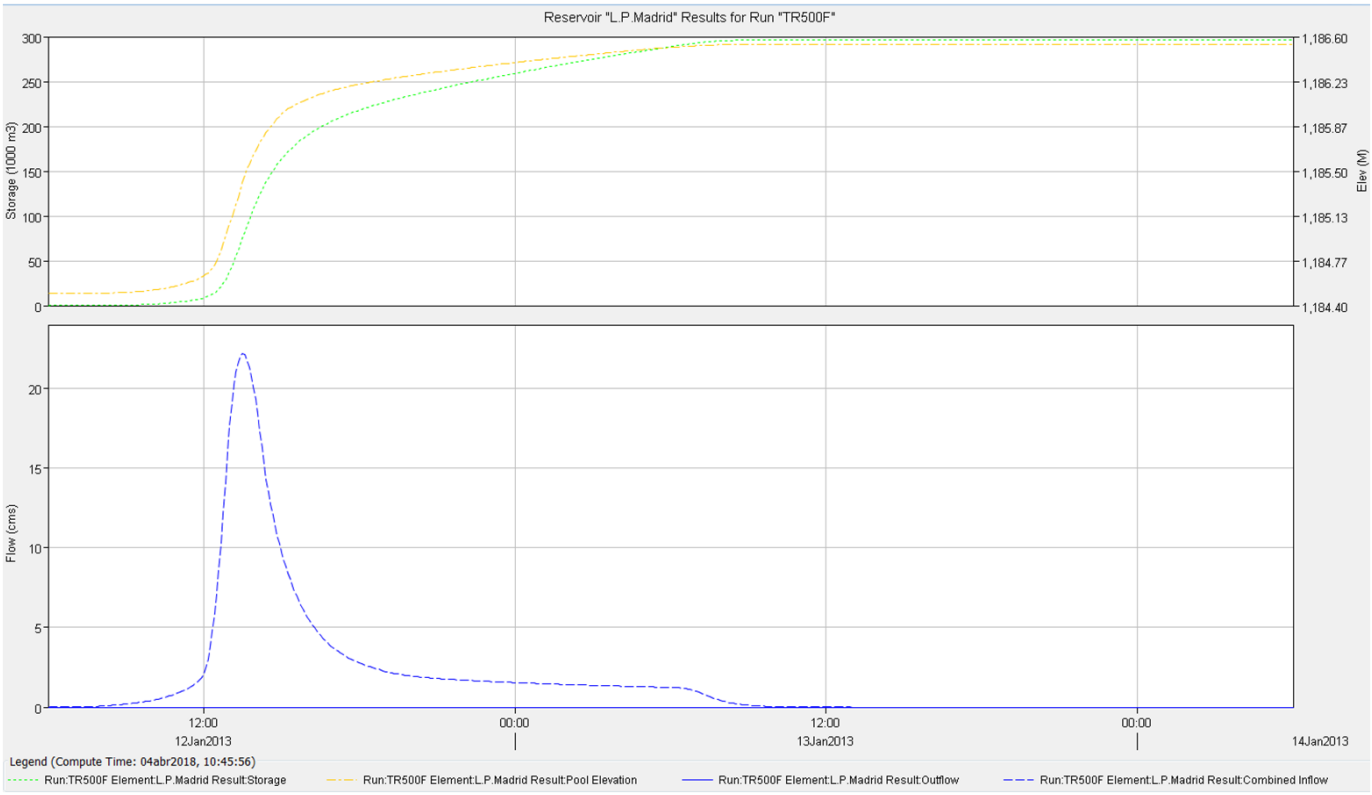


Figura VII.2.9. Volumen de agua almacenada en zona lagunar L. P. Madrid.

VII.2.1. OPERACIÓN HIDRAULICA DE DIQUES Y LAGUNAS SUBSIDIARIAS

La condición de almacenaje descarga para cada vaso o dique se resume en la siguiente tabla donde V.E. es Volumen Escurrido y V.D. es volumen de Descarga (Tabla 4).

Tabla 4. Volúmenes escurridos y de descarga.

	TR5		TR10		TR20		TR50		TR100		TR500	
ESTRUCTURA	**V.E**	**V.D**	**V.E**	**V.D**	**V.E**	**V.R**	**V.E**	**V.D**	**V.E**	**V.D**	**V.E**	**V.D**
STA ELENA I	183.4	94.7	249.8	161.0	319.9	230.9	420.9	331.7	505.5	416.3	721.1	631.8
STA ELENA II	155.2	155.2	243.5	243.5	336.5	336.5	470.6	470.6	583.1	583.1	869.7	869.7
FLUOREX	221.6	221.6	333.9	333.9	452.3	452.3	623.0	623.0	766.1	766.1	1130.8	1130.8
CHARLY 1	103.9	93.6	141.6	131.3	181.3	171.0	238.5	228.2	286.4	276.2	408.6	398.4
CHARLY 2	93.6	88.7	131.3	126.3	171.0	166.0	228.2	223.2	276.2	271.2	398.4	393.4
KM28	36.9	28.2	50.3	41.6	64.4	55.7	84.8	76.0	101.8	93.1	145.3	136.5
L. PONIENTE	241.5	0	329.0	0	421.2	0	554.2	0	665.6	0	949.6	0
L.P. MADRID	75.4	0	102.8	0	131.6	0	173.1	0	207.9	0	296.6	0

En tanto que la operación hidráulica, evaluada en términos de la capacidad de regulación, se muestra en la siguiente tabla, donde en rojo se agrupan los vasos o diques con poca o nula capacidad de regulación (rojo). Capacidad media de regulación (amarillo) y regulación satisfactoria (verde).

Tabla 5. Porcentaje regulado.

ESTRUCTURA	TR5 % regulado	TR10 % regulado	TR20 % regulado	TR50 % regulado	TR100 % regulado	TR500 % regulado
STA ELENA I	48.36	35.55	27.82	21.19	17.65	12.38
STA ELENA II	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FLUOREX	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CHARLY 1	9.91	7.27	5.68	4.32	3.56	2.50
CHARLY 2	5.24	3.81	2.92	2.19	1.81	1.26
KM28	23.58	17.30	13.51	10.38	8.55	6.06
L. PONIENTE	100	100	100	100	100	100
L.P. MADRID	100	100	100	100	100	100

En cuanto a los gastos pico y volúmenes escurridos en la zona de restitución lagunar, localizadas aguas arriba del bordo Miguel de la Madrid, se muestra el resumen de los periodos de retorno críticos para la operación de esta estructura de contención.

El detalle de la operación para tormentas con periodo de retorno de 100 y 500 años se resume en las siguientes tablas:

TR100

ELEMENTO HIDROLOGICO	ÁREA (Km^2)	DESCARGA PICO (m^3/S)	VOLUMEN (X1000 m^3)
Total	96.0039	351.2	4372.8

TR500

ELEMENTO HIDROLOGICO	ÁREA (Km^2)	DESCARGA PICO (m^3/S)	VOLUMEN (X1000 m^3)
Total	96.0039	534.1	6321.3

VII.2.2. CONCLUSIONES HIDROLOGIA

1. El volumen total al Bordo Miguel de la Madrid Hurtado (BMMH) es de 6,376.4 (x1000) m^3 (Millones de m^3) para un Periodo de Retorno (TR) de 500 años, operando los diques existentes en condiciones actuales utilizando la tormenta de diseño de la CONAGUA.

2. El volumen total al Bordo Miguel de la Madrid Hurtado (BMMH) es de 6,321.3 (x1000) m^3 (Millones de m^3) para un Periodo de Retorno (TR) de 500 años, operando los diques existentes en condiciones actuales utilizando la tormenta de diseño de la solicitada por CENAPRED.

3. Aunque los volúmenes son muy similares, si hay diferencia en los gastos de diseño. Es decir, los gastos calculados en base a la tormenta validad por CENAPRED son mayores, reflejando el hecho de que la tormenta esta de hecho sesgada hacia la izquierda, concentrando la mayor cantidad de lluvia en la primer hora de la tormenta.

4. La operación hidráulica de los diques y vasos muestra que solo las lagunas subsidiaras operan satisfactoriamente como reservorios. Los demás diques y vasos son incluso rebasados, hidráulicamente hablando, incluso para periodos de retorno de 5 años.

VII.3. HIDRAULICA

El análisis de las condiciones hidráulicas tanto de las obras existentes de mitigación (Bordo MMH) como de los vasos o diques existentes se realizó en función de los resultados de las corrida hidráulica a 500 años, dado que esta cota define el bordo libre del bordo MMH. El resultado de esta corrida hidráulica (Figuras VII.3.1 y VII.3.2) muestra que el agua fluye principalmente como resultado de la aportación de los escurrimientos de la cuenca poniente y surponiente. En el caso de la cuenca surponiente, el flujo impacta el bordo en los cadenamientos: *1)* 717 m y 930 m, *2)* 1,120 m y 1,800 m (Figura VII.3.3), y *3)* 2,000 m y

2,425 m, medidos a partir de la intersección con el Blvd. Manuel Talamas Camandarí y el Bordo MMH. Aunque esta zona actualmente presenta una protección del talud aguas arriba, constituida por enrocamiento para contener los efectos de turbulencia y erosión, tanto la geofísica como la geotecnia muestran un estrato de desplante conformado por materiales de grano grueso, considerados permeables. Es decir, en este punto, de mayor concentración de flujo, no existe estrato impermeable ni dentellón de arcilla para evitar efectos de subdrenaje, lo que constituye una zona de debilidad en esta importante obra. Posteriormente, el flujo de agua se conduce de forma lateral y paralela al talud aguas arriba del Bordo MMH en dirección sur oriente hasta alcanzar el depocentro principal de la antigua zona lagunar, es decir, el punto más bajo. En el trayecto, las velocidades alcanzadas (Figura VII.3.2) son mayores de 2.0 m/s lo que representa un flujo erosivo para el talud aguas arriba entre el cadenamiento de 1,200 m a 1,800 m. El resto de la estructura opera con velocidades comprendidas entre 0.5 y 1.0 m/s. Aunque el análisis por sí solo de la velocidad indica que aun y cuando los taludes estén conformados por suelo areno-arcilloso, se opera con velocidades favorables, el mapa de peligro (Figura VII.3.4) nos muestra que en términos del momentum o cantidad de movimiento (tirante x velocidad) prácticamente todo el Bordo registra rangos Altos y Muy Altos de peligrosidad. En el extremo suroriente del bordo actual, a partir de la intersección con el Boulevard Independencia se observa que parte del flujo se empieza a derivar en dirección suroriente sumándose al importante flujo proveniente de la subcuenca surponiente. El volumen combinado de estos dos escurrimientos, rebosa por encima de la vialidad MMH a partir de lluvias asociadas con TR mayores a 25 años. En esta zona ya no existe el Bordo MMH. La carencia de esta estructura de protección o mitigación, ocasiona entonces que, importantes volúmenes provenientes del surponiente y norponiente sean sumados a los escurrimientos por cuenca propia de los desarrollos ubicados en esta zona, resultando en consecuencia, en la presencia de importantes zonas de inundación.

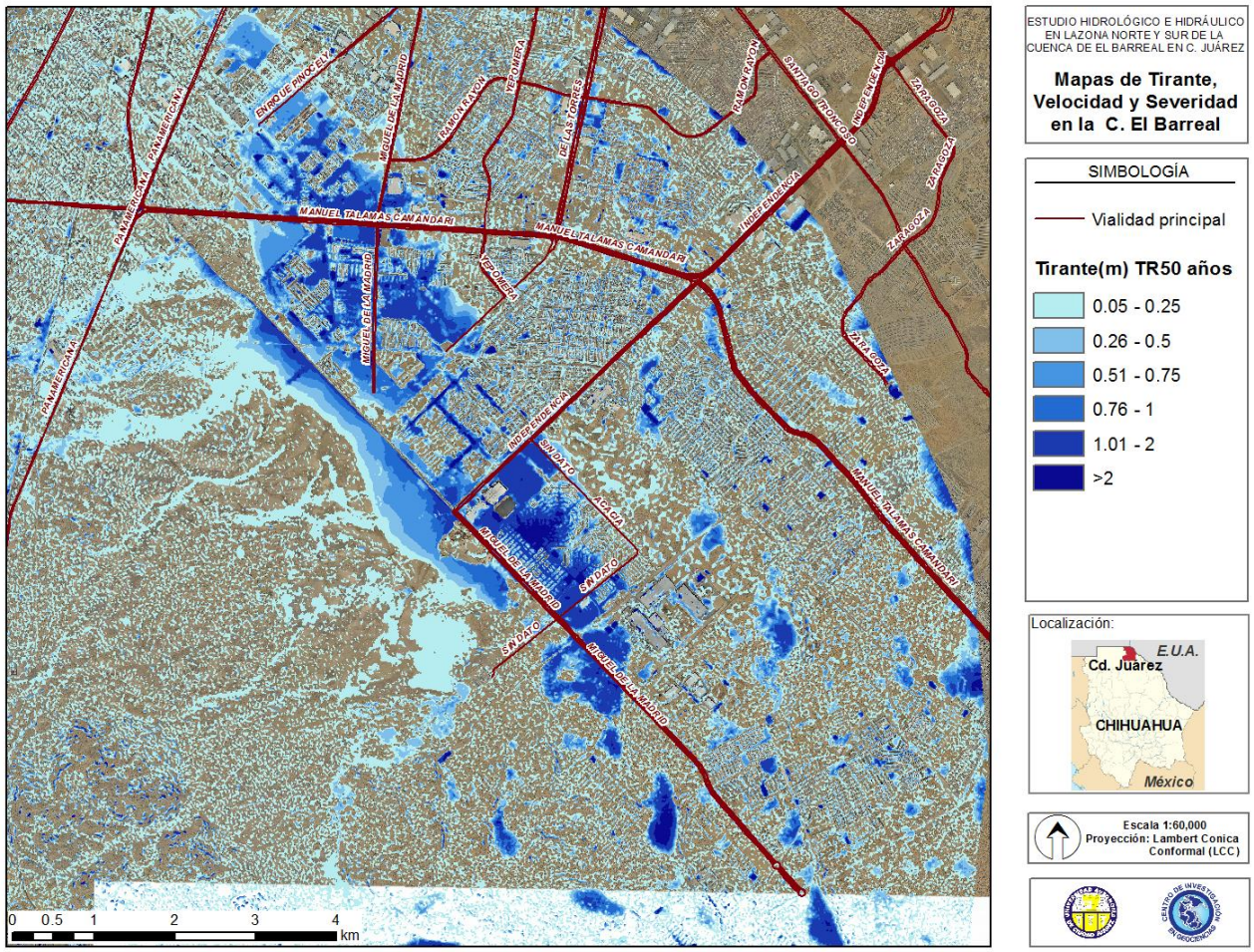


Figura VII.3.1. Mapa de Tirante Máximo a un TR 500 años.

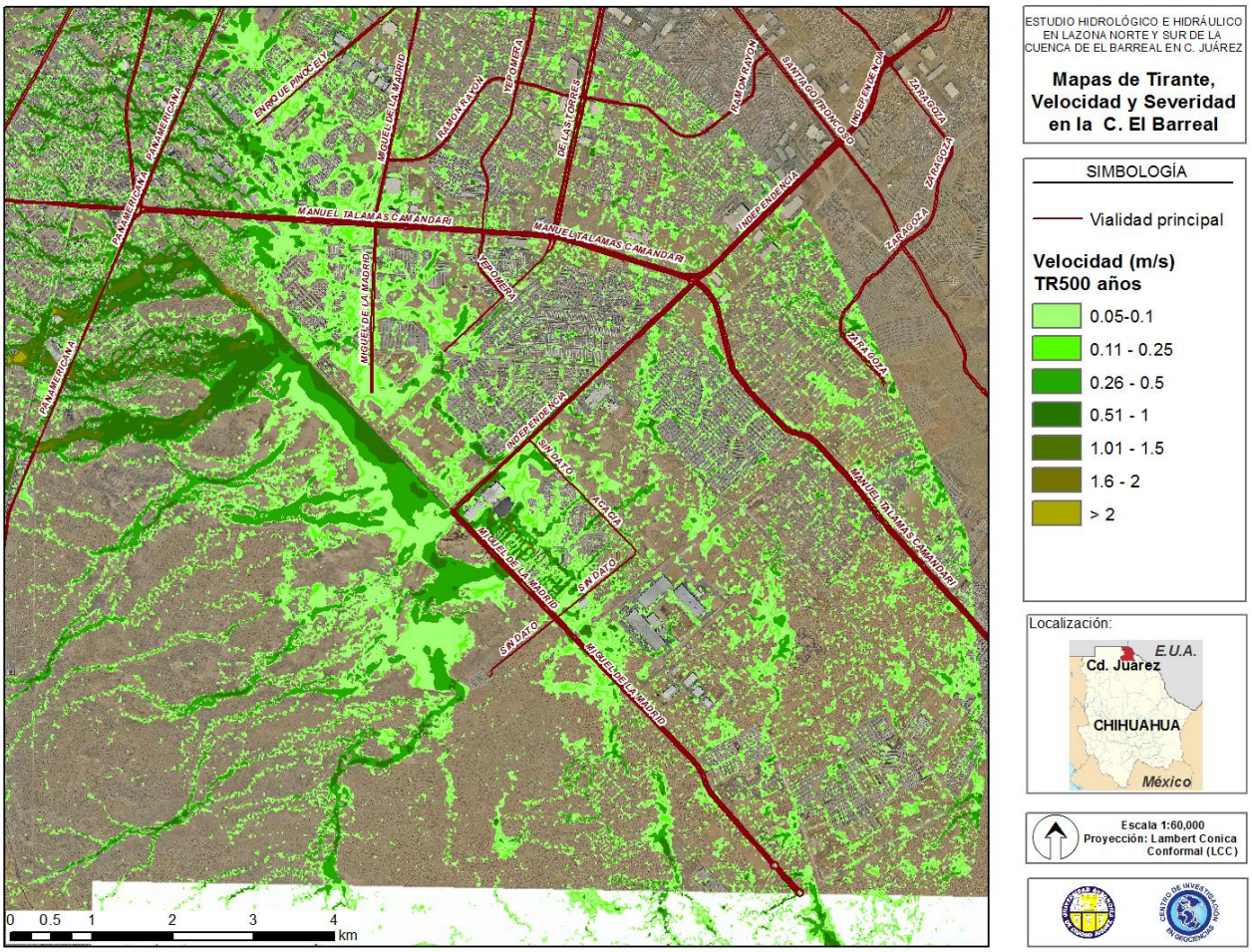


Figura VII.3.2. Mapa de Velocidad Máxima a un TR 500 años.

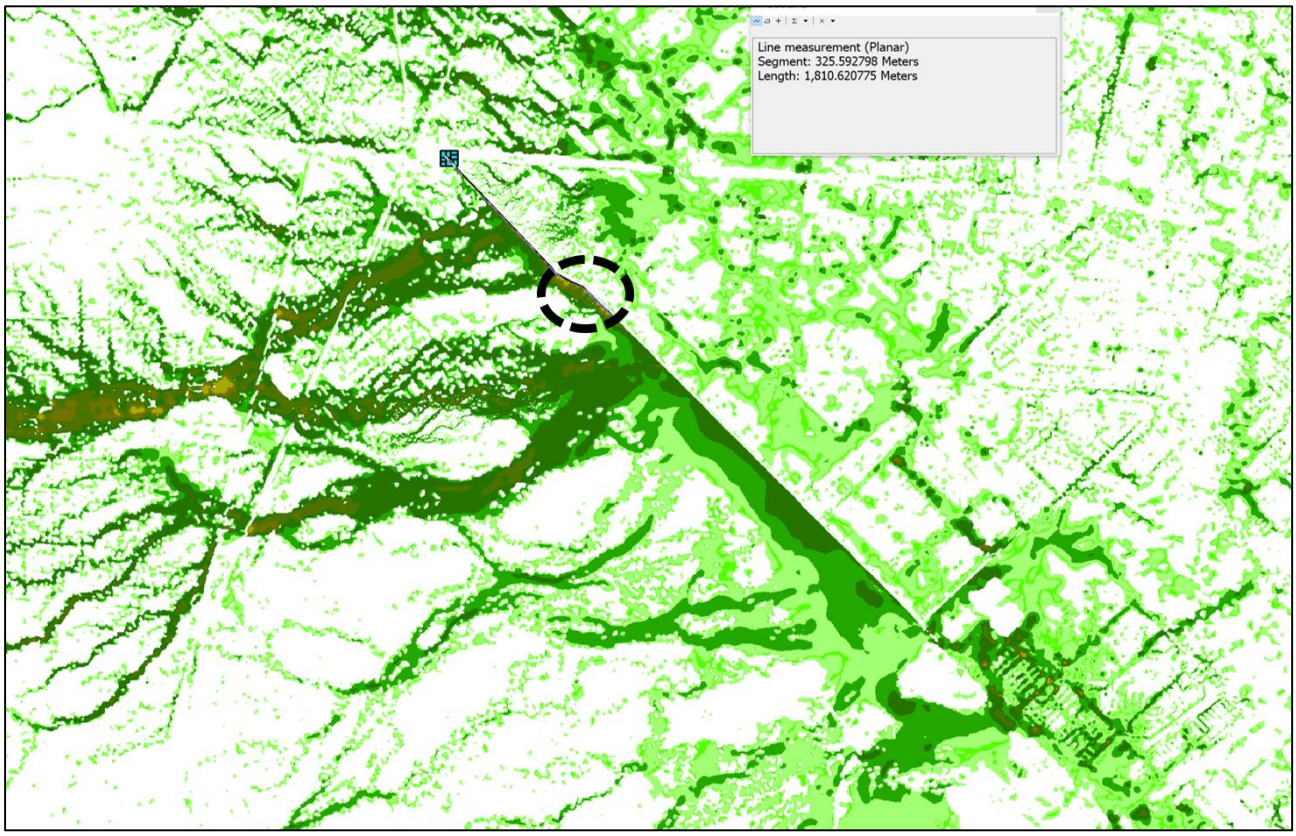


Figura VII.3.3. Velocidad Máxima a un TR 500 años en cadenamiento de 1,800 m donde se presenta mayor velocidad de flujo.

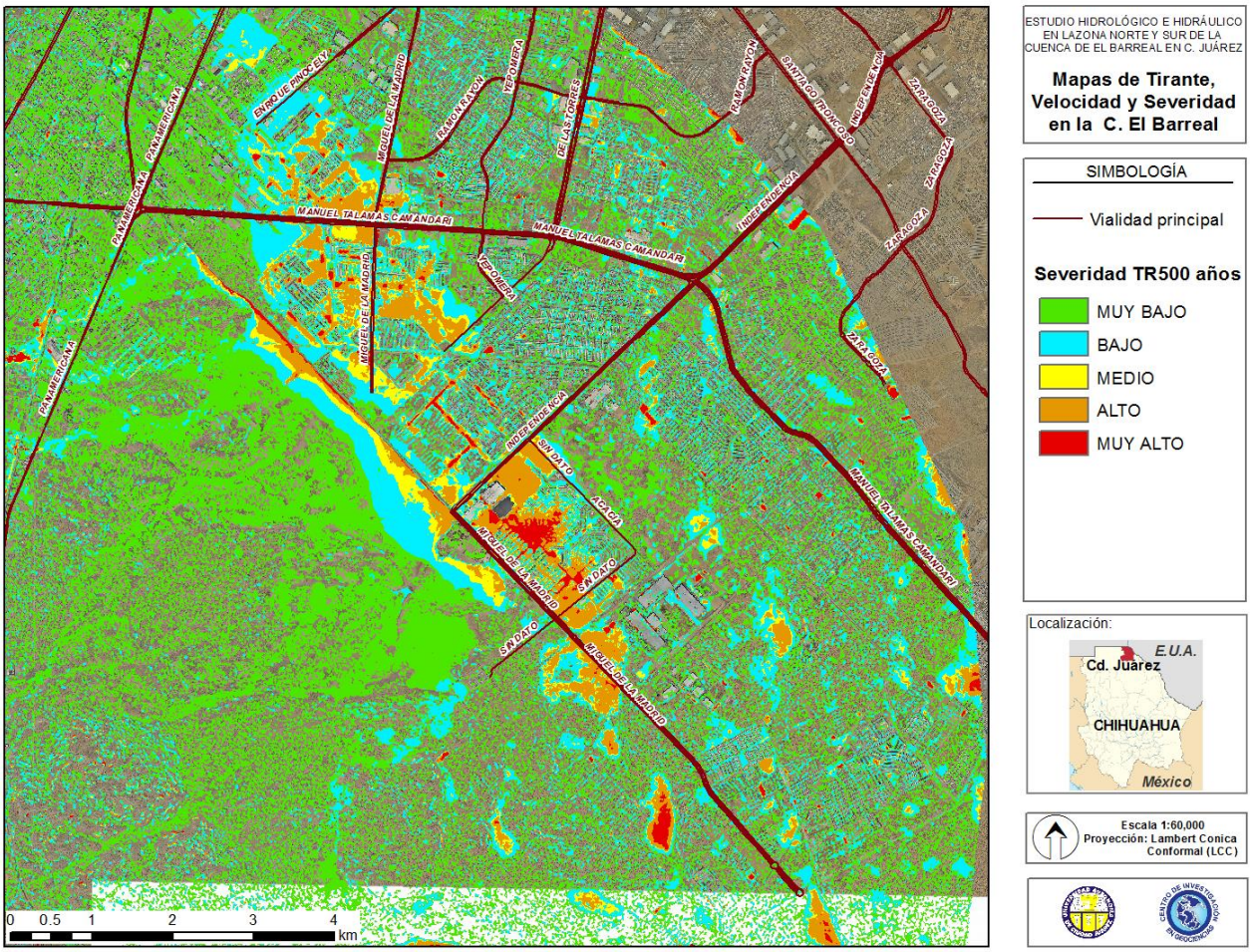


Figura VII.3.4. Modelo de Severidad del TR 500 años.

Una vez que se ha establecido que el Bordo MMH solo constituye una mediad de mitigación para la zona de la subcuenca de Triangulo formado por el Blvd. Manuel Talamas Camandarí, la vialidad Miguel de la Madrid y el Blvd. Independencia, se procedió a llevar a cabo una simulación hidráulica a un TR 500 años prolongando el bordo una distancia de casi 3.5 Km hasta cortar la cota de 1,187 m.s.nm.m (Figura VII.3.5). El resultado del modelo (Figura VII.3.6) muestra que efectivamente, el bordo sería capaz de contener los volúmenes escurridos en la cuenca surponiente sin que el agua de las cuencas norponiente y sur poniente se incorporen a la zona urbanizada por la parte suroriente de la antigua zona lagunar.

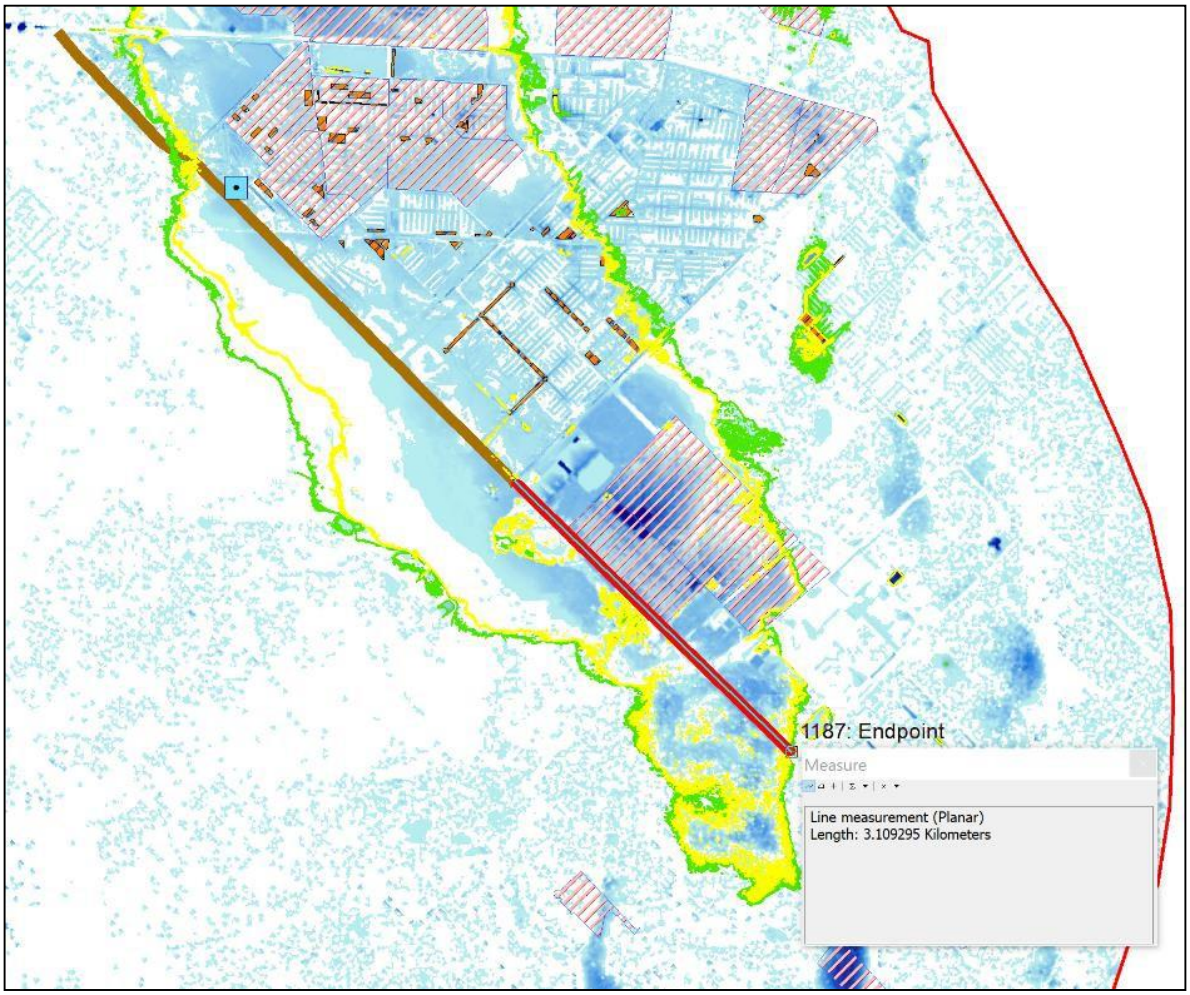


Figura VII.3.5. Propuesta de prolongación del Bordo MMH.

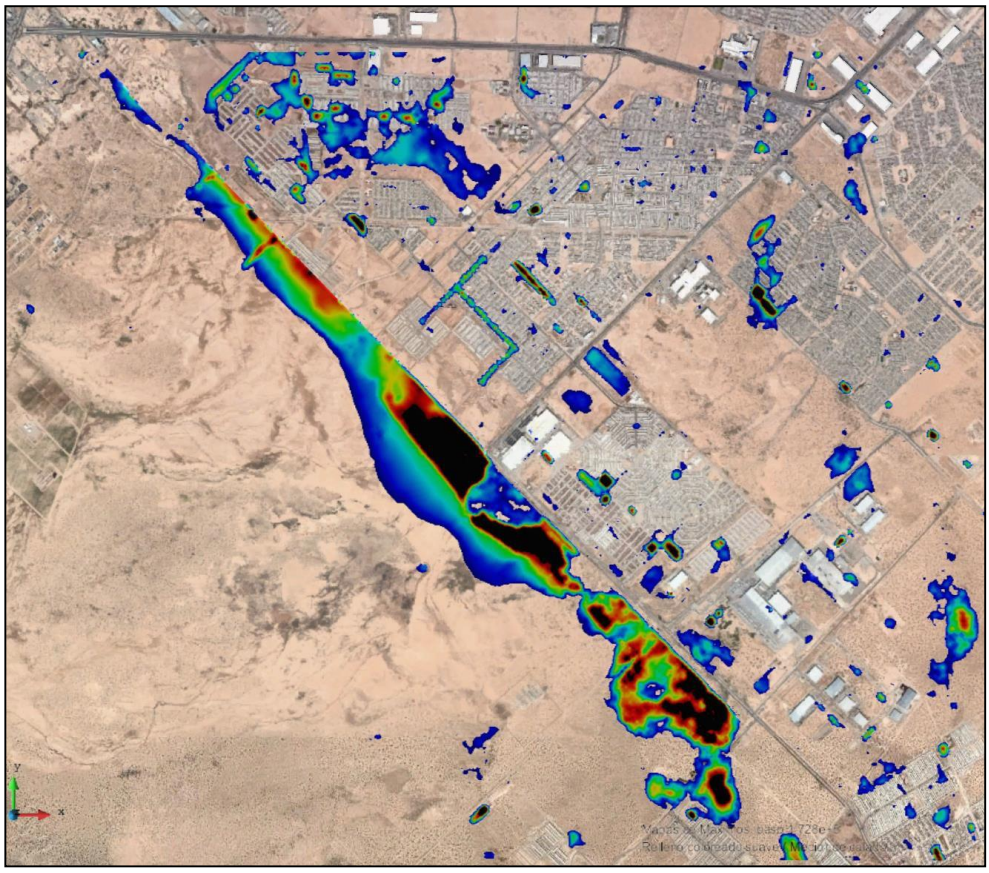


Figura VII.3.6. Simulación hidráulica a TR 500 con bordo MMH extendido.

VIII. GEOTECNIA DEL BORDO MMH Y PROPUESTA DE MEJORAMIENTO

En base a la integración de toda la información geofísica y geotécnica y los escenarios de falla resultantes se concluye que el bordo presenta varias zonas con escenario posible de riesgo de falla estructural al estar sometido al tirante hidráulico asociado con la tormenta de 500 años de periodo de retorno:

I. Zona de corte: Esta zona, localizada a los extremos Noroeste del Bordo en la localización de las TER´s 1 y 2 (cadenamiento 0+470 m a 0+600 m), se observa que el cuerpo del bordo fue alterado mecánicamente. El radargrama de esta zona es muy evidente a este respecto (Figura VIII.1).

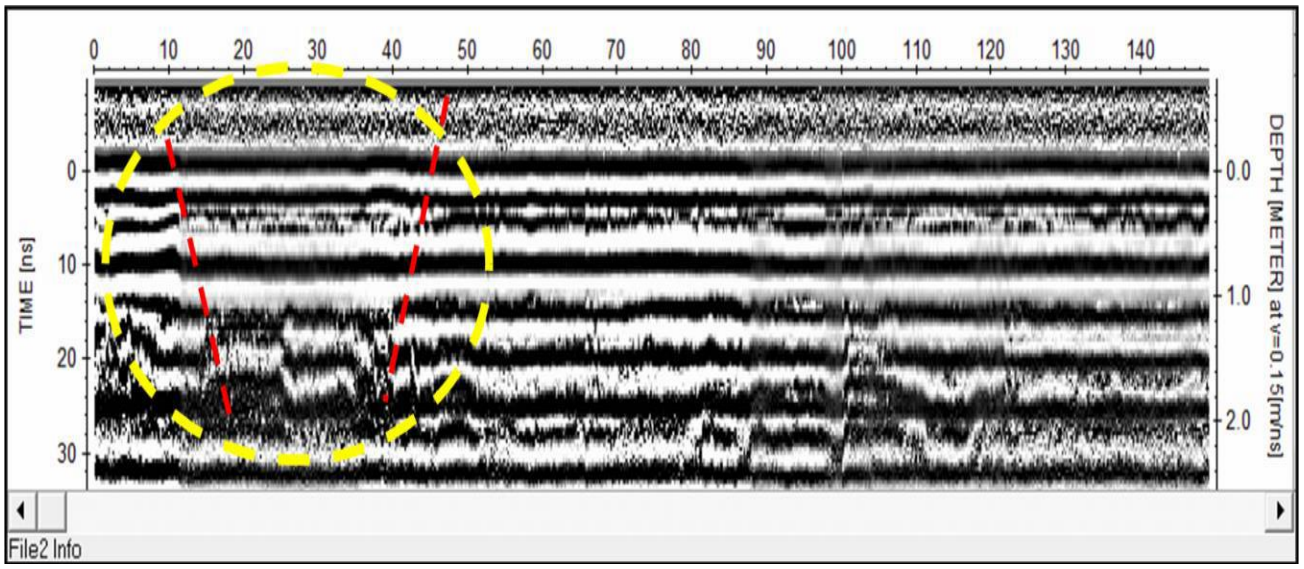


Figura VIII.1. Radargrama de la zona del corte al noroeste del BMMH.

II. Zonas Noroeste (A), localizada entre las TER´s 39 y 43 (cadenamientos 0+974 m 1+531 m). En esta zona se observa el mayor cambio de pendiente de la corona del bordo, y es aquí donde los flujos de la corrida hidráulica muestran muy alta velocidad lateral en su trayectoria hacia el centroide de la nueva zona de restitución lagunar definida por la presencia del Bordo MMH. En esta zona las TER's revelan espesores de materiales areno-limosos de más 1 m de espesor. Además de que el estrato de desplante no se localiza sobre suelos impermeables, ni se revela la presencia de un dentellón de arcilla que genere un subdrenaje que no comprometa la estructura).

III. Zona central (B), localizada entre las TER´s 23 a la 27 (cadenamiento 2+700 m a 3+140 m). En esta zona, la geofísica y geotecnia revelan perdida de continuidad lateral evidenciada por el acuñamiento del cuerpo de arcillas. Esta zona está en espesores de 1 m de litologías de arena limosa. Es decir, en el límite del umbral de seguridad. Es importante aclarar que los resultados de la prueba Triaxial en este punto muestran valores de cohesión muy elevados que resultan en umbrales más elevados del factor de seguridad de la función de falla. La permeabilidad registro un valor de

IV. Zona de la TER 09 (Cadenamiento 4+517 m) donde se observa la presencia de una estructura vertical de materiales arenosos irrumpiendo la continuidad del paquete de arcillas. La prueba Triaxial para este sondeo registró parámetros altos con valores de seguridad por encima del umbral de 1.5.

V. Zona de la TER 06 (cadenamiento 4+820), con notable pérdida de continuidad lateral del cuerpo de arcillas como consecuencia de la presencia de arenas limosas.

VI. La localización de las zonas con condición precaria de integridad estructural se muestran en la Figura VIII.2.

ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO EN LA ZONA NORTE Y SUR DE LA CUENCA DE EL BARREAL EN C. JUÁREZ
Condición del BMMH por Líneas de TER´s
SIMBOLOGÍA
Vialidad Principal
Vialidad principal
Sin Afectación
Con Afectación
Localización:
E.U.A.
Cd. Juárez
CHIHUAHUA
México
Escala 1:17,500
Cuadrícula @ 800 m
MANUEL TALAMAS CAMANDARI
MIGUEL DE LA MADRID
DE LAS TORRES
Bordo Miguel de la Madrid Hurtado
0 0.25 0.5 1 1.5 2 Km

Figura VIII.2. Zonas con condición precaria de estabilidad estructural.

VIII.1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

I. El **cuerpo de la cortina** del lugar, está conformado por **suelos de préstamo,** (material de un costado el cual fue escavado y re compactado), el cual se considera de acuerdo a la granulometría un material compuesto por arcillas y arenas limosas.

II. De acuerdo a la mecánica de suelos se considera que el bordo tiene una compactación aceptable de acuerdo al número de golpes.

III. El análisis de estabilidad de talud muestra que el bordo es estable conforme a los parámetros registrados por la geotecnia en los estratos que lo conforman. Sin embargo, estos sondeos son puntuales, por lo que es necesario el contemplar acciones correctivas o de mantenimiento en las zonas identificadas como afectadas.

IV. Es necesario que en la parte de la corona, sea retrabaje el material y se compacte y se considere una capa de 20 centímetros de material de base compactado al 95%, con la finalidad de evitar filtraciones a las capas inferior y sirva como un superficie de rodamiento que eviten deformaciones por el paso de vehículos con la conjugación de la humedad creada por los eventos de lluvia. Es decir, se requiere el diseño de un pavimento o bien, cancelar la circulación de vehículos.

A. ESTRATEGIA A CORTO PLAZO

En este apartado, Estrategia a corto plazo, se refiere a las obras que se requiere para dar una solución global a las zonas actualmente afectadas como consecuencias de los volúmenes escurridos. Este grupo de estrategias se enfoca concretamente a la solución del las subcuencas norte, triangulo y sur actualmente urbanizadas.

Del análisis de los hallazgos hidrológicos y la capacidad de infiltración del subsuelo se concluye que las acciones que comprende la estrategia global a corto plazo son:

1.- Reforzamiento del bordo MMH existente en las zonas especificadas para proteger la zona de la subcuenca triangulo. Conforme al manual de Presas de Tierra Compactada de la SAGARPA, un bordo deberá presentar los siguientes elementos estructurales (Figura VIII.1.1):

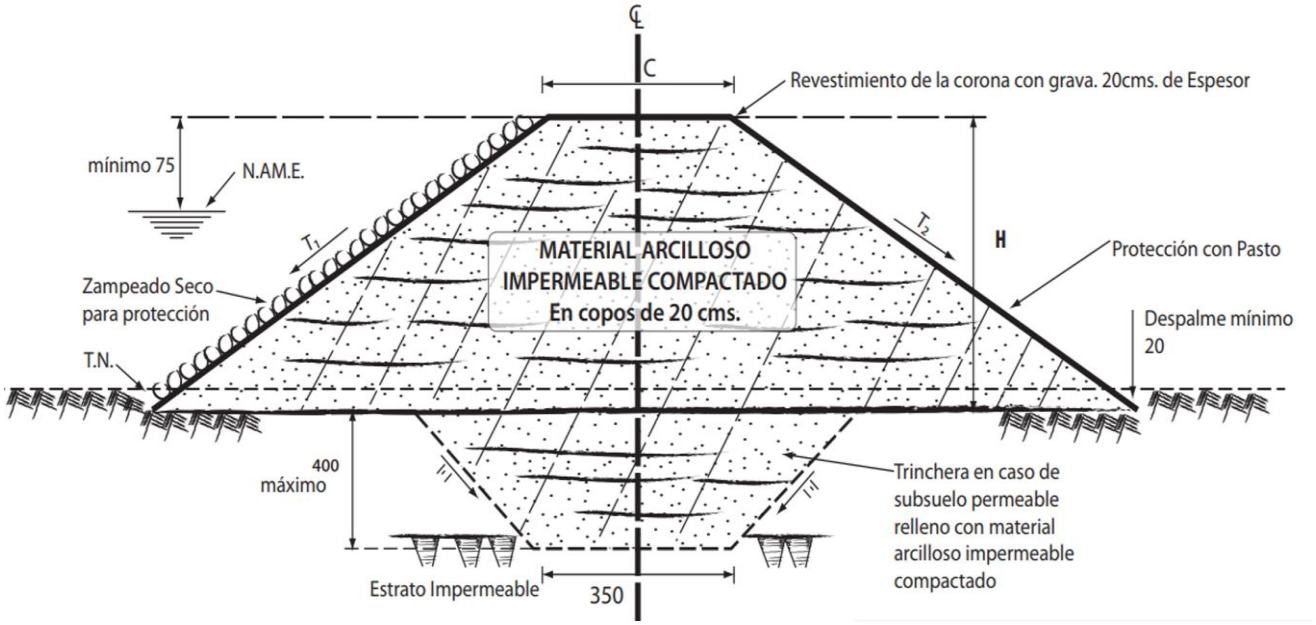


Figura VIII.1.1. P r o p u e s t a d e s cción tipo del BMMH.

I.Bordo libre a 75 cm del NAME.

a. En este caso, conforme a indicaciones de CENAPRED el NAME se definió a la cota de TR 100 y el Bordo Libre al tirante de la corrida bidimensional de TR500. Sin embargo, los planos se realizaron solicitando el bordo hasta la cota de 1187 m.s.n.m.m.

b. Acción requerida: recuperar la cota de diseño en las zonas en que el bordo haya sido compactado como consecuencia del tránsito de vehículos pesados.

II.Ancho de corona del al menos 3.50 m para bordos menores a 4.50 m.

a. El bordo es de máximo 3m de altura con ancho de 5 m a 6 m.

b. Acción requerida: ninguna

III. Relación de talud Aguas Arriba y Aguas Abajo: 2:1.

a. Si cumple con esta relación de Talud de manera sobrada aguas arriba, Aguas abajo cumple de manera muy justa.

b. Acción requerida: Ninguna.

IV. Trinchera o dentellón Impermeable en caso de desplante en material permeable.

a. La mayor parte del bordo actual está localizado en estratos arcillosos no permeables. Excepto en la zona comprendida en el cadenamiento 0+974 m a 1+531 m.

b. Acción Requerida: Diseño de subdrenaje apropiado.

V. Zampeado seco de protección en Talud aguas arriba.

a. Prácticamente todo el bordo carece de protección en el talud aguas arriba.

b. Acción requerida: Colocar una cortina de protección en el talud y un sistema de drenaje superficial de la corona.

VI. Revestimiento de corona con grava de al menos 20 cm de espesor.

a. Originalmente el Bordo MMH contaba con una pantalla de riego y grava. Actualmente como consecuencia del tránsito de vehículos pesados, este revestimiento no está ya presente.

b. Acción: Es necesario que en la parte de la corona, sea retrabaje el material y se compacte y se considere una capa de 20 centímetros de material de base compactado al 95%, con la finalidad de evitar filtraciones a las capas inferior y sirva como un superficie de rodamiento que eviten deformaciones por el paso de vehículos con la conjugación de la humedad creada por los eventos de lluvia. Es decir, se requiere el diseño de un pavimento o bien, cancelar la circulación de vehículos.

VIII.2. Proyecto Geométrico de Prolongación del Bordo MMH

Prolongación del Bordo en dirección Sureste hasta cortar la cota 1187 m.s.n.m.m. La parte sureste de la zona urbanizada adolece de obra hidráulica para contener flujos de la cuenca sur poniente. Es necesario prolongar el bordo MMH hasta cortar a la cota del tirante correspondiente a un bordo libre de una tormenta de 500 años. Esta obra es necesaria para que los desarrollos de la zona sureste del Blvd. Independencia estén protegidos ante eventos hidrometeorológicos extremos. De no construirse esta obra, deberán re-acondicionar su obra pluvial a contener la mancha de inundación calculada en este estudio para un periodo de retorno de 100 años.

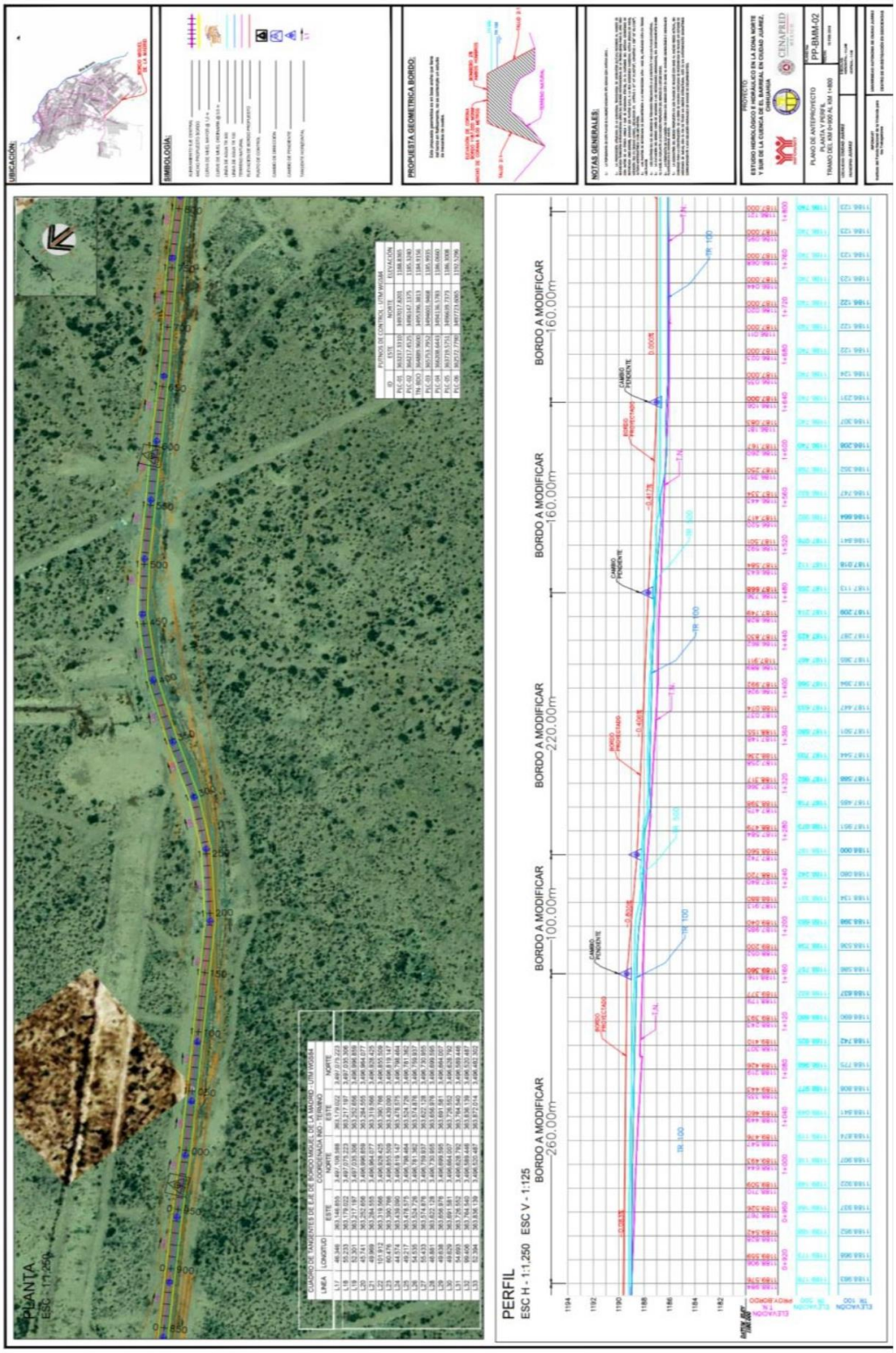


Figura VIII.2. Sección y cadenamiento del BMMH.

VIII.2.1. Propuesta de mejoramiento del Bordo MMH

CADENAMIENTO		DAÑO OBSERVADO	ACCIONES
0+470	0+600	Zona Alterada	RECONFORMAR EL BORDO EN ESTA ZONA
0+974	1+531	Estrato de desplante en arena	DISEÑAR SUBDRENAJE CON DENTELLON O PROTECCION CON ENROCAMIENTO Y CONCRETO LANZADO
2+700	3+140	Heterogeneidad lateral	RECONFORMAR BORDO EN EL CENTRO DE LA TER 24.REMPLAZAR MATERIAL EN TER 25
4+500	4+550	Heterogeneidad lateral	REMPLAZAR 4 M DE BORDO EN EL CENTRO DE TER 9
4+800	4+840	Presencia de arenas	RECONFORMAR BORDO EN LAS C.M 8 Y 26 m DE TER 6
0+000	5+153	El talud aguas arriba carece de protección aguas arriba	Zampeado seco para protección o alternativa similar de protección.

B. ESTRATEGIAS A PLAZO MEDIANO

Estas acciones están enfocadas a resolver la problemática de urbanización a futuro de las cuencas localizadas aguas arriba del Bordo MMH y su eventual prolongación. Estas acciones están basadas en tanto los resultados del análisis hidráulico así como en los promedios de evapotranspiración y de infiltración.

En base a los resultados de la simulación hidráulica, fue posible identificar plenamente las áreas de mayor concentración de flujo o escurrimiento que impactan de manera notable el Barreal. Es decir, el análisis del mapa de velocidad máxima (Figura VII.3.2.) identifica plenamente como descienden los escurrimientos en la cuenca El Barreal.

La principal aportación proviene de la subcuenca Poniente dado que ninguno de los diques existentes en esa cuenca (Sta. Elena I y II, Charly I y II y Yonkes) presentan condiciones óptimas de regulación o almacenamiento. Es decir, en base al análisis de operación hidráulica (Tabla 5), prácticamente la retención es mínima y todo el escurrimiento es conducido hasta la zona de restitución lagunar.

En el caso de la subcuenca centro, los dique KM 28 y Subestación (Herradura) tampoco operan satisfactoriamente, ni siquiera para periodos de retronó ordinarios.

Finalmente, la cuenca surponiente, con una importante área de aportación, es regulada de manera eficiente, conforme al análisis de operación hidráulica por las lagunas naturales L. Poniente y L.P.Madrid.

VIII.3. ACCIONES DE LA ESTRATEGIA A MEDIANO PLAZO

I. Preservación del sistema lagunar subsidiario: El análisis de operación hidráulica y las corridas hidráulicas indican claramente que el sistema de lagunas subsidiarios debe ser preservado ante proyectos de urbanización, ya que estas lagunas son vasos de almacenamiento que no solo protegen la zona urbanizada actualmente ante eventos hidrometeorológicos extremos, sino incluso ante lluvias ordinarias dada la gran capacidad de almacenamiento que disponen la Laguna Poniente con 950 mil metros cúbicos y laguna P. Madrid con 300 mil m^3. Preservación de las zonas lagunares subsidiarias Es de suma importancia preservar la red de lagunas subsidiarias de la zona Sur de la cuenca, tomando como medida la no urbanización de las mismas. Ya que, al hacerlo, el volumen de alrededor de 1,000,000 de metros cúbicos que dichas lagunas de manera natural retienen se vería trasladado a zonas circundantes, teniendo como consecuencia nuevos problemas de inundación. El criterio para el dimensionamiento de las lagunas será la mancha que genere el periodo de retorno de 500 años, ya que estas deben de operar bajo los mismos criterios que el Bordo Miguel de la Madrid Hurtado. Además, estas lagunas funcionaran como *"megavasos"* de captación para los futuros desarrollos en la zona (no estando exentos de construir obra pluvial). Los desarrollos a construir en la zona de lagunas subsidiarias deben de respetar el manejo de rasantes para asegurar la llegada del agua dichas lagunas, así como la construcción de sus propias obras para no aumentar el volumen de llegada. Se podría reducir el área de las lagunas hasta un 50 por ciento siempre y cuando el volumen a TR-1000 de estas se conserve y se diseñe un plan de mantenimiento e infiltración que garantice el correcto funcionamiento de *"megavaso".*

El sistema de lagunas subsidiarios y los polígonos del PMDU en los cuales se localizan (Figura VIII.3.1) muestran, para la corrida de 100 años, la importancia de este sistema de regulación hidráulica natural.

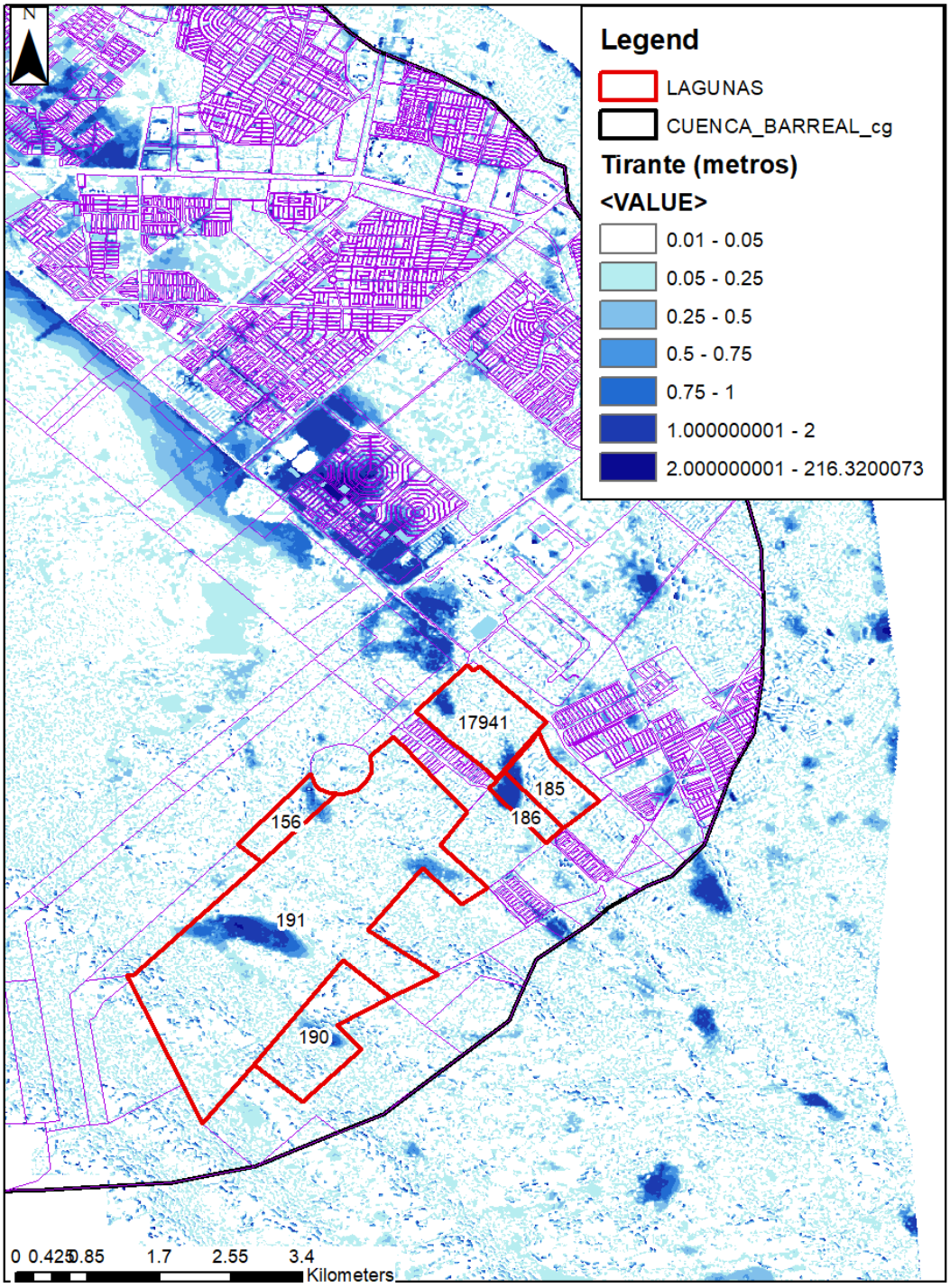


Figura VIII.3.1. Sistema lagunar subsidiario y polígono PMDU. Este sistema debe ser preservado del proceso de urbanización.

II. Es imperativo que la autoridad haga uso de los mapas de inundación y severidad en el generados en este estudio durante el proceso de asignación y autorización de nuevos desarrollos urbanos.

III. Recomendar al municipio que en la realización de proyectos ejecutivos para la construcción de vasos de almacenamiento con las siguientes capacidades:

Tabla 6. Capacidad de almacenaje de las obras hidráulicas.

ESTRUCTURA	CAPACIDAD TR500 (m^3)
STA ELENA I	721,000
STA ELENA II	238,000
FLUOREX	261,000
CHARLY 1	NA
CHARLY 2	393,000
KM28	244,000

IV. En función de los volúmenes de almacenamiento de las obras propuestas, (incluyendo bordo MMH), se debe contemplar como parte de la solución que tanto autoridades como desarrolladores urbanos contemplen que el manejo de escurrimientos no debe limitarse exclusivamente a la contención del escurrimiento durante el tránsito de la avenida. Sino que los importantes volúmenes escurridos deben ser considerados como un activo hídrico de extrema importancia, dado que, siendo la zona parte del gran

desierto chihuahuense, caracterizada por escasos promedios de precipitación y una presencia casi nula de aguas perennes (excepto el Rio Bravo), los volúmenes eventualmente captados deberán ser re-incorporados al acuífero del Bolsón del Hueco, el cual se abate, conforme a reportes del organismo operador local (Junta Municipal de Aguas y saneamiento (JMAS)), un promedio aproximado 1 m por año, como consecuencia del consumo de tipo de uso público e industrial. Para l infiltración o re-inyección deberá adoptarse la normatividad vigente al respecto. En el caso de los desarrollos, ubicados en la zona lagunar, donde la geofísica revelo hasta 30 m de espesor de arcillas, deberá considerarse que las estructuras de infiltración se localicen en su descarga a profundidades mayores sobre un estrato permeable.

V. Elaboración de un plan de contingencias por parte de Protección Civil municipal considerando como escenario de evacuación la cota de 1,186.123 m.s.n.m.m correspondiente al tirante hidráulico asociado a una tormenta con periodo de retorno de 100 años.

VI. Actualización del Atlas de Riesgos de Ciudad Juárez.

INSTITUTO DEL FONDO NACIONAL DE LA VIVIENDA PAR LOS TRABAJADORES

I N F O N A V I T

“ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO EN LA ZONA NORTE Y SUR DE LA CUENCA DE EL BARREAL EN CIUDAD JUAREZ, CHIHUAHUA”

REPORTE

ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN LOCAL

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN 3
II. OBJETIVO 3
IV. Ubicación de la zona del proyecto 4
V. JUSTIFICACION 4
V.1. Descripción de la problemática 6
VI. METODOLOGÍA DE LA SELECCÓN DE POLIGONOS EXPUESTOS AL PELIGRO HIDROLÓGICO 12
VII. PROPUESTA DE NUEVAS OBRAS (ZONA NORTE Y ZONA DE TRIANGULO) 19
A. ZONA NORTE 19
SOLUCION LOCAL POLIGONO PMDU 4131 19
SOLUCION LOCAL POLIGONOS PMDU 4137, 4138, 4139 22
SOLUCION LOCAL POLIGONO PMDU 17089 25
SOLUCION LOCAL POLIGONO AGEB 85 28
SOLUCION LOCAL POLIGONO AGEB 86 30
SOLUCION LOCAL POLIGONO PMDU 18166 32
SOLUCION LOCAL PMDU 7955 33
SOLUCION LOCAL PMDU 2936 34
SOLUCION LOCAL PMDU 18856 35
SOLUCION LOCAL PMDU 18162 36
SOLUCION LOCAL PMDU 2440 37
SOLUCION LOCAL PMDU 20380 38
SOLUCION LOCAL PMDU 16936 39
SOLUCION LOCAL PMDU 7929 40
SOLUCION LOCAL PMDU 9515 41
B. ZONA TRIANGULO 42
SOLUCION LOCAL POLIGONOS PMDU 3259, 3332, 3333 y 3344 42
SOLUCION LOCAL PMDU 3645 44

VIII. PROPUESTA NUEVAS OBRAS (ZONA SUR Y AGUAS ARRIBA DEL BORDO MMH) 45

SOLUCION LOCAL POLIGONO 8489 45
SOLUCION LOCAL POLIGONO 8488 47
SOLUCION LOCAL POLIGONO 21041 48
SOLUCION LOCAL POLIGONO AGEB 581 49
SOLUCION LOCAL POLIGONO AGEB 650 52
SOLUCION LOCAL POLIGONO 20476 54
SOLUCION LOCAL POLIGONO 17441 56
SOLUCION LOCAL POLIGONO 148 57
SOLUCION LOCAL POLIGONO 17941 58
SOLUCION LOCAL POLIGONO 185 59
SOLUCION LOCAL POLIGONO 186 60
SOLUCION LOCAL POLIGONO 191 61
SOLUCION LOCAL POLIGONO 190 62
SOLUCION LOCAL POLIGONO 179 63
SOLUCION LOCAL PMDU 143 y 147 64
SOLUCION LOCAL PMDU 153 65
SOLUCION LOCAL PMDU 156 66
SOLUCION LOCAL PMDU 6791 67
SOLUCION LOCAL PMDU 18042 68
SOLUCION LOCAL POLIGONOS AGUA ARRIBA DEL BORDO MMH 69

IX. LISTADO FINAL DE POLIGONOS AFECTADOS 71

X. RECOMENDACIONES 74

I. INTRODUCCIÓN

En Ciudad Juárez, en el estado de Chihuahua, durante la temporada de lluvias se presentan situaciones de riesgo a causa de la intensidad con que se presenta la precipitación. El problema se genera aguas abajo de los principales arroyos y diques que desembocan hacia asentamientos urbanos, incrementando con esto los daños a la población y a la infraestructura urbana en general. Ante esta situación es imperativo llevar a cabo la actualización de los estudios hidrológicos requeridos para los diferentes periodos de retorno en las zonas con un marcado crecimiento urbano, de tal forma que podamos conocer a detalle las modificaciones que se han presentado en las cuencas, con el fin de diseñar las obras de control hidráulico requeridas para salvaguardar tanto la vida como de la propiedad en un ambiente de convivencia armónico y sustentable con el medio ambiente.

II. OBJETIVO

Localización de polígonos de desarrollo urbano expuestos al peligro hidrológico.

III. ALCANCES

Generar un instrumento a nivel ejecutivo que permita establecer que zonas están expuestas al peligro hidrológico MEDIO, ALTO y MUY ALTO en la cuenca el Barreal.

IV. Ubicación de la zona del proyecto

El proyecto en cuestión se localiza en el municipio de Ciudad Juárez, Estado de Chihuahua, en la Región Hidrológica "Bolsón del Hueco", en la cuenca definida por el Plan Sectorial de Manejo de Agua Pluvial (PSMAP) Zona VIII - El Barreal al sur de la ciudad, tal como se puede ver en la Figura IV.1.1.

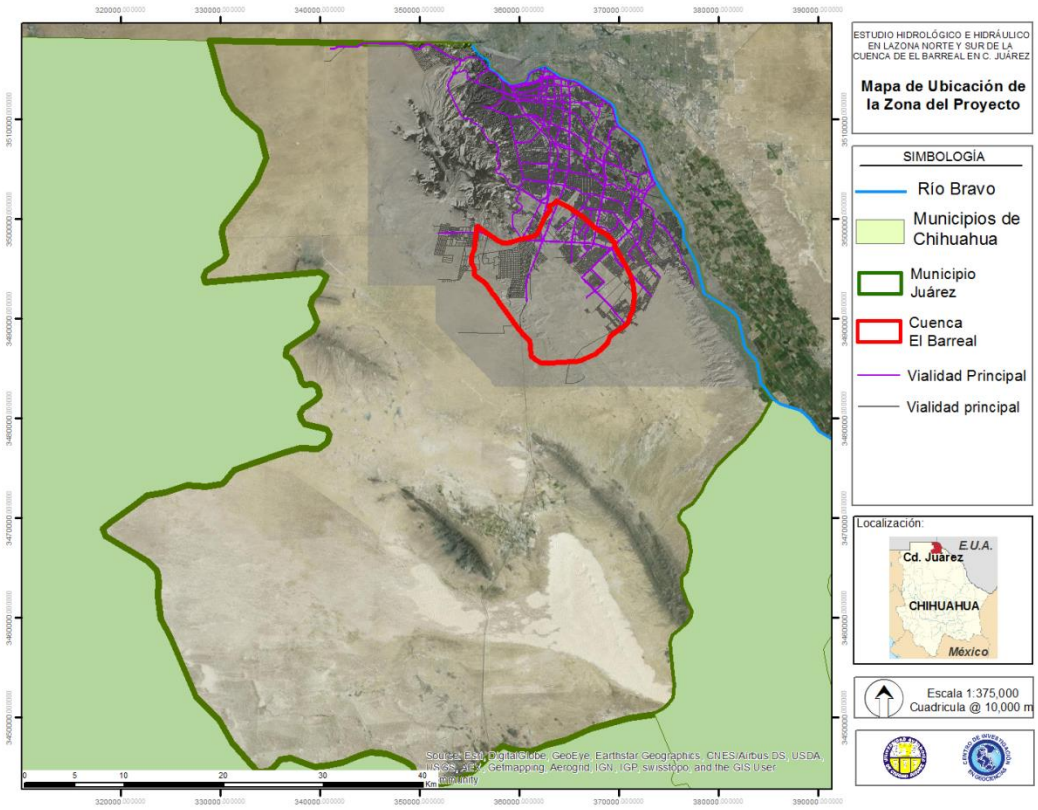


Figura IV.1.1. Localización general de la cuenca El Barreal en Cd. Juárez.

V. JUSTIFICACION

La cuenca hidrológica del Barreal es una cuenca endorreica donde todos los escurrimientos de tipo intermitente convergen en una zona baja definida como

laguna de patos. En esta laguna se han reportado recientemente (2006 y 2008) inundaciones ante eventos de lluvia de hasta 25 años de periodo de retorno. Las inundaciones registradas en esta zona obedecieron al efecto combinado de lluvias con periodo de retorno de 25 años y falla de estructuras aguas arriba tales como la ruptura de la Presa Santa Elena I, la falta de capacidad de los diques Charly y Santa Elena II, la carencia de una última barrera de blindaje hidráulico de la zona ya desarrollada, además de la colmatación de estructuras de infiltración en algunos de los vasos de contención de cada desarrollo o fraccionamiento localizados en la zona lagunar.

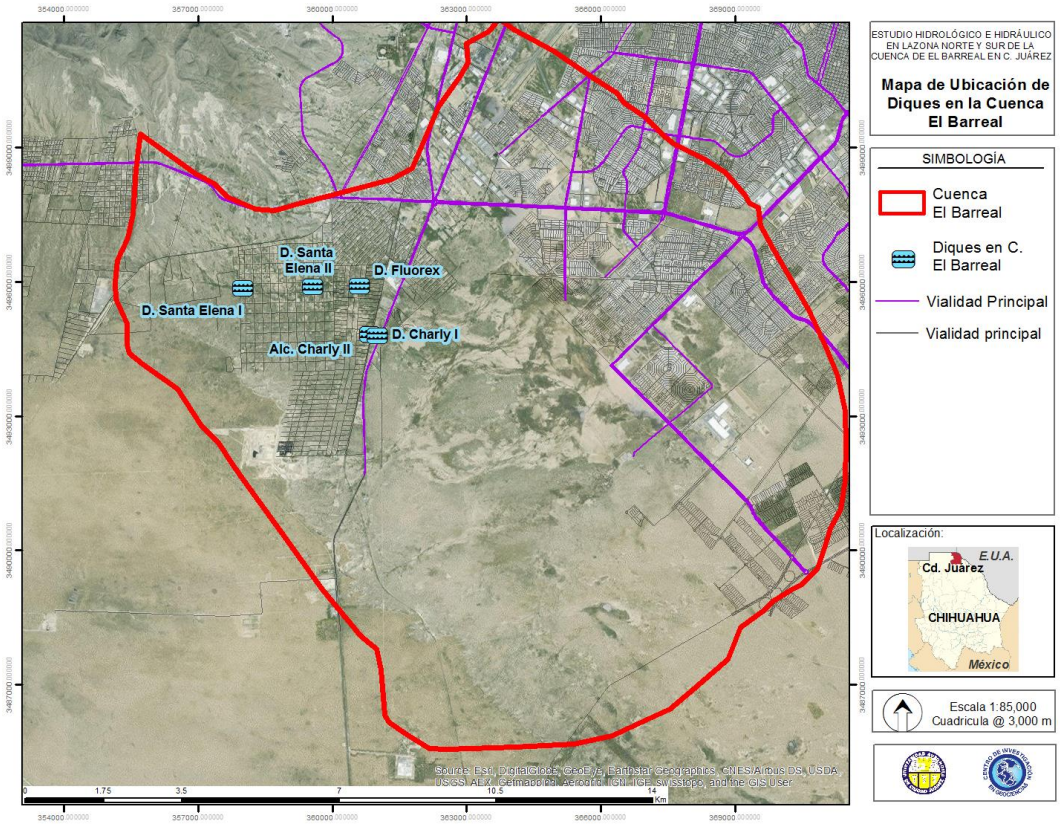


Figura V.1. Localización general de la cuenca El Barreal en Cd. Juárez.

V.1. Descripción de la problemática

Los constantes embates de los fenómenos hidrometeorológicos extremos, tales como lluvias extraordinarias en los últimos años han ocasionado pérdidas humanas y materiales cuantiosas, así como daños a la infraestructura urbana de la ciudad.

El Barreal es una cuenca cerrada que drena la zona sureste de la Sierra de Juárez (Figura V.1.1). El centro de la cuenca está ocupado por una llanura plana con una superficie de 2,3 km^2. Existen 50 m de diferencia en elevación topográfica entre el punto más bajo en el centro de la cuenca y el punto más alto en la parte noroccidental de la cuenca más cercana a la Sierra de Juárez (Figura V.1.2), así como 15 m y 4 m de desnivel, respectivamente, a las terrazas occidental y oriental más cercana desde el centro de la cuenca o zona lagunar (Figura V.1.3). Los sedimentos acumulados en lo alto de la cuenca se definen por un tamaño de grano más grueso como arenas, mientras que van disminuyendo en tamaño de limos y arcillas hacia el centro de la cuenca.

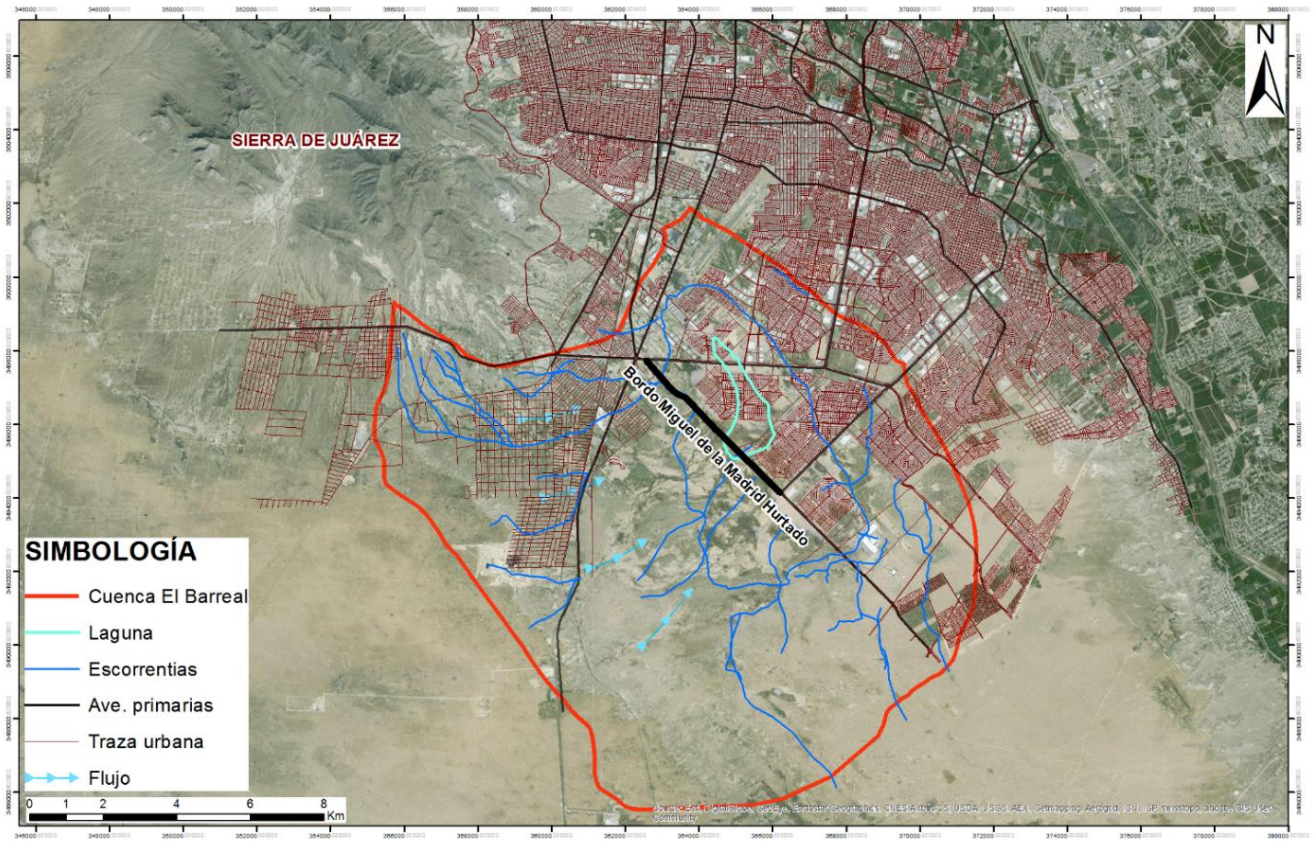


Figura V.1. 1. Localización y escurrimientos de la Cuenca Barreal y la subcuenca MMH-TC-BI.

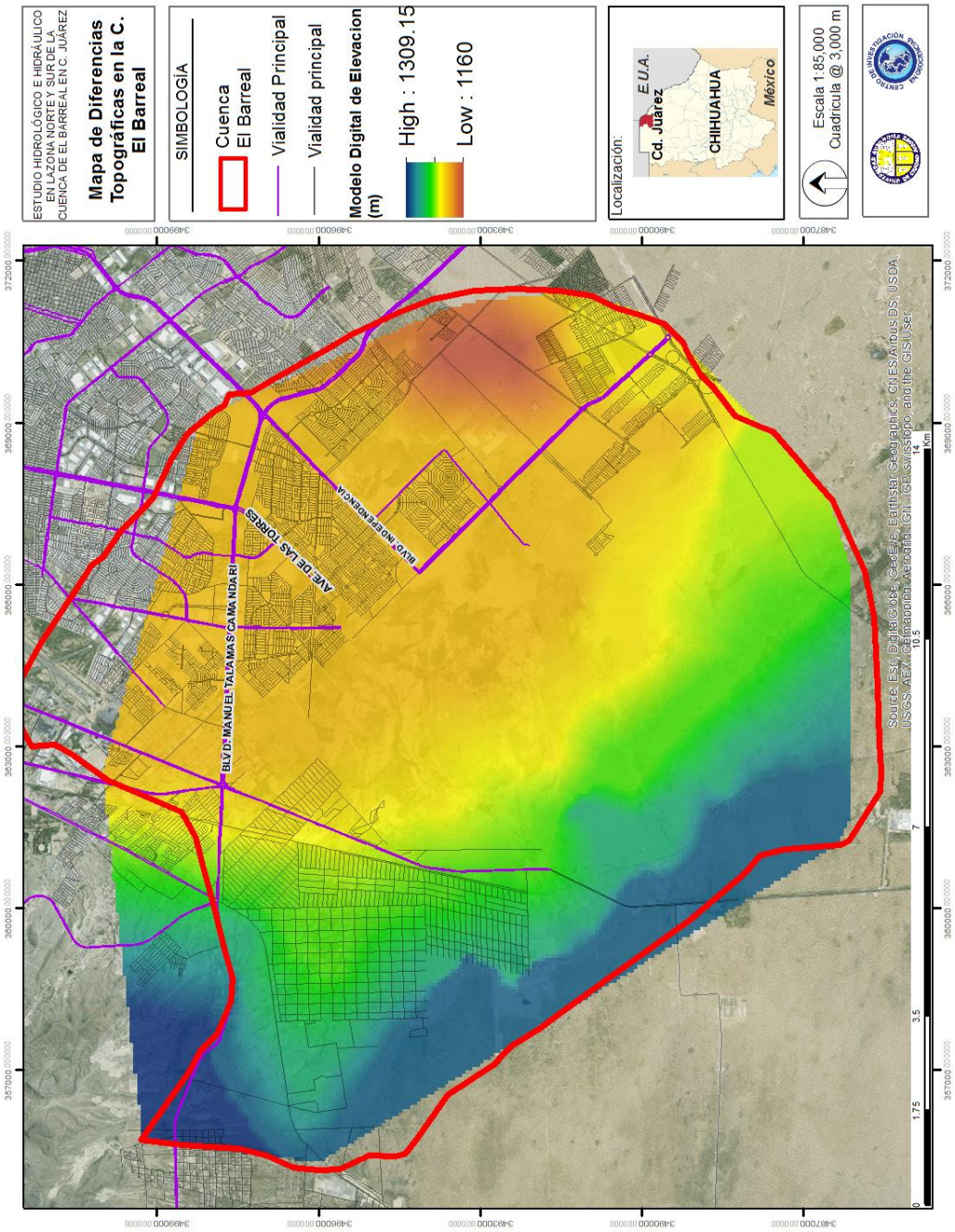


Figura V.1.2. Diferencia de elevación entre las vertientes y centro de la subcuenca Barreal.

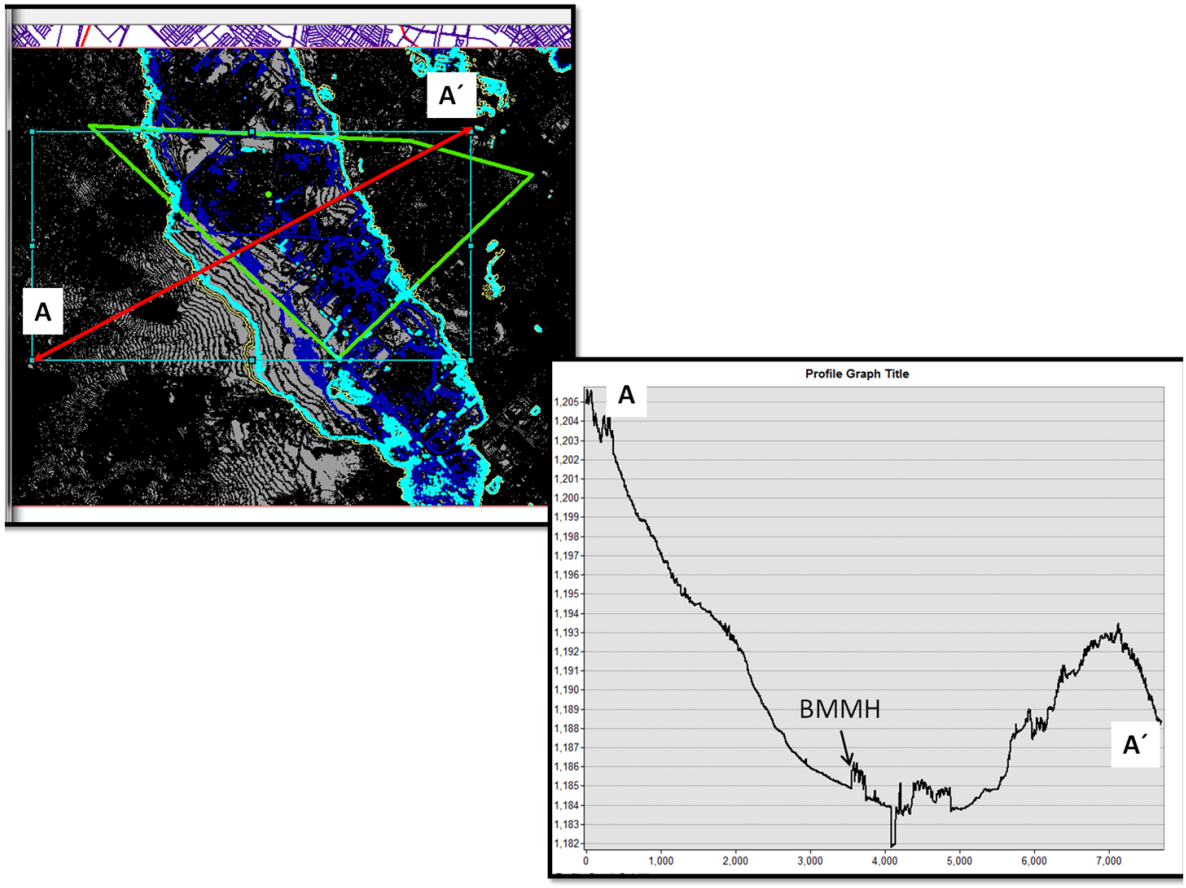


Figura V.1.3. Diferencia de elevación entre las terrazas y centro de la subcuenca Barreal. En verde se muestra el triángulo conformado por las vialidades Miguel de la Madrid, Boulevard Independencia y Talamas Camandari como referencia.

La cuenca de El Barreal cubre aproximadamente 164.114 km^2 (IMIP, 2004b), obteniéndose un volumen aproximado de 1,318.37 m^3 (IMIP, 2004), para una precipitación media anual de 300 mm (ACCV, 2007) esto con datos muy antiguos (sin datos LiDAR) sin tomar en cuenta los modelos digitales de elevación más actuales, los bordos existentes, y respecto de solo dos estaciones hidrometeorológicos, por lo que es necesario una actualización al estudio. Dicha

masa relativamente grande de agua es transportada por varias corrientes o arroyos intermitentes de primer y segundo orden que drenan el agua a un área más baja definido por la curva de nivel de elevación 1,160 m, lo que define el límite histórico de la Laguna de los Patos (El Barreal) (IMIP, 2004b). Sin embargo, se espera un área de inundación de hasta 6 km^2 si no se contiene o no existen instalaciones hidráulicas para contener la escorrentía (IMIP, 2004b).

Actualmente, la antigua zona lagunar, o parte más baja de este sistema endorreico, está protegida por un bordo con capacidad de contención de eventos hidrometeorológicos extremos de periodo de retorno de 100 años con bordo libre a 500 años. Esta zona está definida por el polígono (casi un triángulo) delimitado por la vialidad Miguel de la Madrid Hurtado (MMH) al oeste que constituye el bordo en sí, por la vialidad Manuel Talamas Camandari (TC) al norte, y por el Boulevard Independencia (BI) al Este (Figura V.1.4).

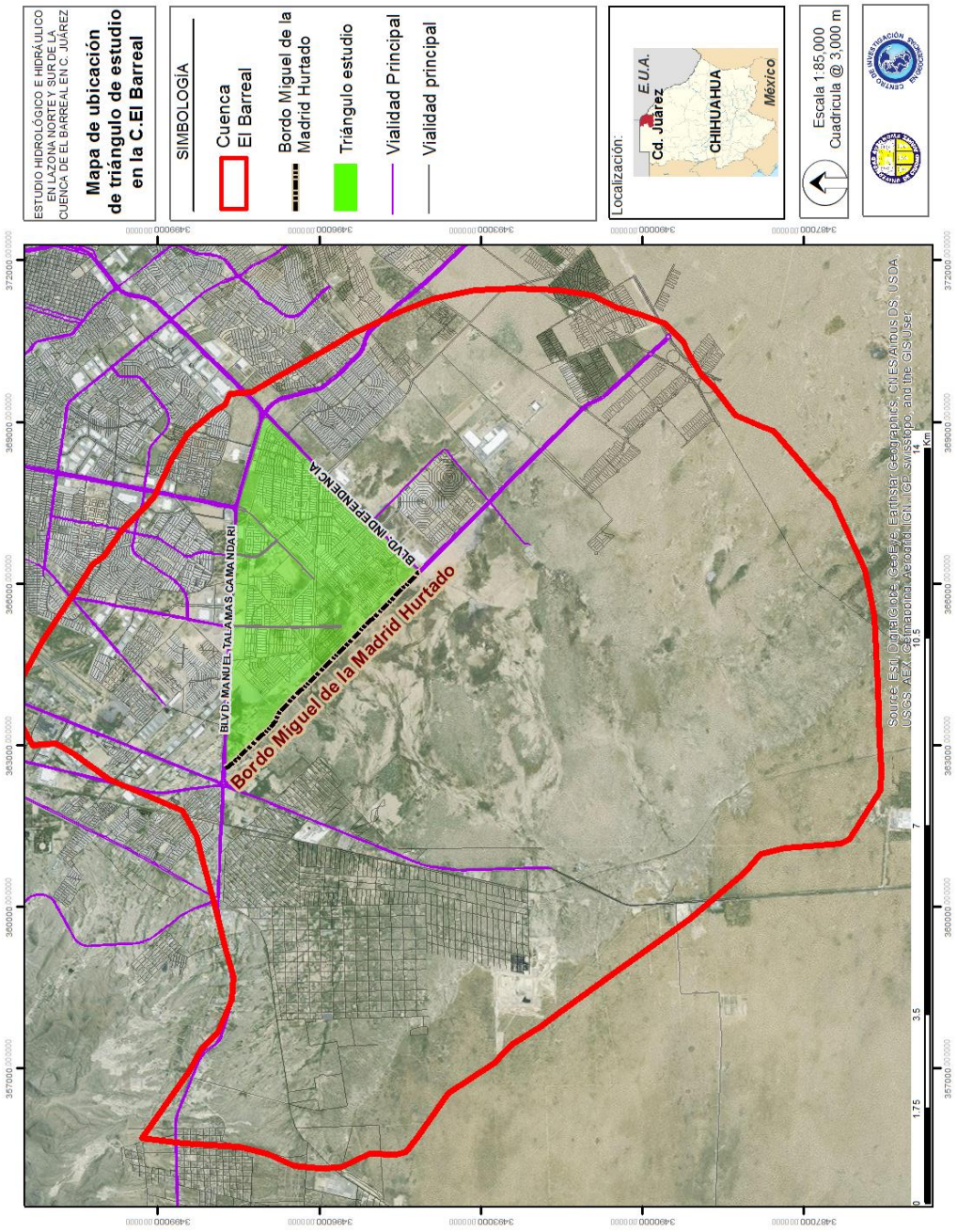


Figura V.1.4. Localización del Bordo Miguel de la Madrid Hurtado.

VI. METODOLOGÍA DE LA SELECCÓN DE POLIGONOS EXPUESTOS AL PELIGRO HIDROLÓGICO

Para determinar la localización de los desarrollos habitacionales o zonas a desarrollar a futuro localizadas en zonas consideradas como comprometidas hidrológicamente se aplicó un procedimiento metodológico conformado por una serie de pasos sistematizados que permitieron generar, no solo que desarrollos actualmente urbanizados a que predios a urbanizarse en un futuro, sino que acción de mitigación inmediata es requerida para asegurar la integridad de la propiedad de los habitantes en estas zonas.

La metodología aplicada consistió, primeramente, en utilizar como capa base el mapa de peligrosidad o severidad hidrológica correspondiente a la tormenta de diseño asociada con un evento hidrometeorológico de 100 años de periodo de retorno. Este resultado es consistente con la normatividad de diseño imperante en la zona del Barreal, donde se requirió a los desarrolladores urbanos la implementación de obra pluvial para manejo de eventos de lluvia asociadas con lluvias de 25 años con bordo a 100 años. Este mapa, consiste, por definición, en la zonificación del peligro hidrológico, en 5 categorías: muy bajo, bajo, medio y muy alto, determinados a partir de un nomograma que cuantifica el producto de la máxima velocidad multiplicado por el máximo tirante (Figura VI.1).

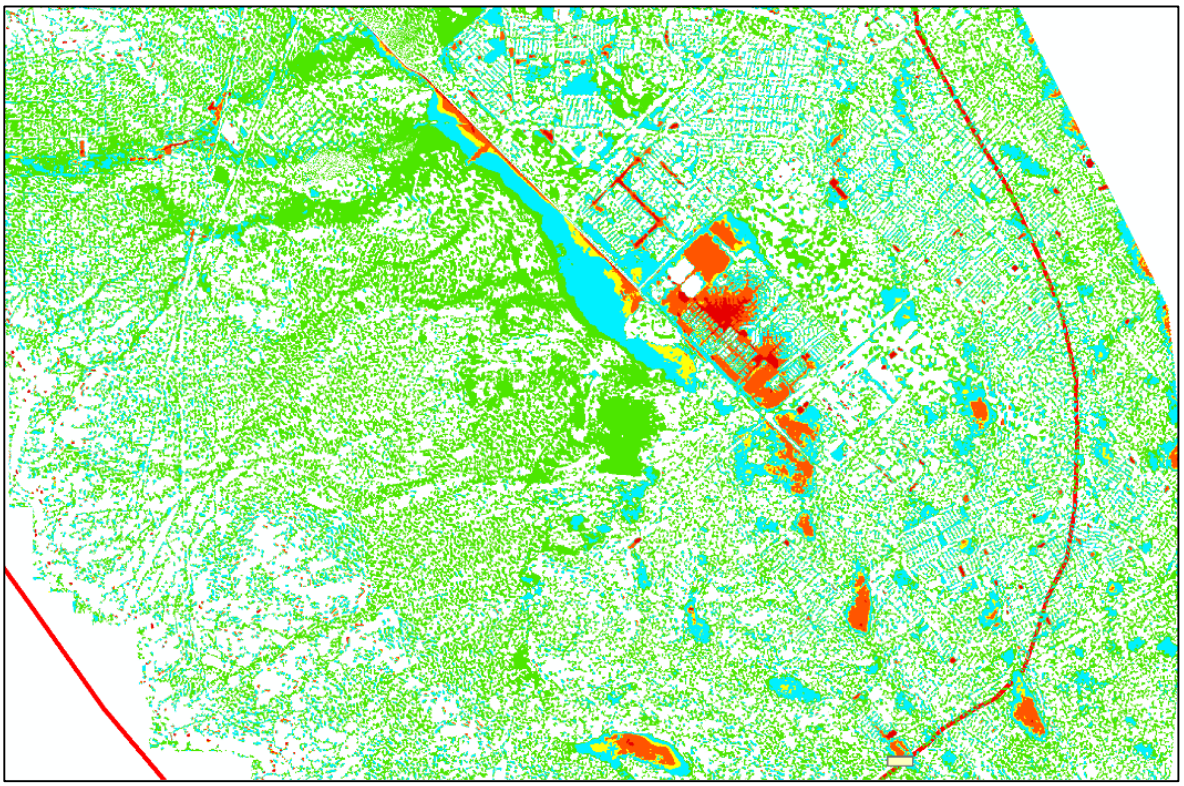


Figura VI.1. Mapa de peligrosidad hidrológica. Muy baja (verde), baja (azul); y ***2) Numero 1*** para severidad Media (amarillo), Alta (anaranjado) y Muy Alta (rojo).

Una vez generado este mapa de zonificación de la severidad hidrológica, se procedió a generar un raster, o mapa, binario, con dos categorías: ***1) Nulo*** para severidad Muy baja y baja; y ***2) Numero 1*** para severidad Media, Alta y Muy alta (Figura VI.2). Este mapa booleano o binario permitió ubicar geográficamente las zonas con peligro hidrológico medio, alto y muy alto en el terreno.

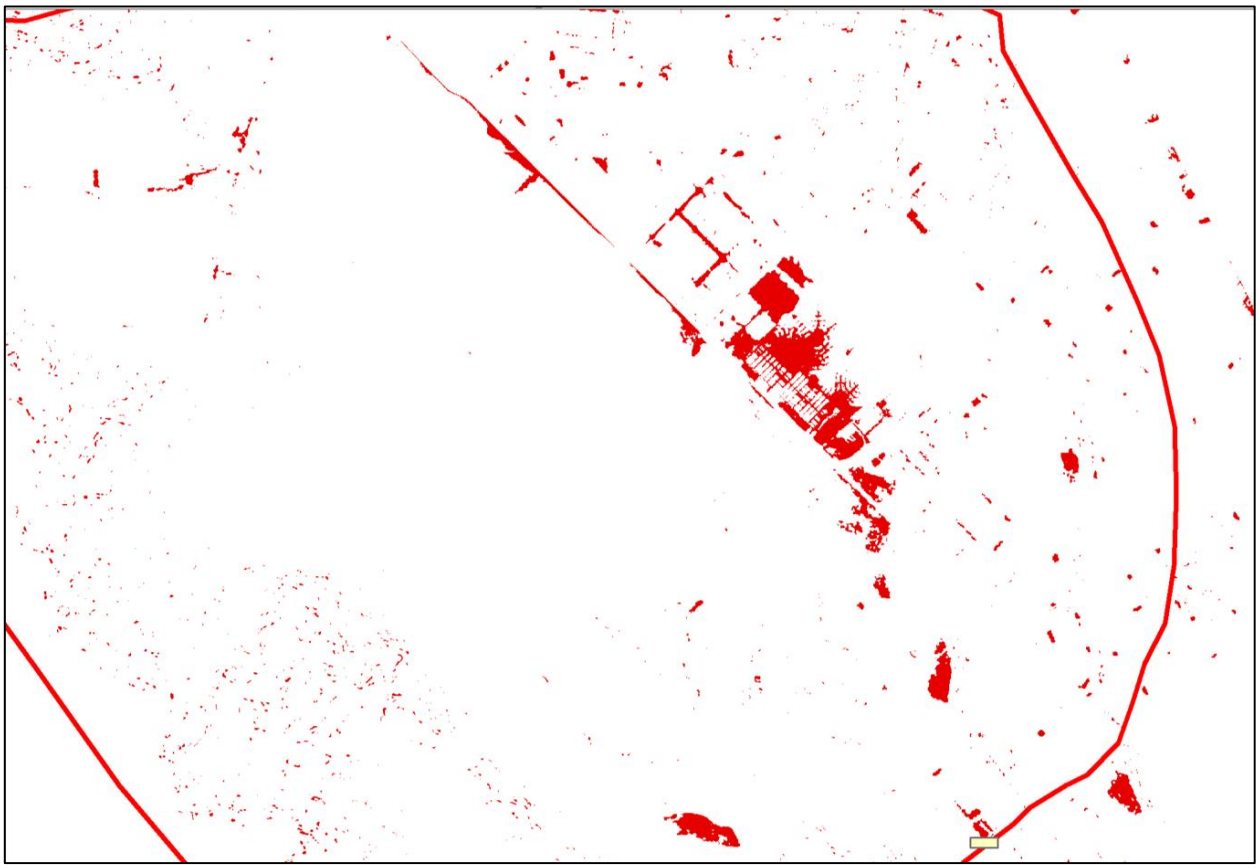


Figura VI.2. Mapa de peligrosidad hidrológica booleano o binario. En rojo se muestran las zonas con peligro o severidad hidrológica media, alta y muy alta.

Una vez definidos tanto el criterio de peligrosidad, se procedió a excluir de esta función de severidad, las zonas en las que están ubicados vasos o estructuras de almacenamiento o contención existentes (Figura VI.3), ya que, por definición, los vasos y estructuras de contención y almacenamiento, representan zonas de tirante hidráulico alto.

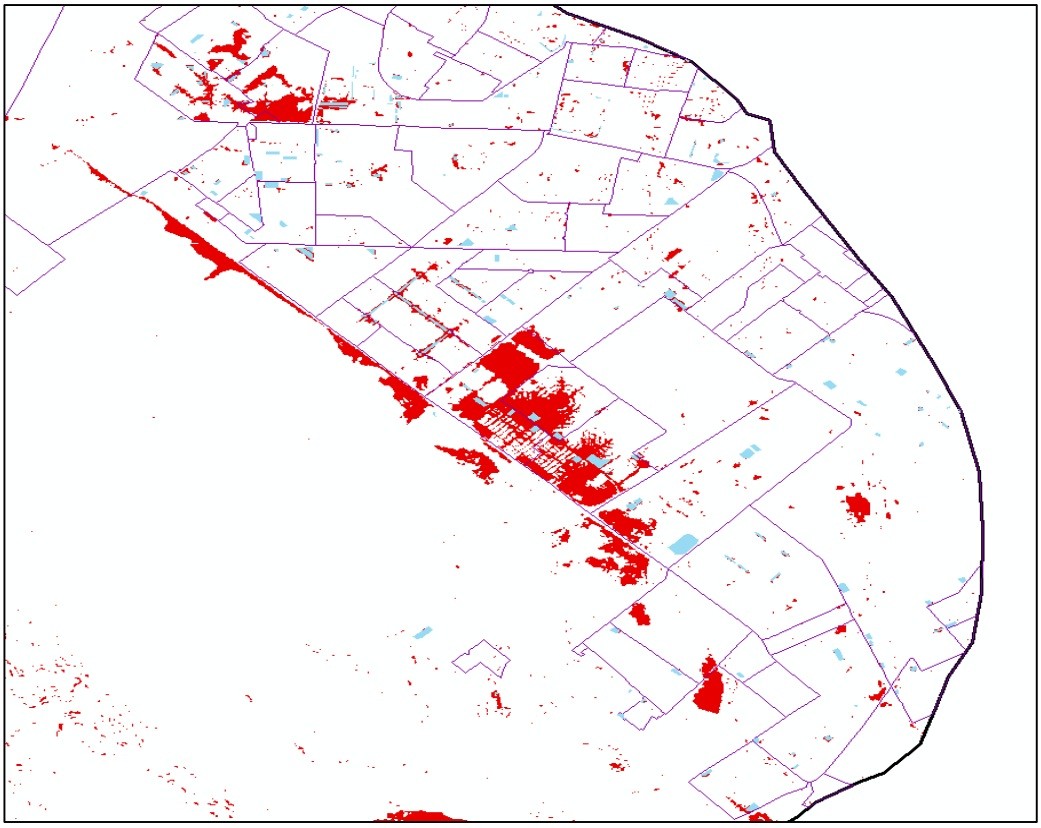


Figura VI.3. Mapa de peligrosidad hidrológica, medio, alto y muy alto con capa temática de vasos y diques superpuesta para excluir esas zonas del criterio de vulnerabilidad o exposición al peligro.

Para la identificación física de las poligonales ubicadas en zonas de peligro medio, altas o muy altas y no asociadas con diques o vasos, en cuanto a peligro hidrológico, se procedió a utilizar, conforme a las capas disponibles en el Registro Único de Vivienda, aquella o aquellas capas temáticas de carácter vectorial con una definición de polígonos más detallada. De esta forma, al utilizar unidades fundamentales a nivel casi de calle, manzana o desarrollo, se garantizó que la afectación, consistente en la parte de infraestructura expuesta al peligro (vulnerabilidad) estuviera tipificada a un nivel geoespacial muy específico y detallado. Para lograr lo anteriormente

descrito, se seleccionó, como capa temática principal, el archivo vectorial correspondiente al Plan Municipal de Desarrollo Urbano (PMDU), la cual contiene, casi a nivel de calle, los desarrollos habitacionales existentes o propuestos. Aun y cuando la mayoría de las zonas de peligrosidad media, alta y muy alta fueron intersectadas de manera apropiada por el PMDU, hubo algunas zonas sin propuestas específicas de desarrollo urbano, que por ende no están aún disponibles en esta capa temática, por lo que en estos casos específicos se utilizó la capa temática correspondiente a las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB´s) del INEGI.

Finalmente, se generó una geo-database de datos (GDB) consistente de un total de 83 polígonos en zona de peligro Medio, Alto y Muy alto (Figura VI.4).

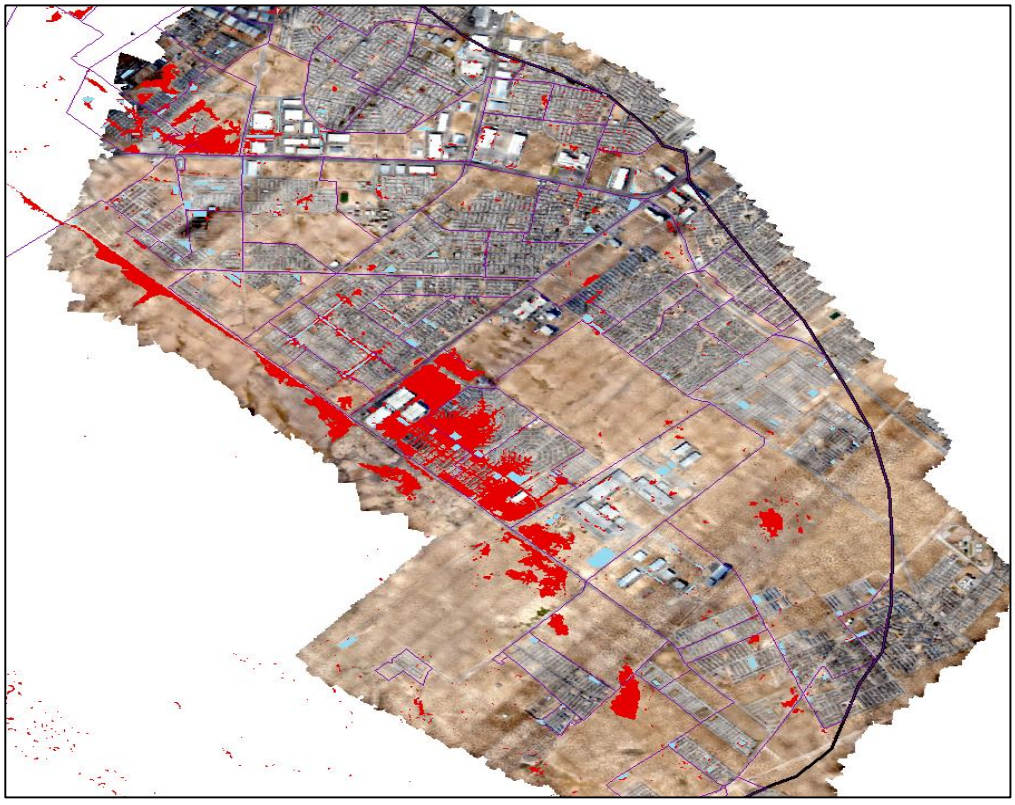


Figura VI.4. Mapa de peligrosidad hidrológica media, alta y muy alta (Polígonos rojos (excluyendo vasos y diques)) e intersectada con el PMU y AGEB´s para determinar polígonos en zona de vulnerabilidad o exposición al peligro.

La clave de asignación tanto de los polígonos del PMU y/o AGEB consistió en generar un campo etiquetado como ID_SEVERID donde, mediante operaciones de campo, se igualó este campo con el fiduciario o FID de la base de datos original. De esta manera se garantizó la consistencia con la base de datos original y la base de datos de afectados.

El resultado de la implementación de la metodología anteriormente descrita nos muestra, a nivel de calle, en la mayoría de los casos, que zonas de la parte urbanizada y no urbanizada, de la cuenca El Barreal están expuestas a niveles de peligrosidad media, alta o muy alta conforme a los criterios de Dorrigo. Este resultado, además, permite no solo ubicar tanto el peligro como su exposición al mismo a un grado geográfico muy específico, sino que, como consecuencia de este nivel de detalle (Figura VI.5), fue posible delinear las estrategias locales de mitigación a ser implementadas de manera inmediata para asistir en el proceso ejecutivo de la toma de decisión de asignación de créditos. Es decir, aquellos desarrollos localizados en zonas de exposición media, alta y muy alta al peligro hidrológico, deberán llevar a cabo acciones efectivas como redimensionamiento de obras de contención, construcción de nuevas obras de mitigación, manejo de rasantes o diseño de obras de llamada en base al dimensionamiento de los volúmenes calculados para la planicie de inundación correspondiente al periodo de retorno de 100 años en las zonas de intersección de severidad hidrológica media, alta o muy alta con las capas del PMDU y las AGEB´s.

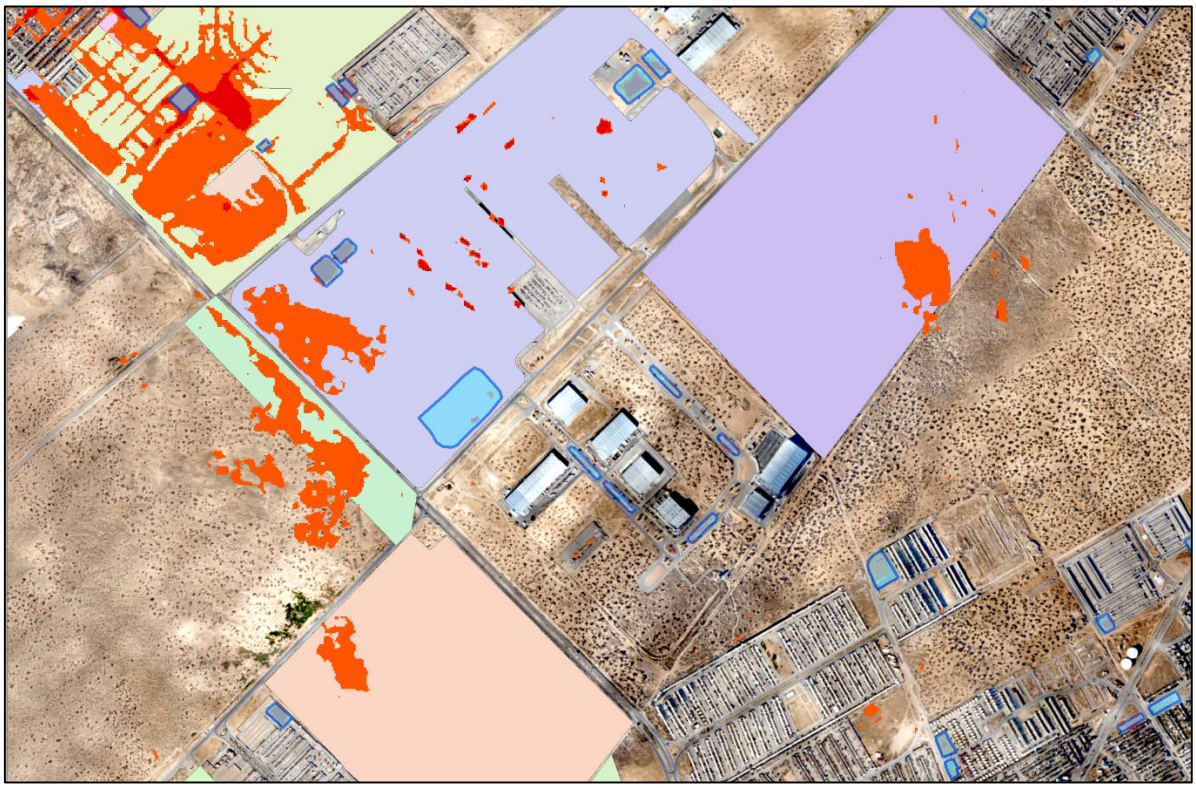


Figura VI.5. Determinación de obras de mitigación a nivel local.

VII. PROPUESTA DE NUEVAS OBRAS (ZONA NORTE Y ZONA DE TRIANGULO)

A. ZONA NORTE

SOLUCION LOCAL POLIGONO PMDU 4131

Este polígono se ubica en la subcuenca norte de la Cuenca Barreal (Figura VII.1), y está conformado por un predio con desarrollos industriales al sur.

Figura VII.1. Localización del polígono PMDU 4131.

Aun y cuando hay disponible una estructura de captación con 3 pozos de infiltración, la capacidad de la misma no es suficiente conforme al volumen acumulado de 15, 110 m^3 para un periodo de retorno de 100 años, por lo que el mapa de severidad hidrológica lo cataloga como de riesgo (Figura VII.2)

Figura VII.2. Polígono PMDU 4131 identificando la zona de riesgo en severidad hidrológica.

La solución para esta zona de inundación es incrementar el área de captación de los 1655 m^2 a por lo menos 5000 m^2 con una profundidad promedio de 3 m. De manera que el vaso de captación sea capaz de almacenar en su totalidad el volumen escurrido para un evento hidrometeorológico correspondiente a una tormenta de 100 años. La obra de llamada de este dique sí opera adecuadamente, pero la capacidad es insuficiente. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya mayor capacidad de almacenamiento y una obra de llamada de mayor capacidad de ingreso a la nueva estructura.**

SOLUCION LOCAL POLIGONOS PMDU 4137, 4138, 4139

Estos polígonos se ubican en la subcuenca norte de la Cuenca Barreal (Figura VII.3), y está conformados por desarrollos habitacionales plenamente urbanizados, cuyas calles presentan un bombeo hidráulico en dirección a 4 camellones deprimidos de 1.2 m de profundidad en promedio con estructuras de infiltración.

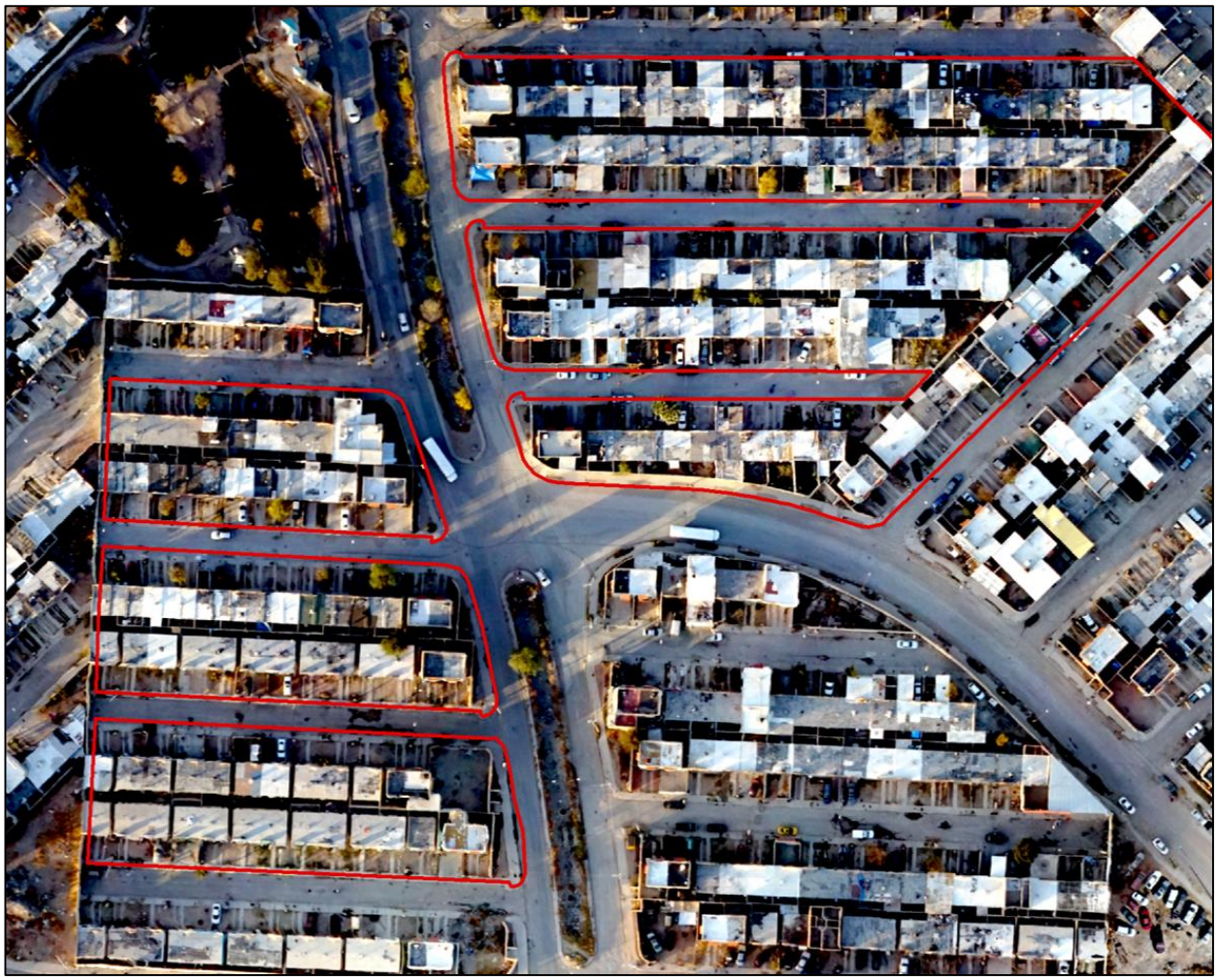


Figura VII.3. Localización de los polígonos PMDU 4137, 4138 y 4139.

La capacidad de captación combinada de los camellones deprimidos es de 2,102 m^2, la cual no es suficiente conforme al volumen acumulado de 21,138 m^3 para un periodo de retorno de 100 años, por lo que el mapa de severidad hidrológica lo cataloga como de riesgo medio, alto o muy alto (Figura VII4).

Figura VII.4. Polígonos PMDU 4137, 4138 y 4139 identificando la zona de riesgo en severidad hidrológica.

La solución para esta zona de inundación, dado que el área de los camellones es excesivamente insuficiente, consiste en hacer manejo de rasantes y conducir el volumen excedente de 19,000 m^3 al terreno baldío localizado al sur (Figura VII.5).

Este terreno, aun y cuando recibe un aporte importante de flujos de otra microcuenca, dispone de área suficiente para diseñar un vaso de captación menos de 2 m de profundidad en un área de13,392 m^2 disponibles. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya el manejo efectivo de rasantes, la capacidad de almacenamiento y una obra de llamada hidráulicamente efectiva para el ingreso de los volúmenes escurridos a la nueva estructura.**

Figura VII.5. Localización de terreno para captar el excedente de volumen.

SOLUCION LOCAL POLIGONO PMDU 17089

Este polígono se ubica en la subcuenca norte de la Cuenca Barreal (Figura VII.6), y está conformados por un terreno baldío sin ningún de desarrollo urbano.

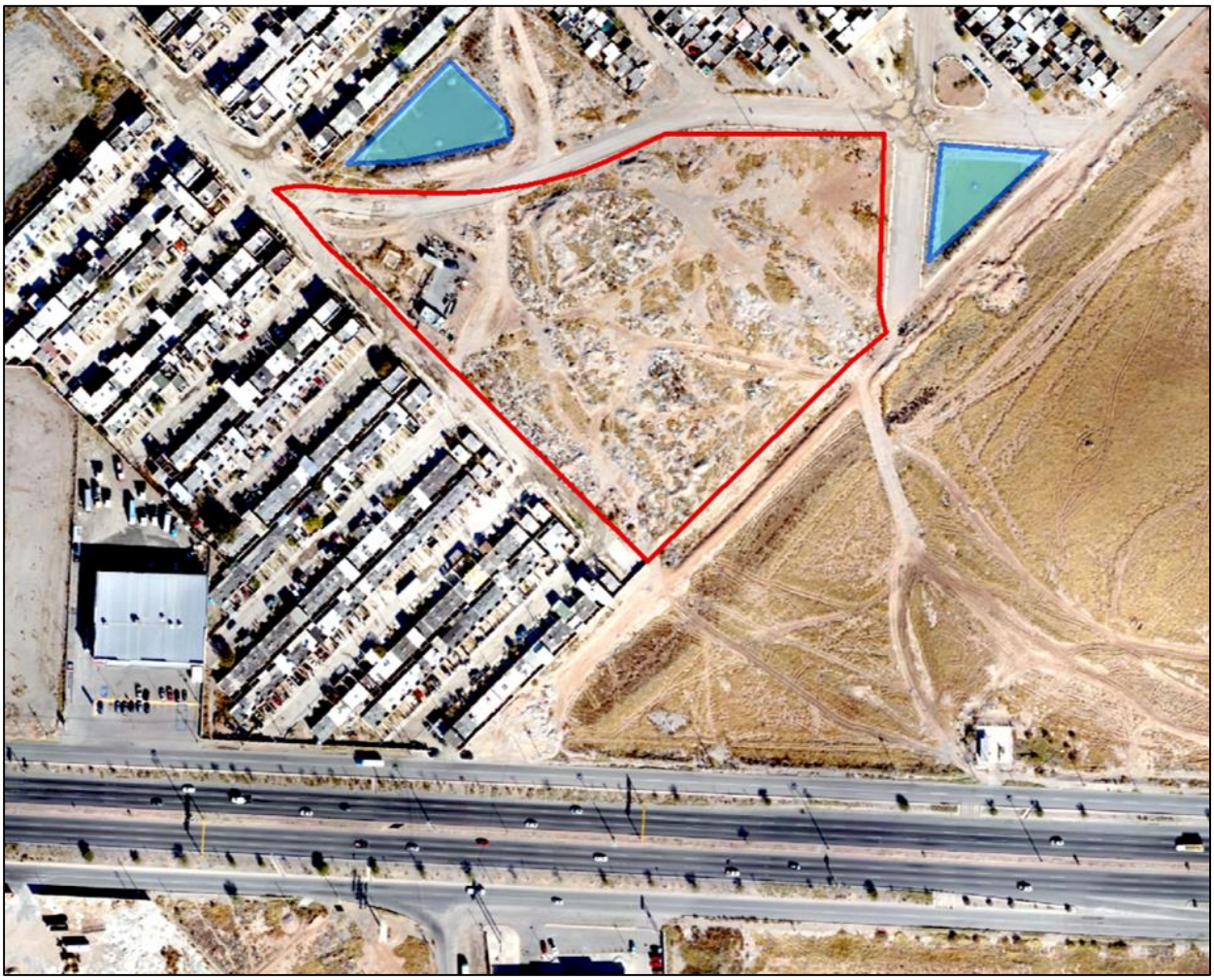


Figura VII.6. Localización de polígono PMDU 17089.

En este terreno confluyen los volúmenes escurridos de diferentes microcuencas aguas arriba (Figura VII.7). El volumen captado en esta zona es de 32,146 m^3 (considerando la inundación aguas arriba sobre la vialidad) con un área actualmente disponible de 18, 910 m^2.

Figura VII.7. Localización de microcuencas que confluyen a polígono PMDU 17089.

La solución para esta zona de inundación, consiste en hacer manejo de rasantes y conducir el volumen 32,146 m^3 dentro del terreno baldío circunscrito por esta poligonal (Figura VII.8). **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya tenencia de la tierra, el manejo efectivo de rasantes en la vialidad, suficiente capacidad de almacenamiento y una obra de llamada hidráulicamente efectiva para el ingreso de los volúmenes escurridos a la nueva estructura.**

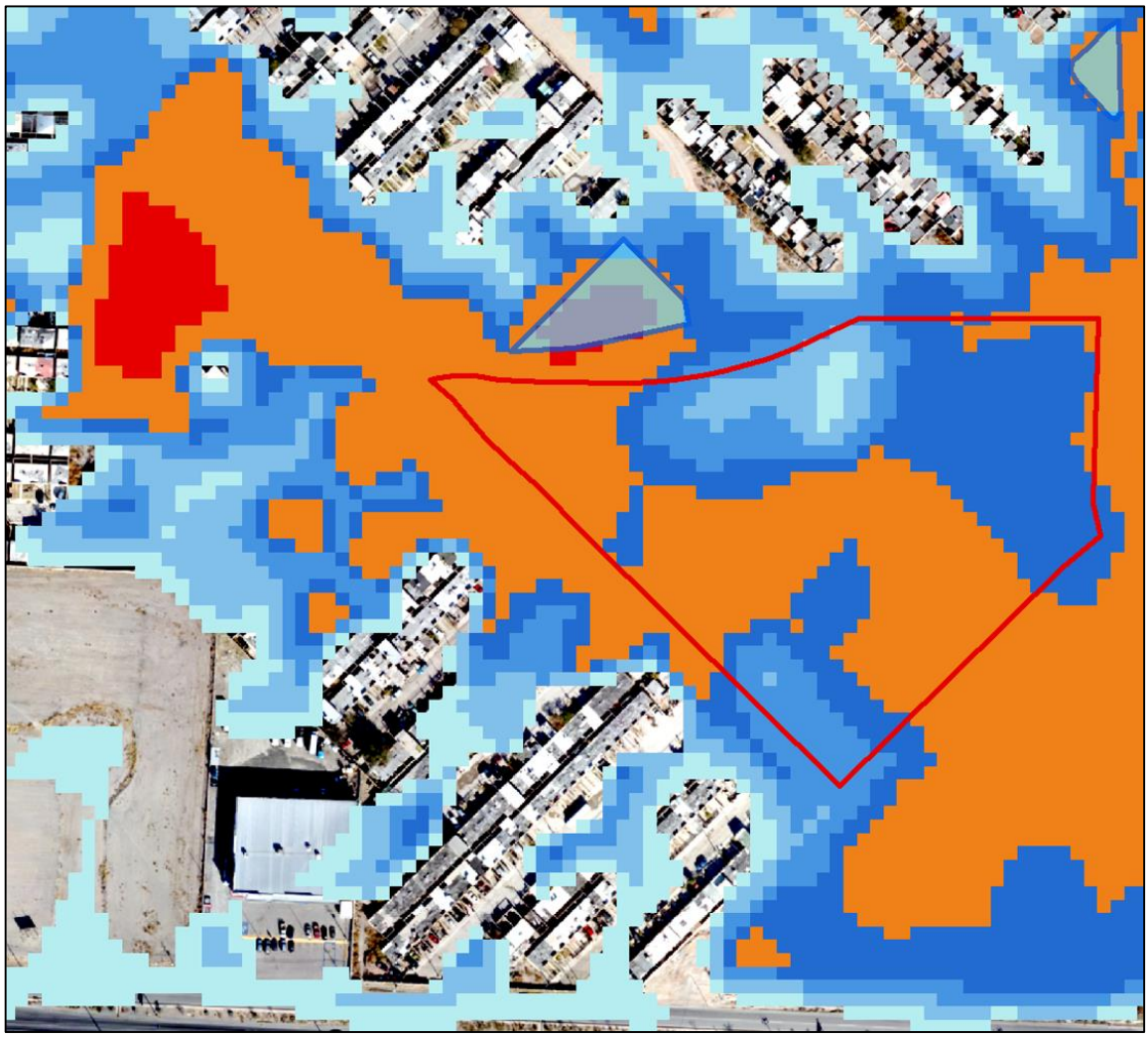


Figura VII.8. Polígono PMDU 17089 identificando la zona de riesgo en severidad hidrológica.

SOLUCION LOCAL POLIGONO AGEB 85

Este polígono se ubica en la subcuenca norte de la Cuenca Barreal (Figura VII.9), y está conformados por desarrollos urbanizaos y terrenos baldíos.

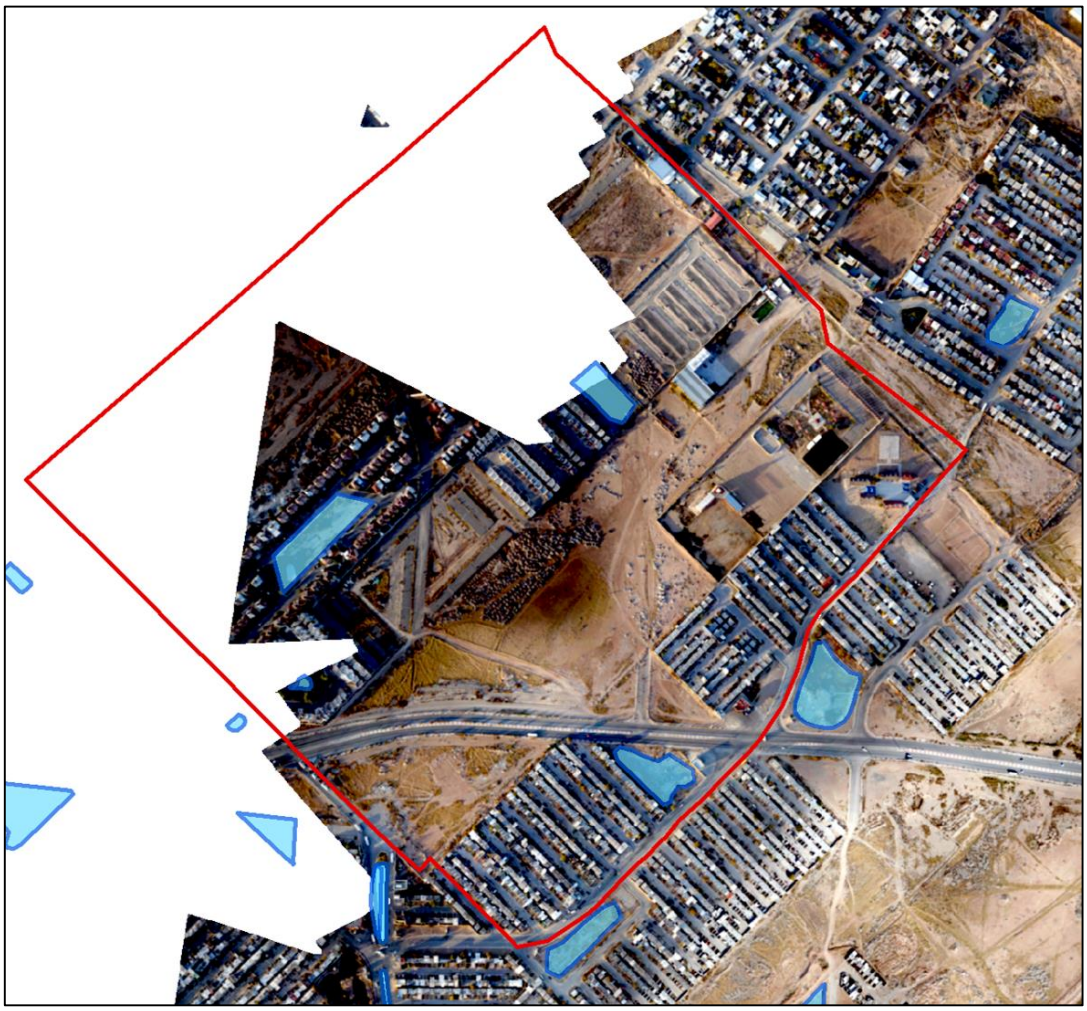


Figura VII.9. Localización de polígono de AGEB 85.

En este polígono confluyen los volúmenes escurridos de diferentes microcuencas aguas arriba (Figura VII.10). El volumen captado en esta zona es de 141,631 m3, registrando la mayor severidad hidrológica en zonas no urbanizadas actualmente.

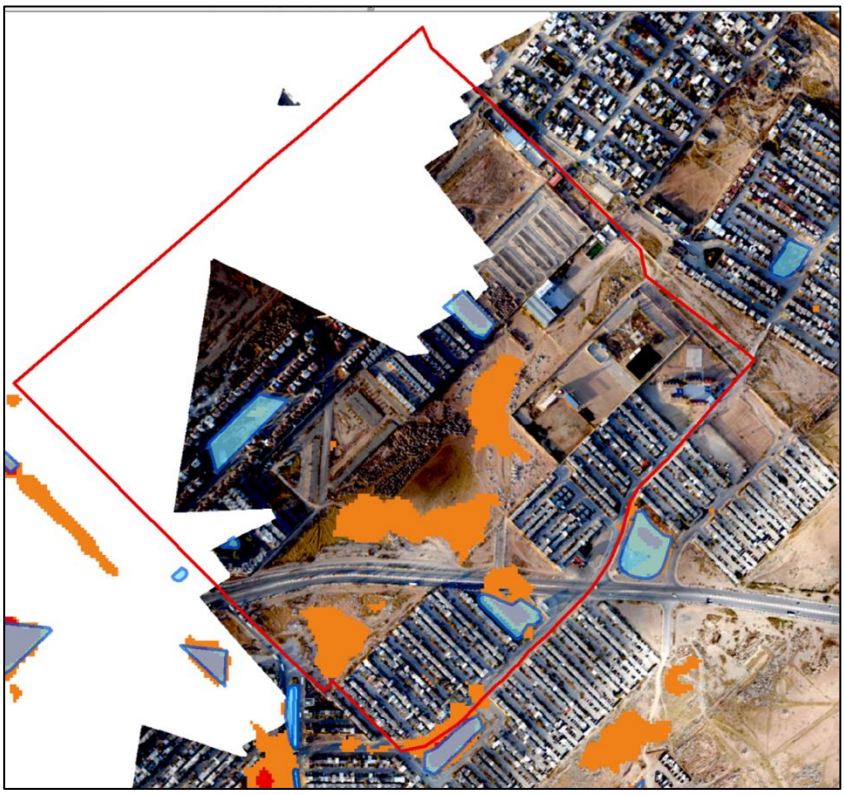


Figura VII.10. Localización de polígono AGEB 85 identificando la zona de riesgo en severidad hidrológica.

La solución para esta zona de inundación, consiste en requerir que el desarrollo de estos estos terrenos presenten un proyecto ejecutivo donde se presente un plan de manejo hidrológico conforme a los volúmenes calculados para la tormenta de 100 años. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya tenencia de la tierra, el manejo efectivo de rasantes en la vialidad, suficiente capacidad de almacenamiento y una obra de llamada hidráulicamente efectiva para el ingreso de los volúmenes escurridos a la nueva estructura.**

SOLUCION LOCAL POLIGONO AGEB 86

Este polígono se ubica en la subcuenca norte de la Cuenca Barreal (Figura VII.11), y está conformados por un terreno baldío sin ningún de desarrollo urbano en la parte este y sureste.

Figura VII.11. Localización de polígono de AGEB 86.

En este terreno confluyen los volúmenes escurridos de diferentes microcuencas aguas arriba (Figura VII.12). El volumen captado en esta zona es de 240,397 m^3, registrando la mayor severidad hidrológica en zonas no urbanizadas actualmente.

Figura VII.12. Localización de polígono AGEB 86 identificando la zona de riesgo en severidad hidrológica.

La solución para esta zona de inundación, consiste en requerir que el desarrollo de estos estos terrenos presenten un proyecto ejecutivo donde se presente un plan de manejo hidrológico conforme a los volúmenes calculados para la tormenta de 100 años. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya tenencia de la tierra, el manejo efectivo de rasantes en la vialidad, suficiente capacidad de almacenamiento y una obra de llamada hidráulicamente efectiva para el ingreso de los volúmenes escurridos a la nueva estructura.**

SOLUCION LOCAL POLIGONO PMDU 18166

Este polígono se ubica en la subcuenca norte de la Cuenca Barreal (Figura VII.13), y está conformado por desarrollos habitacionales en la parte oeste y un terreno baldío sin ningún de desarrollo urbano en la parte este.

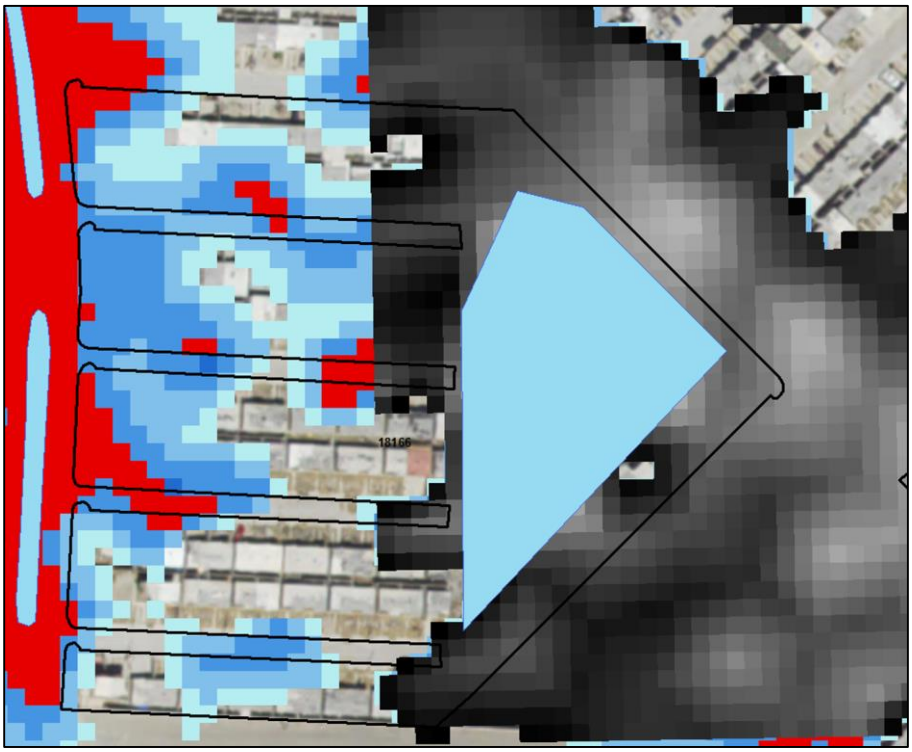


Figura VII.13. Localización de polígono de PMDU 18166.

En este terreno está localizado un vaso de captación, pero el volumen escurrido es de 13,663.0 m^3, que principalmente proviene de la parte este del predio registrando una severidad hidrológica a TR 100 años en la zona no urbanizada actualmente. Por esta razón, se requiere el adecuado manejo de rasantes en las calles. **Se requiere de la elaboración de un proyecto que incluya el manejo efectivo de rasantes en la vialidad, una obra de llamada hidráulicamente efectiva para el ingreso de los volúmenes escurridos a la estructura. ya que la obra hidráulica**

si cuenta con la suficiente capacidad de almacenamiento de aproximadamente 5,000 m^2.

SOLUCION LOCAL PMDU 7955

Este polígono se ubica en la subcuenca norte de la Cuenca Barreal y está conformados por un desarrollo urbano con la presencia de una estructura de captación con pozos de inyección sin ningún de desarrollo urbano.

El volumen de captación del vaso en condiciones actuales es de 1516 m^3, sin embargo, se requiere de al menos 6800 m^3 (Figura VII.14). Por lo que es necesario dar mantenimiento y deprimir el área de embalse de 1000 m^2 al menos otros 50 cm más para captar 2000 m^3 en la estructura ya existente. Se requiere además el manejo de rasantes para conducir los escurrimientos hacia el predio no urbanizado localizado al sur y diseñar una estructura de captación para los 4800 m^3 restantes.

Figura VII.14. Localización de polígono PMDU 7955 y vaso de captación actual.

La solución para esta zona de inundación, consiste en requerir que el desarrollo de estos estos terrenos presenten un proyecto ejecutivo donde se presente un plan de manejo hidrológico conforme a los volúmenes calculados para la tormenta de 100 años. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya tenencia de la tierra, el manejo efectivo de rasantes en la vialidad, suficiente capacidad de almacenamiento y una obra de llamada hidráulicamente efectiva para el ingreso de los volúmenes escurridos a la nueva estructura.**

SOLUCION LOCAL PMDU 2936

Este polígono se ubica en la subcuenca norte de la Cuenca Barreal y se refiere al polígono que circunde al Aeropuerto Internacional de Cd. Juárez.

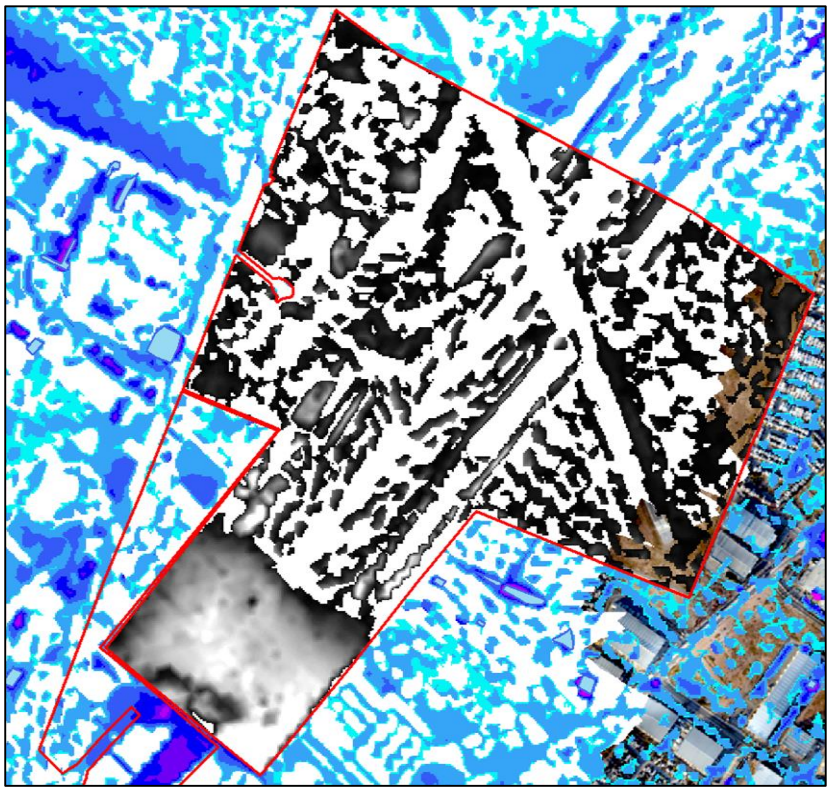


Figura VII.15. Localización de polígono PMDU 2936.

El volumen de captación de la microcuenca requiere de al menos 88,296 m^3 (Figura VII.15). Por lo que es necesario dar mantenimiento y deprimir el área de embalse de la mayor área de inundación correspondiente a un área de 167,000 m^2 a TR 100 años. Esto terreno deberá de manejar un proyecto ejecutivo donde se presente un plan de manejo hidrológico conforme a los volúmenes calculados para la tormenta de 100 años conforme a su protocolo de seguridad de aeropuerto.

SOLUCION LOCAL PMDU 18856

Este polígono se ubica en la subcuenca norte de la Cuenca Barreal y se refiere al polígono hacia el suroeste del Aeropuerto Internacional de Cd. Juárez. No cuenta con estructura de captación.

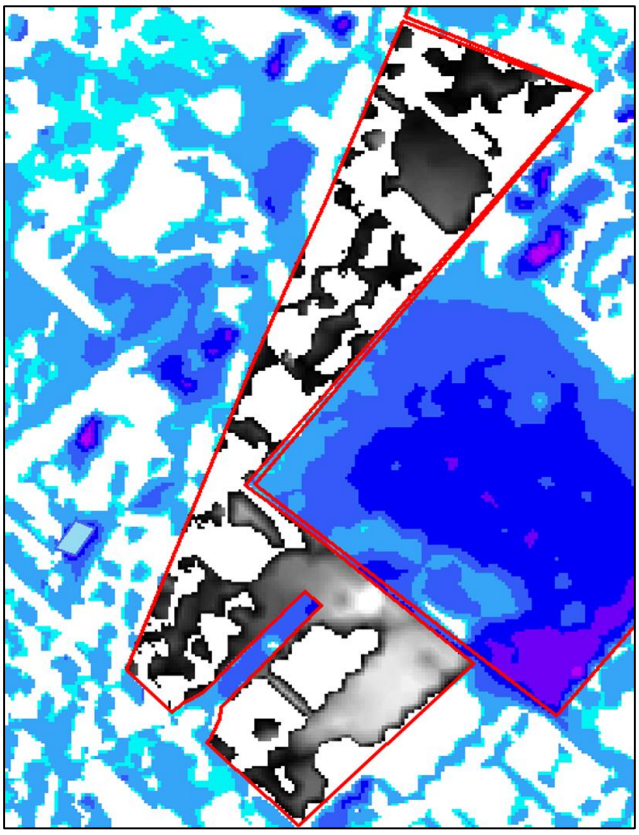


Figura VII.16. Localización de polígono PMDU 18856.

El volumen de captación de la microcuenca requiere de al menos 19,316 m^3 (Figura VII.16). La solución para esta zona de inundación, consiste en la construcción de un vaso de captación donde concentre la mayor mancha de inundación de aproximadamente un área de 24,080 m^2 a TR 100 años, con manejo de rasantes en las calles. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya el manejo efectivo de rasantes en la vialidad, suficiente capacidad de almacenamiento y una obra de llamada hidráulicamente efectiva para el ingreso de los volúmenes escurridos a la nueva estructura.**

SOLUCION LOCAL PMDU 18162

Este polígono se ubica en la subcuenca norte de la Cuenca Barreal y se refiere al polígono hacia el suroeste del polígono de AGEB 85.

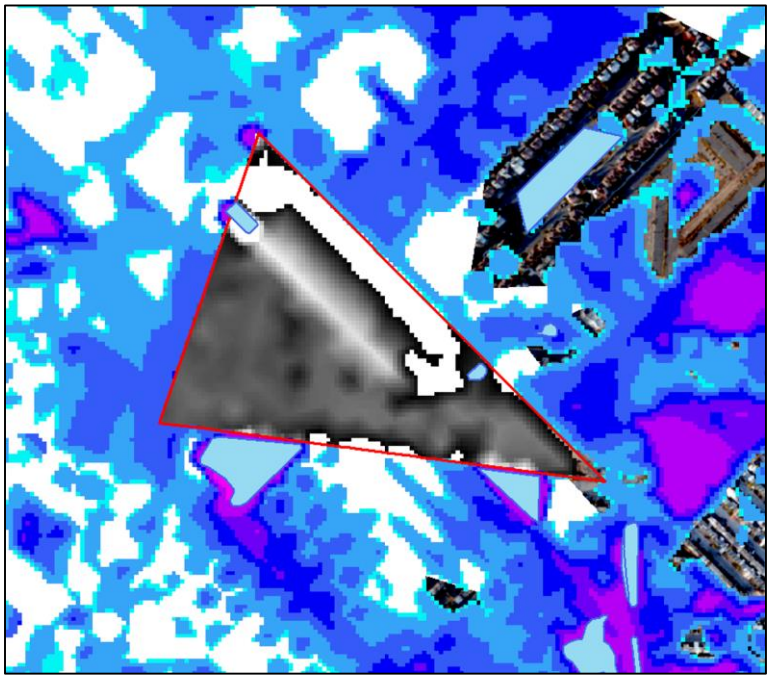


Figura VII.17. Localización de polígono PMDU 18162.

Este polígono tiene cuenta con un vaso de captación muy pequeño de 659 m^2 en comparación con el volumen que requiere captar de al menos 24,774 m^3 (Figura VII.17) para contener el volumen hidráulico correspondiente a un TR 100 años. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya el manejo efectivo de rasantes en la vialidad, suficiente capacidad de almacenamiento y una obra de llamada hidráulicamente efectiva para el ingreso de los volúmenes escurridos a la nueva estructura.**

SOLUCION LOCAL PMDU 2440

Este polígono se ubica en la subcuenca norte de la Cuenca Barreal y se refiere al polígono hacia el este del polígono de AGEB 86.

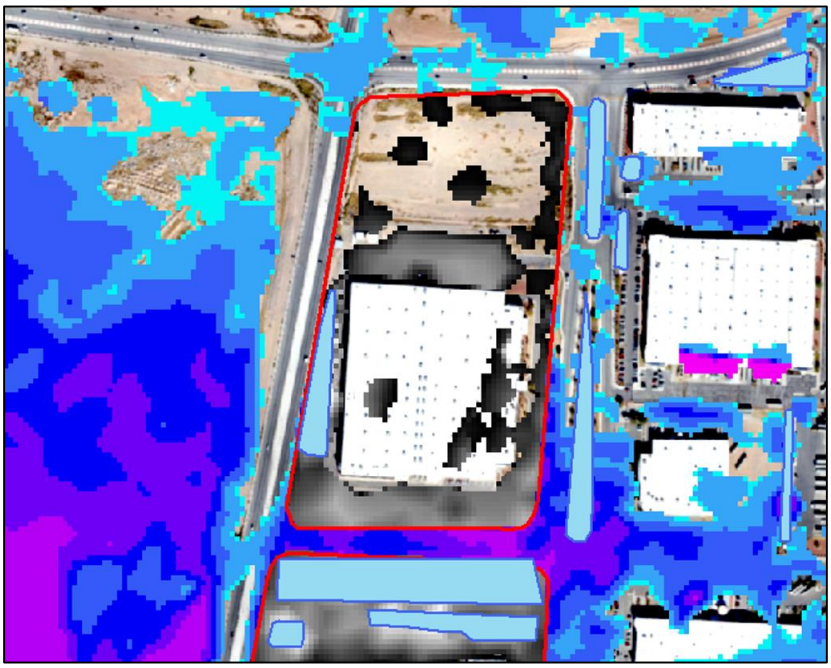


Figura VII.18. Localización de polígono PMDU 2440.

Este polígono cuenta con un vaso de captación en la parte oeste del polígono y debe de manejar un volumen aproximadamente 13,904 m^3 (Figura VII.18) para TR 100 años. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya el manejo efectivo de rasantes en la vialidad del oeste, suficiente capacidad de almacenamiento y una obra de llamada hidráulicamente efectiva para el ingreso de los volúmenes escurridos a la estructura.**

SOLUCION LOCAL PMDU 20380

Este polígono se ubica en la subcuenca norte de la Cuenca Barreal y se refiere al polígono hacia el sur del polígono de PMDU 2440.

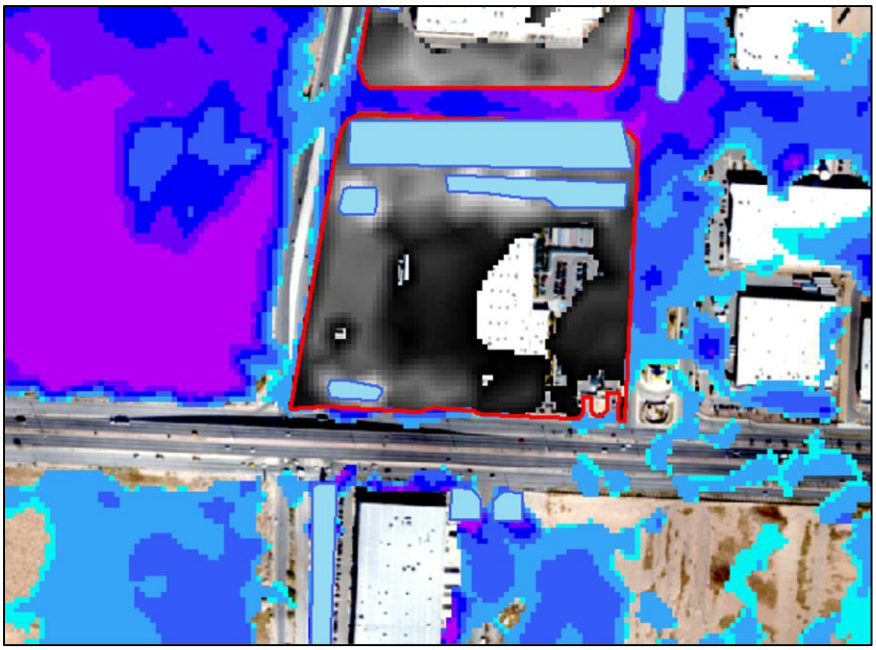


Figura VII.19. Localización de polígono PMDU 20380.

Este polígono, a pesar de que cuenta con 4 vasos de captación, presenta zonas de inundación las cuales debe de manejar un volumen de 41,566 m^3 aproximadamente (Figura VII.19) para TR 100 años. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya el manejo efectivo de rasantes en las vialidades interiores, suficiente capacidad de almacenamiento y una obra de llamada hidráulicamente efectiva para el ingreso de los volúmenes escurridos a la estructura.**

SOLUCION LOCAL PMDU 16936

Este polígono se ubica en la subcuenca norte de la Cuenca Barreal y se refiere al polígono hacia el noreste en colindancia con el parteaguas de El Barreal.

Figura VII.20. Localización de polígono PMDU 16936.

Este polígono no cuenta con vasos de captación, presenta una zona de inundación importante hacia el norte del predio y debe de manejar un volumen de 6,017 m^3 aproximadamente (Figura VII.20) para TR 100 años. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya el manejo efectivo de rasantes en las en el interior del predio, suficiente capacidad de almacenamiento y una obra de llamada hidráulicamente efectiva para el ingreso de los volúmenes escurridos a la nueva estructura proyectada.**

SOLUCION LOCAL PMDU 7929

Este polígono se ubica en la subcuenca norte de la Cuenca Barreal y se refiere al polígono hacia el sureste del polígono 16936.

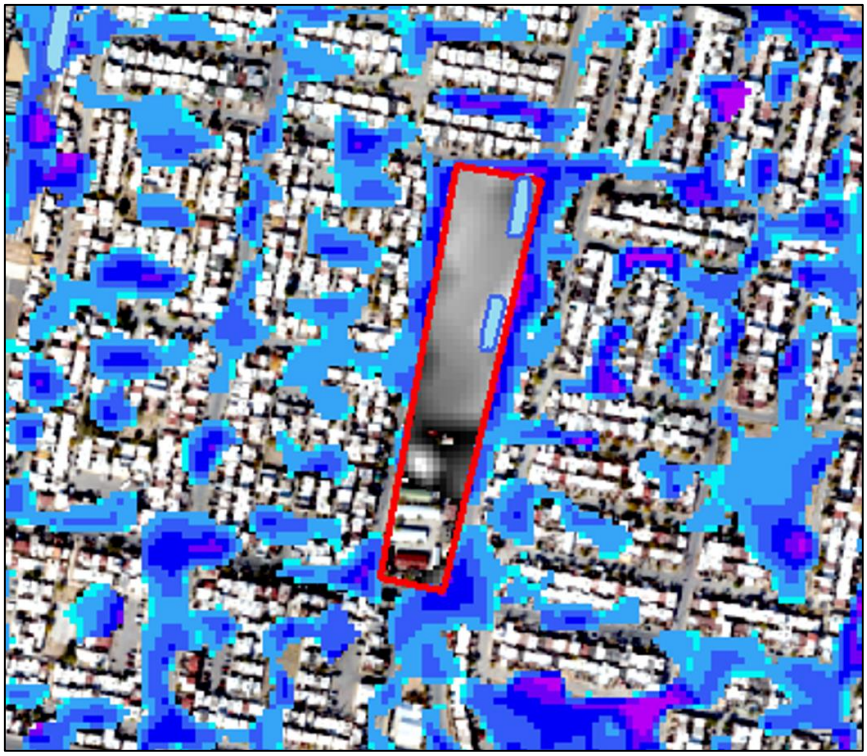


Figura VII.21. Localización de polígono PMDU 7929.

Este polígono cuenta con 2 vasos de captación, presenta una zona de inundación importante hacia el norte del predio y debe de manejar un volumen de 6,200 m^3 aproximadamente (Figura VII.21) para TR 100 años. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya el manejo efectivo de rasantes hacia los vasos, en especial el del norte, suficiente capacidad de almacenamiento y una obra de llamada hidráulicamente efectiva para el ingreso de los volúmenes escurridos a las estructuras.**

SOLUCION LOCAL PMDU 9515

Este polígono se ubica en la subcuenca norte de la Cuenca Barreal y se refiere al polígono hacia el sureste del polígono 7929.

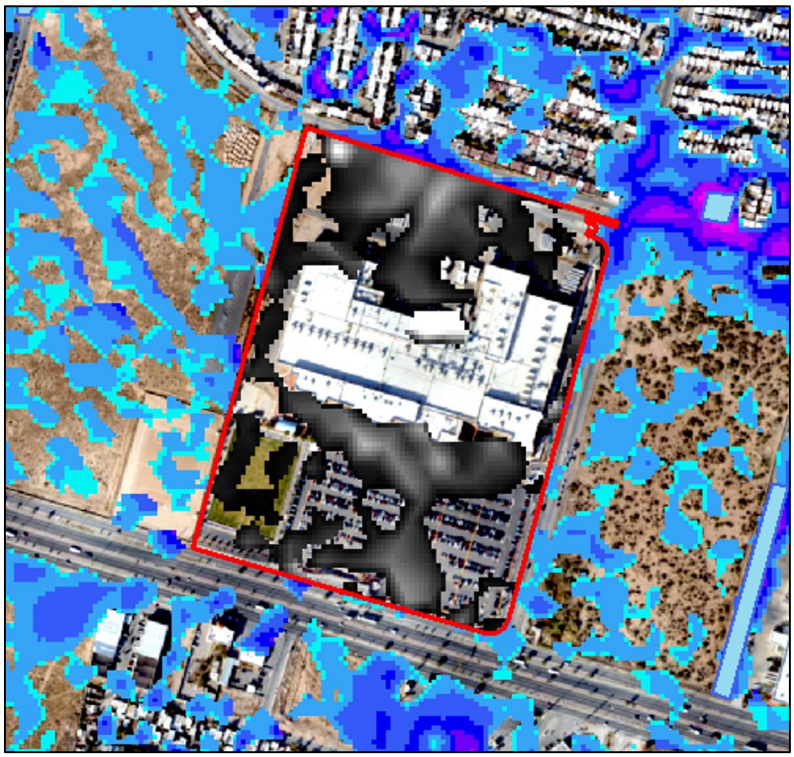


Figura VII.22. Localización de polígono PMDU 9515.

Este polígono no cuenta con vasos de captación, presenta una zona de inundación importante hacia el norte y centro del predio y debe de manejar un volumen de 17,388 m^3 aproximadamente (Figura VII.22) para TR 100 años. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya el manejo efectivo de rasantes hacia los vasos, en especial el del norte, suficiente capacidad de almacenamiento y una obra de llamada hidráulicamente efectiva para el ingreso de los volúmenes escurridos a la nueva estructura proyectada.**

B. ZONA TRIANGULO

SOLUCION LOCAL POLIGONOS PMDU 3259, 3332, 3333 y 3344

Estos polígonos se ubican en la subcuenca Triangulo de la Cuenca Barreal y se refiere al polígono hacia el sureste del polígono 20380. Este análisis conjunto está conformado por 4 polígonos con nivel de calle con identificador del Plan Municipal de Desarrollo Urbano (PMDU): 3259, 3332, 3333 y 3344 (Figura VII.23).

Estos polígonos no cuentan con vasos de captación en su interior, solo una obra hidráulica que debería de funcionar para dichos polígonos, sin embargo, esta obra queda insuficiente para la importante zona de inundación que se acumula en la parte central, la cual corresponde a un volumen de 21,570 m^3 aproximadamente (Figura VII.21) para TR 100 años. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya el manejo efectivo de rasantes hacia el vaso, suficiente capacidad de almacenamiento y una obra de llamada hidráulicamente efectiva para el ingreso de los volúmenes escurridos a la estructura.**

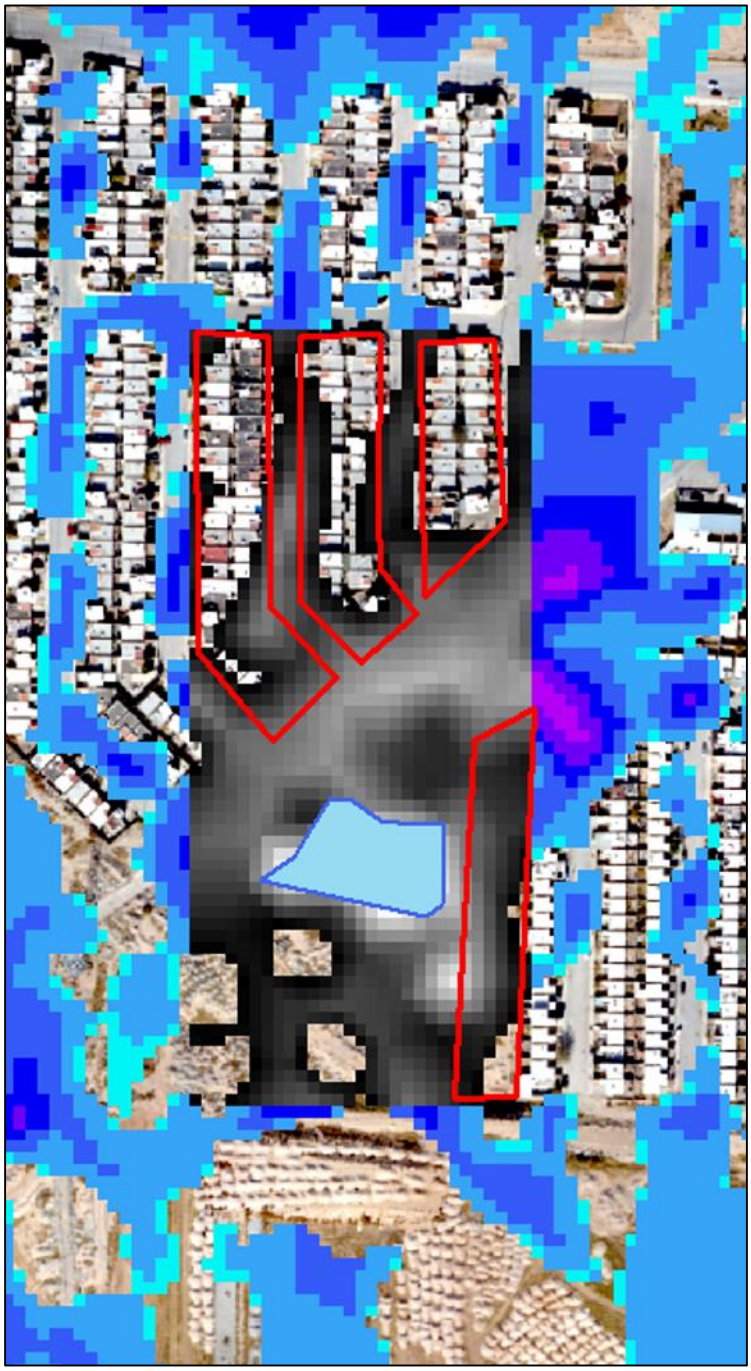


Figura VII.23. Localización de polígonos PMDU 3259, 3332, 3333 y 3344.

SOLUCION LOCAL PMDU 3645

Este polígono se ubica en la subcuenca Triangulo de la Cuenca Barreal y se refiere al polígono hacia el este de los polígonos 3259, 3332, 3333 y 3344.

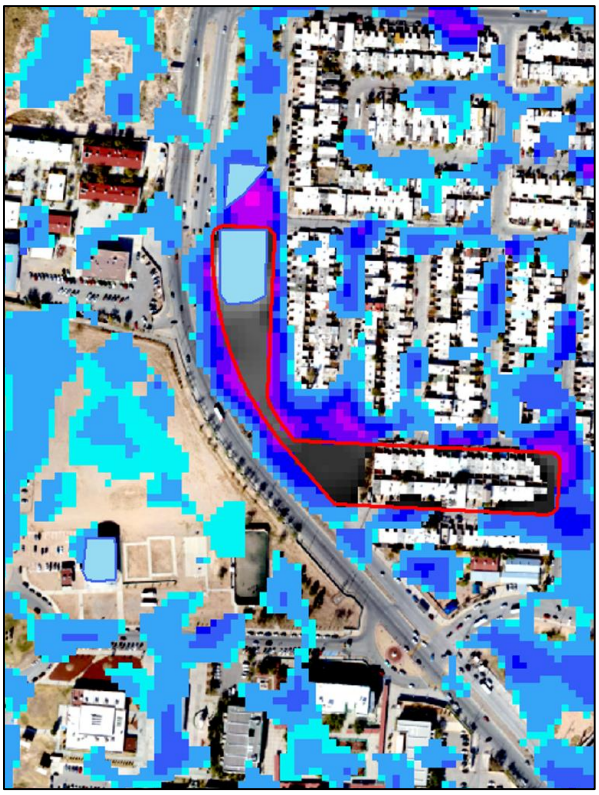


Figura VII.24. Localización de polígono PMDU 3645.

Este polígono cuenta con 1 vaso de captación, uno en el interior, y el otro muy cercano al polígono, sin embargo, presenta una zona de inundación importante hacia el norte y centro del predio y debe de manejar un volumen de 5,965 m^3 aproximadamente (Figura VII.24) para TR 100 años. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya el manejo efectivo de rasantes hacia los vasos, en especial hacia el norte, suficiente capacidad de almacenamiento y una obra de llamada hidráulicamente efectiva para el ingreso de los volúmenes escurridos a la estructura.**

VIII. PROPUESTA NUEVAS OBRAS (ZONA SUR Y AGUAS ARRIBA DEL BORDO MMH)

SOLUCION LOCAL POLIGONO 8489

Este polígono se ubica en la subcuenca Sur de la Cuenca El Barreal al sur del Blvd. Independencia (Figura VIII.1). Está conformado por tres predios con desarrollos industriales.

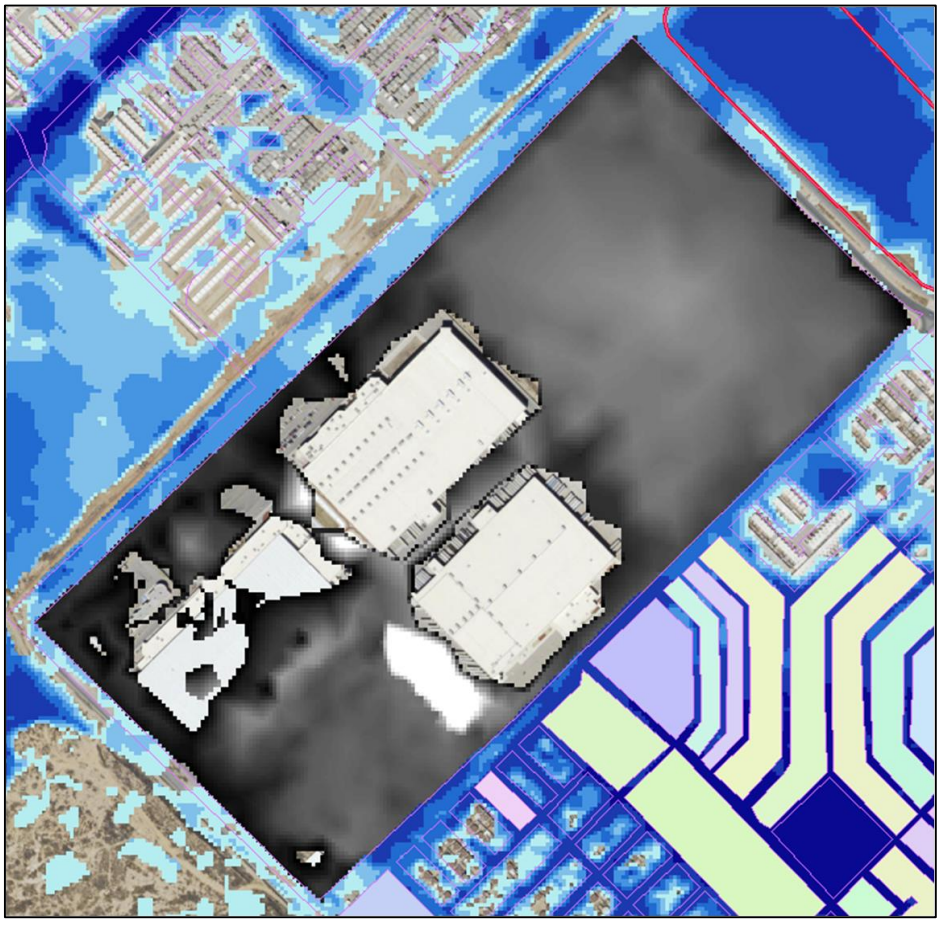


Figura VIII.1. Localización de polígono PMDU 7955.

Aun y cuando hay disponible con 4 pozos de infiltración, los cuales suman un área total de 11,545.5 m^2, la capacidad de la misma no es suficiente conforme al volumen acumulado del polígono de 369,757 m^3 para un periodo de retorno de 100 años, por lo que el mapa de severidad hidrológica lo cataloga como de riesgo medio, alto o muy alto.

La solución para esta zona de inundación es la continuación del Bordo Miguel de la Madrid Hurtado (BMMH), de esta manera el tirante de TR100 no brincará hacia el predio, sino que se mantendrá contenida antes del BMMH. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya la continuación del BMMH aproximadamente 1,100 m hacia el sureste sobre la Vialidad Miguel de la Madrid.**

SOLUCION LOCAL POLIGONO 8488

Este polígono se ubica en la subcuenca Sur de la Cuenca El Barreal al sur del Blvd. Independencia (Figura VIII.2).

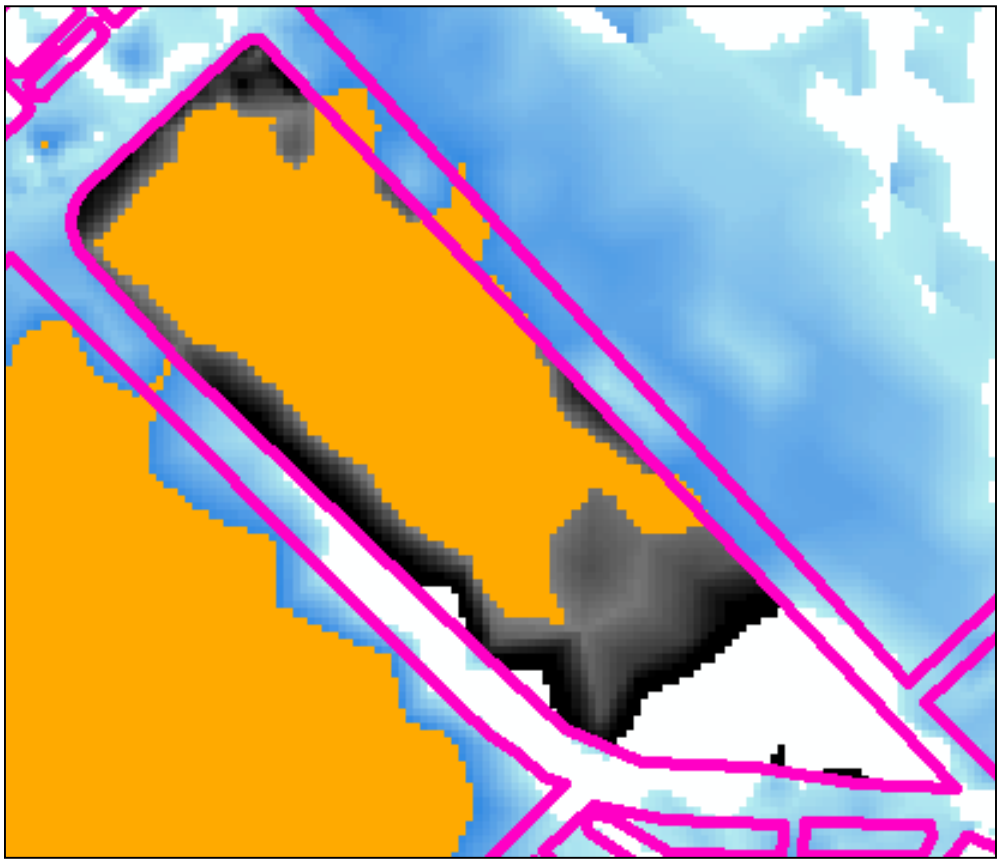


Figura VIII.2. Localización de polígono PMDU 8488.

A pesar de que solo la parte sureste del predio está desarrollada no cuenta con estructuras de control pluvial, por lo que es necesario plantear una solución a futuro para contener un volumen acumulado de 63,128 m^3 para un periodo de retorno de 100 años, por lo que el mapa de severidad hidrológica lo cataloga como riesgo medio, alto o muy alto. La solución para esta zona de inundación es la continuación del Bordo Miguel de la Madrid Hurtado (BMMH), de esta manera el tirante de TR100

no brincará hacia el predio oeste (8489), sino que se mantendrá contenida antes del BMMH.

SOLUCION LOCAL POLIGONO 21041

Este polígono se ubica en la subcuenca Sur de la Cuenca El Barreal al sur del Blvd. Independencia (Figura VIII.3).

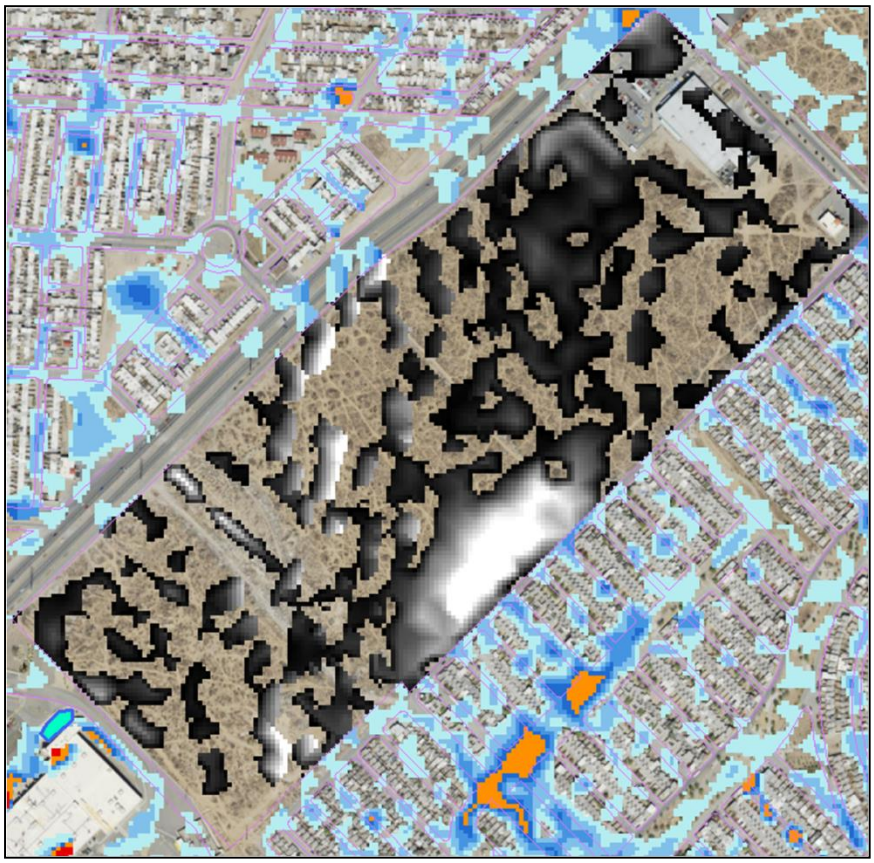


Figura VIII.3. Localización de polígono PMDU 21041.

A pesar de que solo la parte norte del predio está desarrollada no cuenta con estructuras de control pluvial, por lo que es necesario plantear una solución a futuro para contener un volumen acumulado de 22,598 m^3 para un periodo de retorno de 100 años, por lo que el mapa de severidad hidrológica lo cataloga como de riesgo medio, alto o muy alto. La solución para esta zona de inundación es la construcción a futuro de obras que regulen el área afectada de 11,160 $m^{2.}$

SOLUCION LOCAL POLIGONO AGEB 581

Este polígono se ubica hacia el este de la Vialidad Miguel de la Madrid y hacia el sur del polígono 8489 (PMDU). Está conformado por 24 polígonos con nivel de calle con identificador del Plan Municipal de Desarrollo Urbano (PMDU): 8467, 8460, 8468, 8462, 8463, 8464, 8458, 8465, 8473, 8475, 8461, 8457, 2908, 2886, 2887,2890, 18015, 18014, 19727, 2905, 2907, 2906, 2904, 7289 (Figura VIII.4).

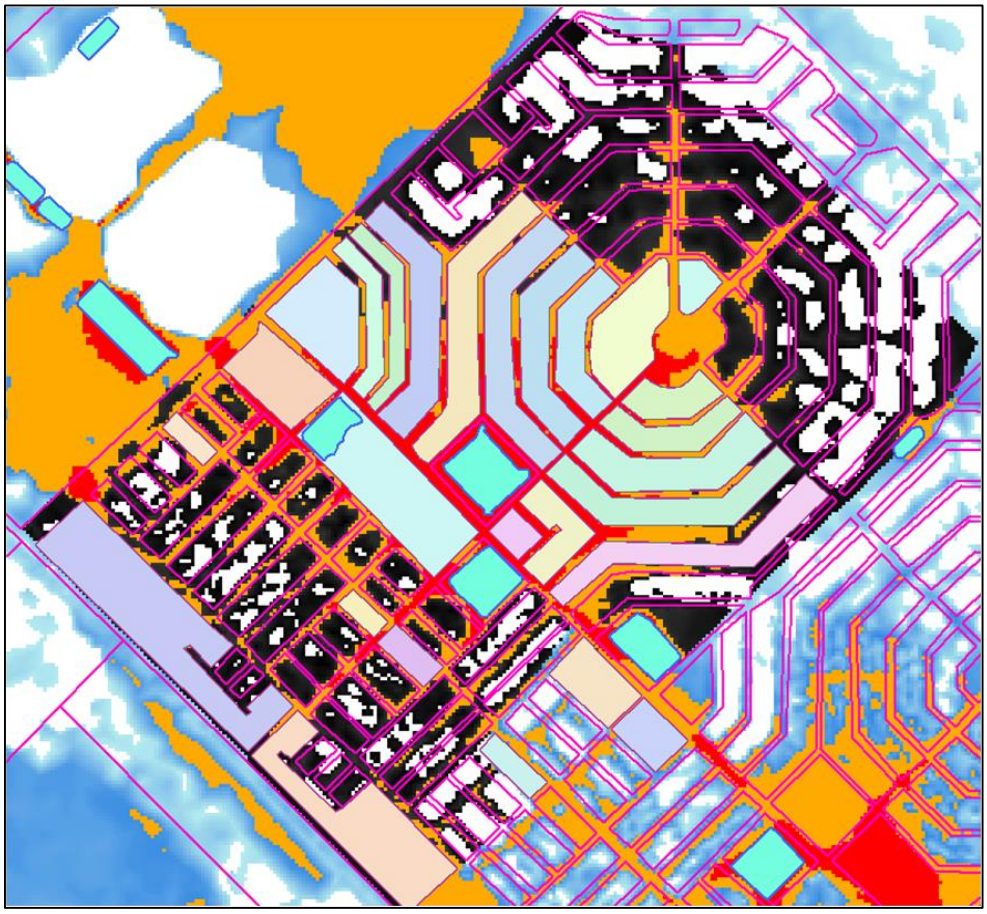


Figura VIII.4. Localización de polígono AGEB 581.

Aun y cuando hay disponible 4 pozos de infiltración, los cuales suman un área total de 42,990 m^2, la capacidad de la misma no es suficiente conforme al volumen acumulado del polígono de 732,905 m^3 para un periodo de retorno de 100 años, por lo que el mapa de severidad hidrológica lo cataloga como de riesgo medio, alto o muy alto (Figura VIII.5).

La solución para esta zona de inundación es la continuación del Bordo Miguel de la Madrid Hurtado (BMMH), de esta manera el tirante de TR100 no brincará hacia el predio, sino que se mantendrá contenida antes del BMMH. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya la continuación del BMMH**

aproximadamente 2,600 m hacia el sureste sobre la Vialidad Miguel de la Madrid.

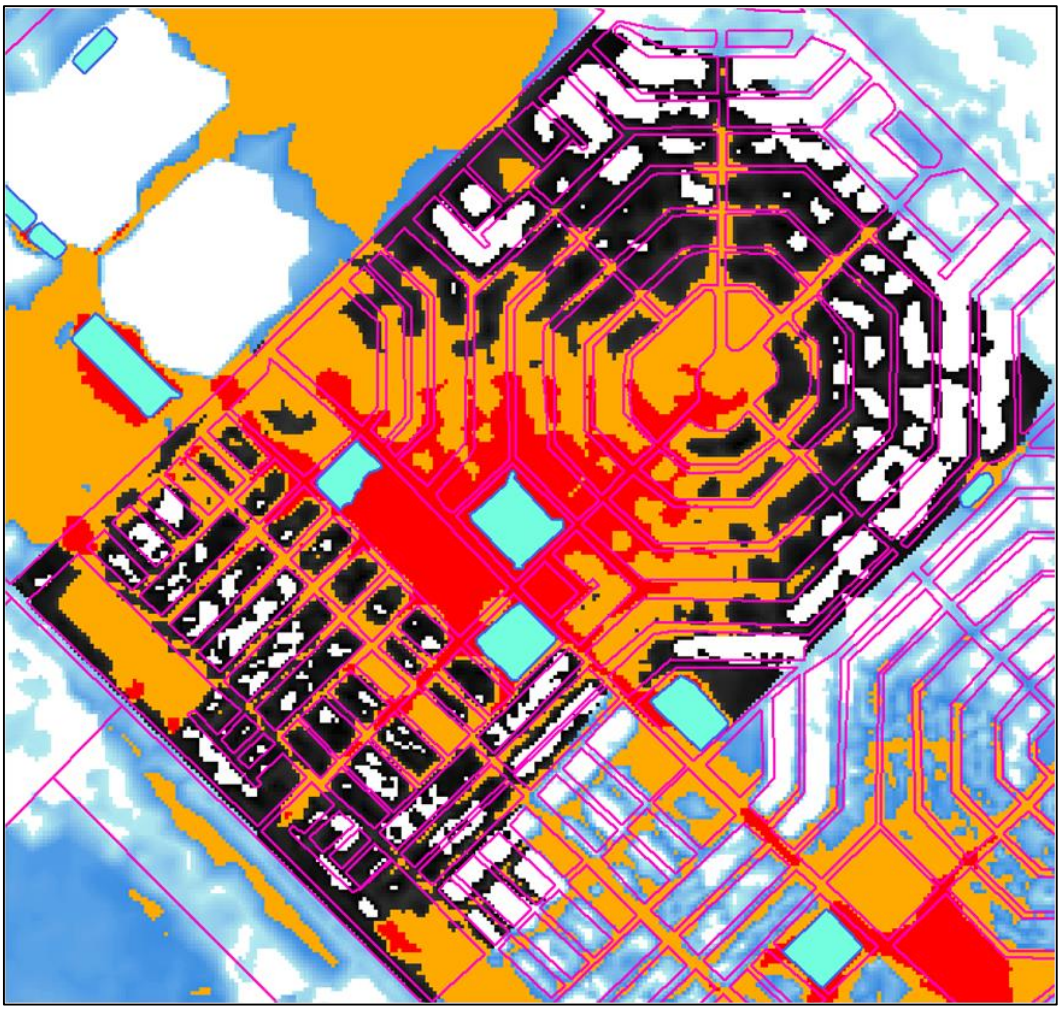


Figura VIII. 5. Localización de 4 vasos de captación (polígonos azules).

SOLUCION LOCAL POLIGONO AGEB 650

Este polígono se ubica en la subcuenca Sur de la Cuenca El Barreal al sur del Blvd. Independencia y al este de la Vialidad Miguel de la Madrid Hurtado. Está conformado por 11 polígonos con nivel de calle con identificador del Plan Municipal de Desarrollo Urbano (PMDU): 20323, 20324, 20321, 20109, 20337, 20116, 20096, 7294, 7295, 20103, 17087 (Figura VIII.6).

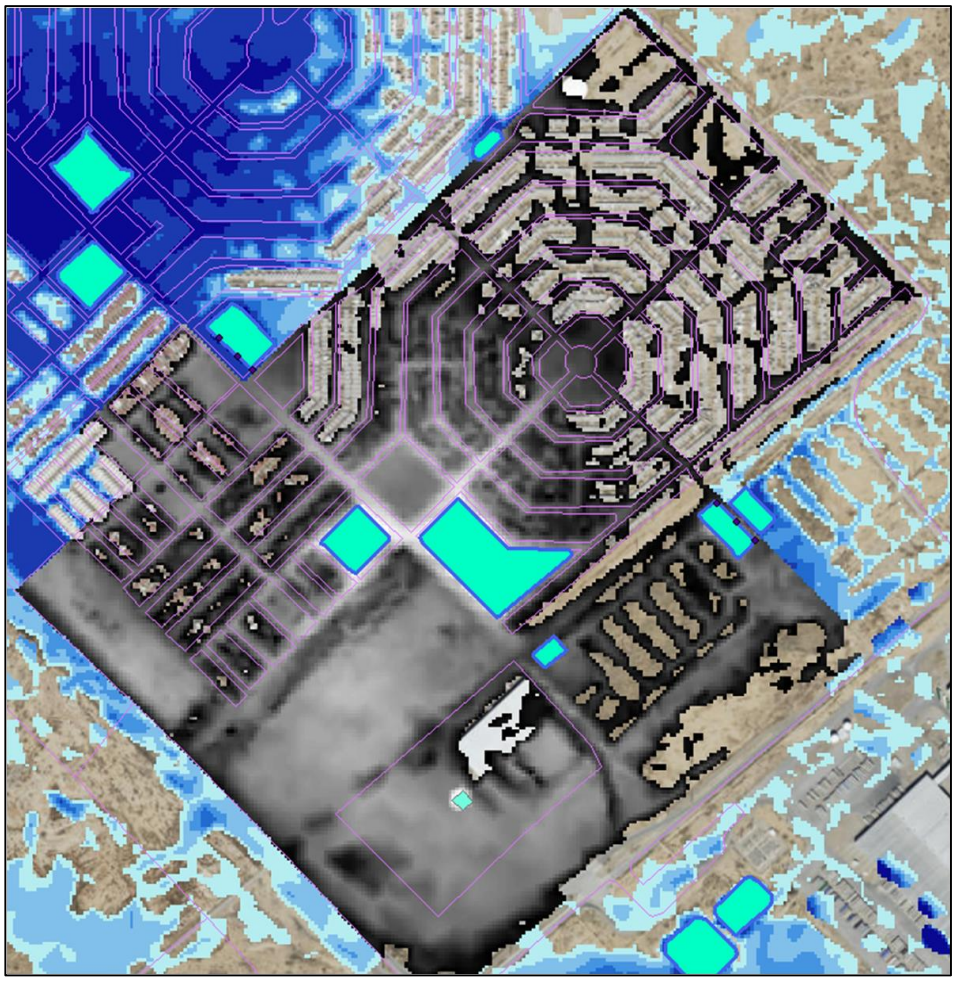


Figura VIII.6. Localización de polígono AGEB 650.

Aun y cuando existen 4 pozos de infiltración, los cuales suman un área total de 26,538 m^2, la capacidad de los diques es insuficientes para el volumen acumulado de 555,641.2 m^3 para un periodo de retorno de 100 años, por lo que el mapa de severidad hidrológica lo cataloga como de riesgo medio, alto o muy alto.

La solución para esta zona de inundación es la continuación del Bordo Miguel de la Madrid Hurtado (BMMH), de esta manera el tirante de TR100 no brincará hacia el predio, sino que se mantendrá contenida antes del BMMH. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya la continuación del BMMH aproximadamente 4,200 m hacia el sureste sobre la Vialidad Miguel de la Madrid.**

SOLUCION LOCAL POLIGONO 20476

Este polígono se ubica en la subcuenca Sur de la Cuenca El Barreal al sur del Blvd. Independencia y al este de la Vialidad Miguel de la Madrid Hurtado (Figura VIII.7).

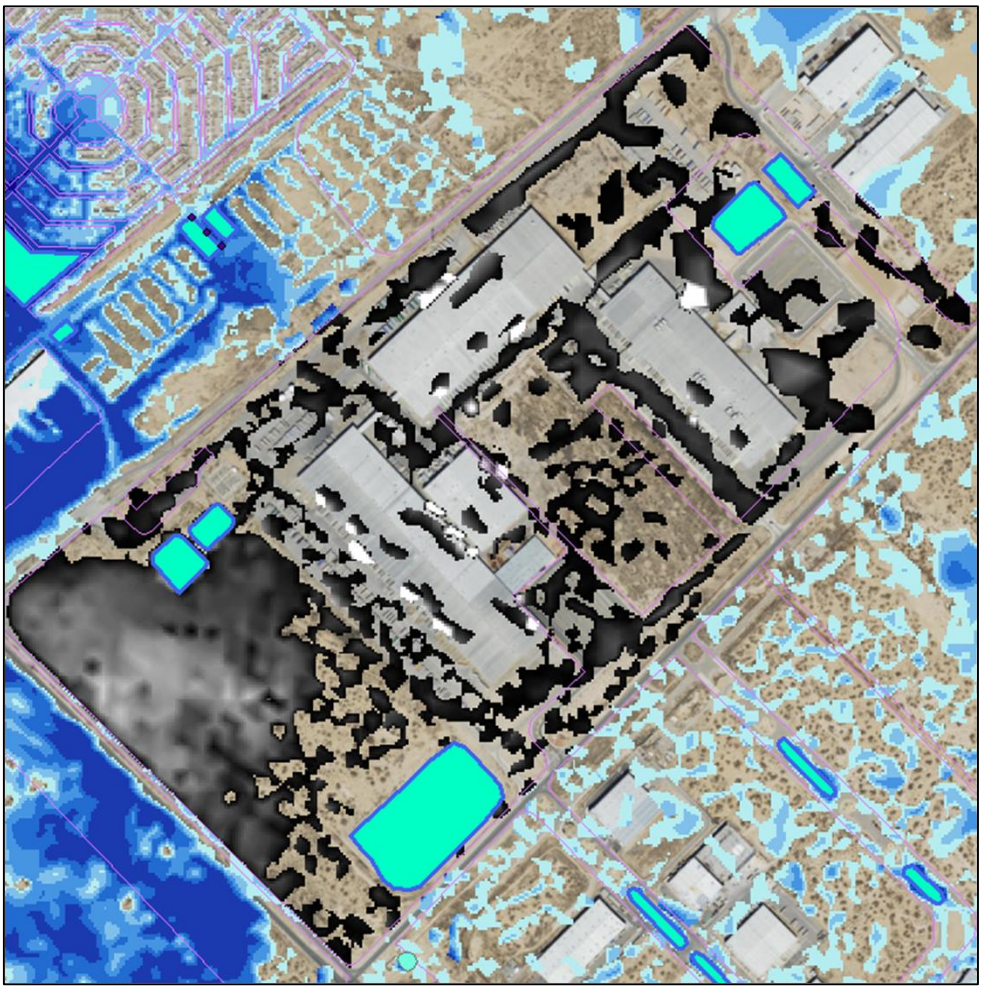


Figura VIII.7. Localización de polígono PMDU 20476.

Aun y cuando hay disponible 4 pozos de infiltración, los cuales suman un área total de 55,240 m^2, la capacidad de los diques es insuficiente para el volumen acumulado de 250, 873 m^3 para un periodo de retorno de 100 años, por lo que el mapa de severidad hidrológica lo cataloga como de riesgo medio, alto o muy alto. La solución para esta zona de inundación es la proyección a futuro de vasos o diques que contengan el tirante de TR100, ya que la parte suroeste del polígono, contigua a la Vialidad Miguel de la Madrid, no tiene desarrollos aun, y el área afectada por el mapa de severidad reclama un área de 69, 003 m^2, los cuales están disponibles.

SOLUCION LOCAL POLIGONO 17441

Este polígono se ubica en la subcuenca Sur de la Cuenca El Barreal al oeste de la calle Mar de Plata (FiguraVIII.8).

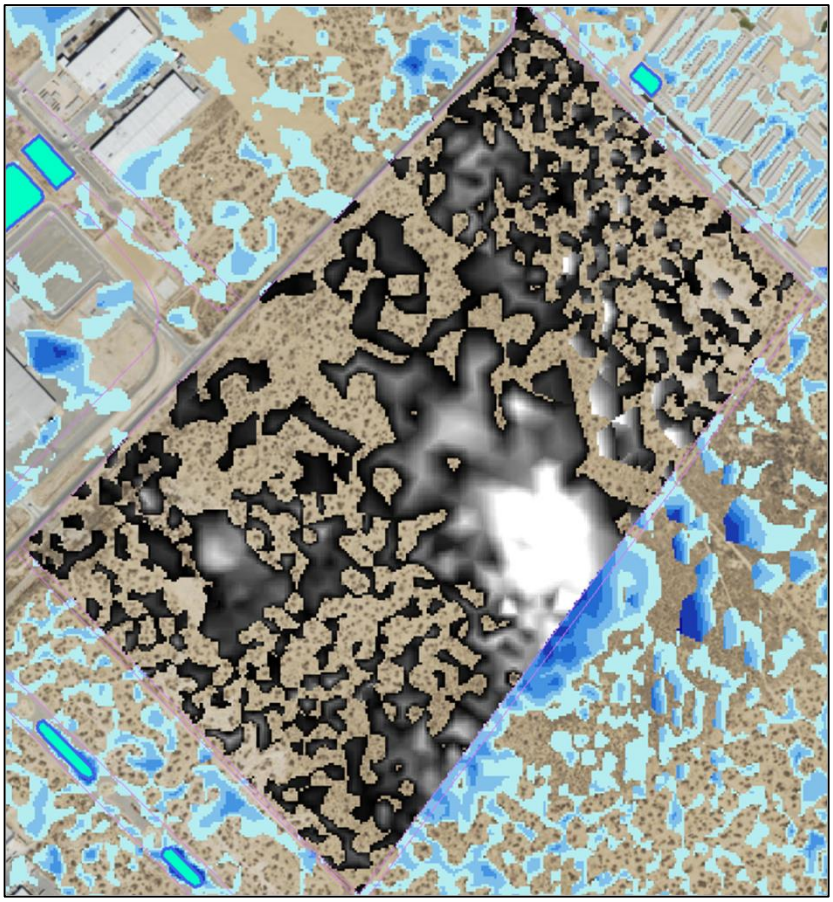


Figura VIII.8. Localización de polígono PMDU 17441.

La solución para esta zona de inundación es que, cuando se comiencen a construir los primeros desarrollos, se proyecten vasos o diques que contengan el tirante de TR100, el cual reclama un volumen de 104, 376 m^3, mientras que el área afectada por la severidad hidrológica con clasificación media, alta o muy alta, es de 41, 716 m^2.

SOLUCION LOCAL POLIGONO 148

Este polígono se ubica en la subcuenca Surponiente de la Cuenca El Barreal al oeste de la Vialidad Miguel de la Madrid Hurtado (Figura VIII.9).

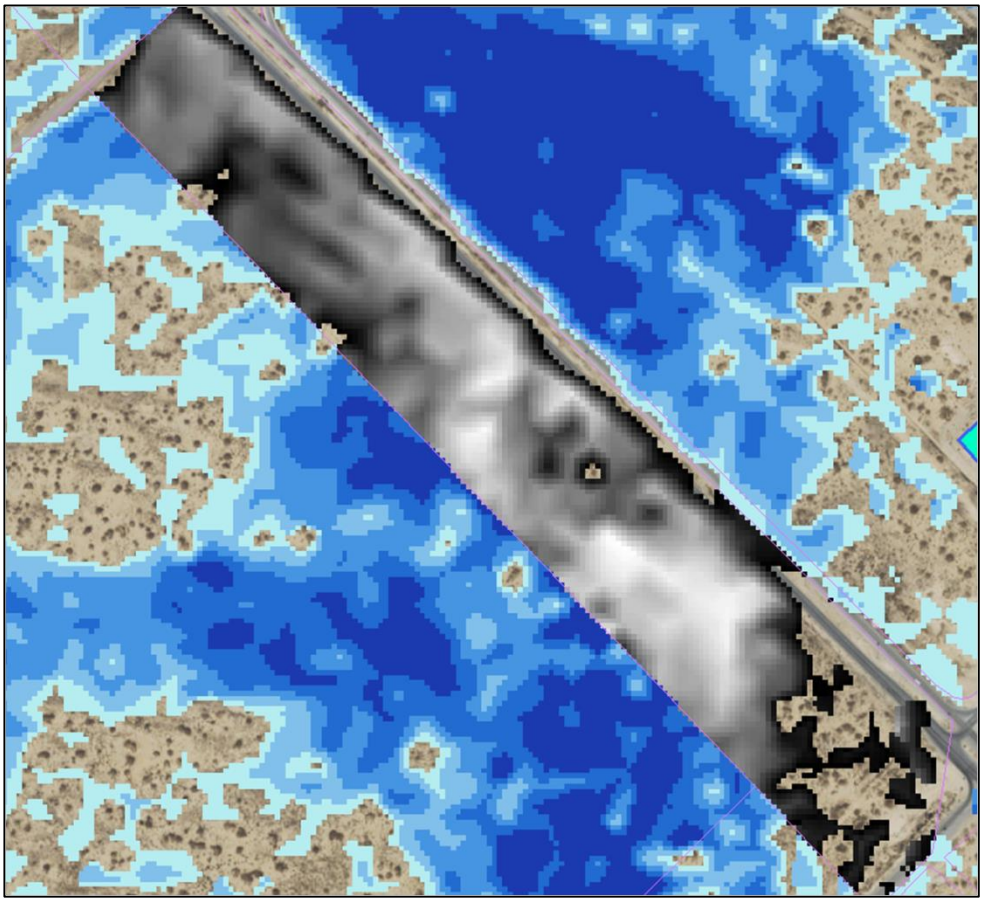


Figura VIII.9. Localización de polígono PMDU 148.

La solución para esta zona de inundación es que, cuando se comiencen a construir los primeros desarrollos, se proyecten vasos o diques que contengan el tirante de TR100, el cual reclama un volumen de 94, 317 m^3.

SOLUCION LOCAL POLIGONO 17941

Este polígono se ubica en la subcuenca Surponiente de la Cuenca El Barreal al oeste de la Vialidad Miguel de la Madrid Hurtado y al sureste del polígono 148 (Figura VIII.10).

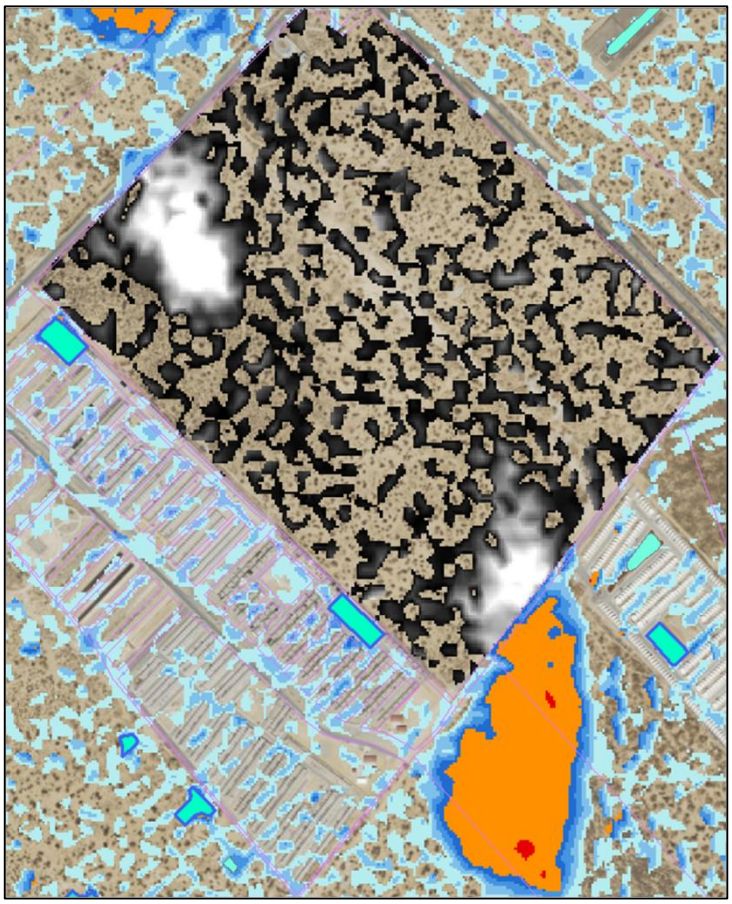


Figura VIII.10. Localización de polígono PMDU 17941.

La solución para esta zona de inundación es que se necesita preservar las zonas de lagunas que provienes de la parte suroeste de la cuenca El Barreal, y cuando se comiencen a construir los primeros desarrollos, se proyecten vasos o diques que contengan el tirante de TR100, el cual reclama un volumen de 69,514 m^3 y un área de afectación por zonas de inundación, propias de zona lagunares, de 41,520 m^2.

SOLUCION LOCAL POLIGONO 185

Este polígono se ubica en la subcuenca Surponiente de la Cuenca El Barreal al oeste de la Vialidad Miguel de la Madrid Hurtado y al sureste del polígono 17941 (Figura VIII.11).

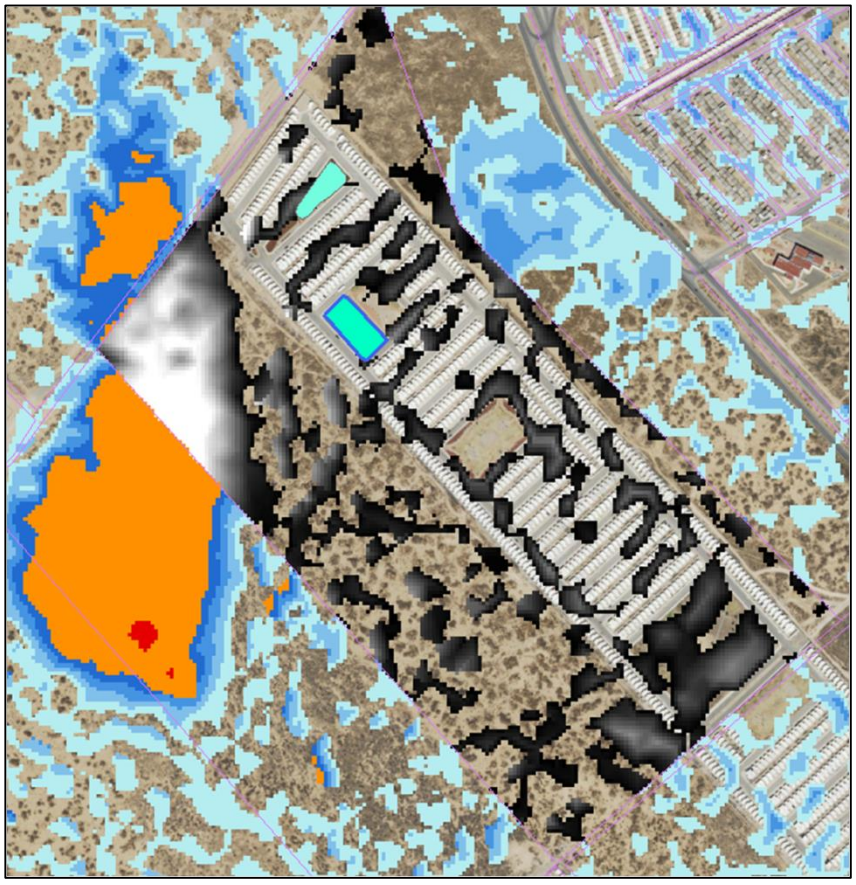


Figura VIII.11. Localización de polígono PMDU 185.

Aun y cuando solo la mitad del predio está desarrollada, existen 2 pozos de infiltración, los cuales suman un área total de 4,918 m^2, las capacidades de los diques son insuficientes para el volumen acumulado de 44,378 m^3 para un periodo

de retorno de 100 años, por lo que el mapa de severidad hidrológica lo cataloga como de riesgo medio, alto o muy alto.

La solución para esta zona de inundación es que se necesita preservar las zonas de lagunas que provienes de la parte suroeste de la cuenca El Barreal, y cuando se comiencen a construir la segunda parte del predio, se proyecten vasos o diques que contengan el tirante de TR100, para los cuales existe un área actual disponible de 9,749 m^2.

SOLUCION LOCAL POLIGONO 186

Este polígono se ubica en la subcuenca Surponiente de la Cuenca El Barreal al oeste de la Vialidad Miguel de la Madrid Hurtado y al suroeste del polígono 185 (Figura VIII.12).

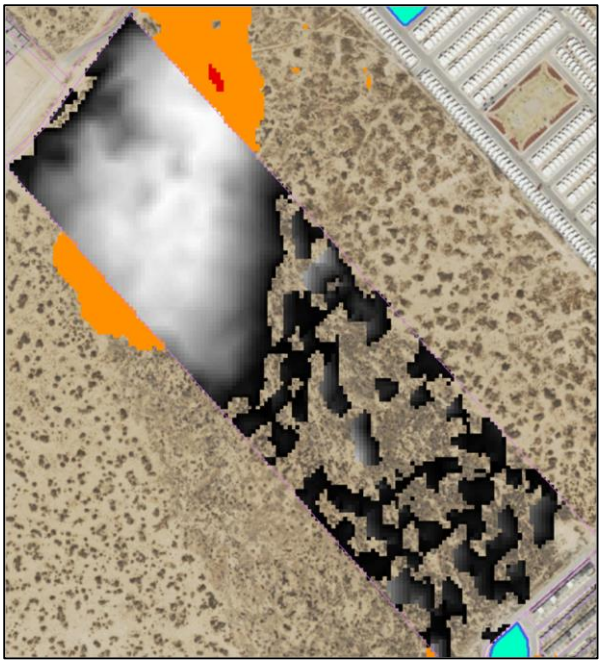


Figura VIII.12. Localización de polígono PMDU 186.

Aun y cuando el polígono no está desarrollado, se debe de contener volumen acumulado de 93,907 m^3 para un periodo de retorno de 100 años, ya que el área afectada, localizada en la parte noroeste del predio y catalogada por el mapa de severidad hidrológica como de riesgo medio, alto o muy alto, es de 62, 424.5 m^2.

La solución para esta zona de inundación es que se necesita preservar las zonas de lagunas que provienes de la parte suroeste de la cuenca El Barreal.

SOLUCION LOCAL POLIGONO 191

Este polígono se ubica en la subcuenca Surponiente de la Cuenca El Barreal a 1.3 km al oeste de la Vialidad Miguel de la Madrid Hurtado (Figura VIII.13).

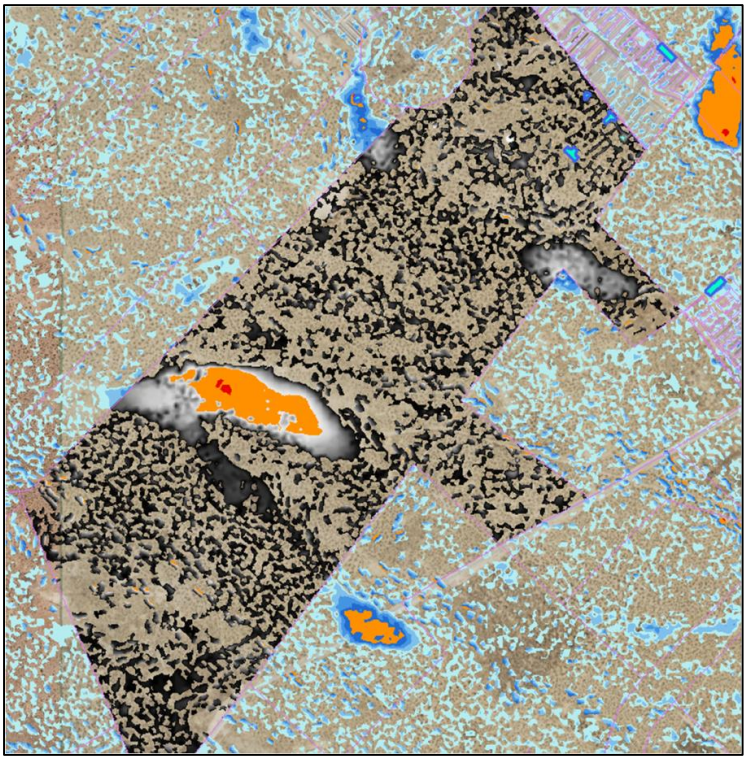


Figura VIII.13. Localización de polígono PMDU 191.

Aun y cuando el polígono no está desarrollado, se debe de contener un volumen acumulado de 358,249 m^3 para un periodo de retorno de 100 años, ya que el mapa de severidad hidrológica lo cataloga como de riesgo medio, alto o muy alto.

La solución para esta zona de inundación es la preservación de las zonas de lagunares que provienes de la parte suroeste de la cuenca El Barreal.

SOLUCION LOCAL POLIGONO 190

Este polígono se ubica en la subcuenca Surponiente de la Cuenca El Barreal a 3.6 km al oeste de la Vialidad Miguel de la Madrid Hurtado (Figura VIII.14).

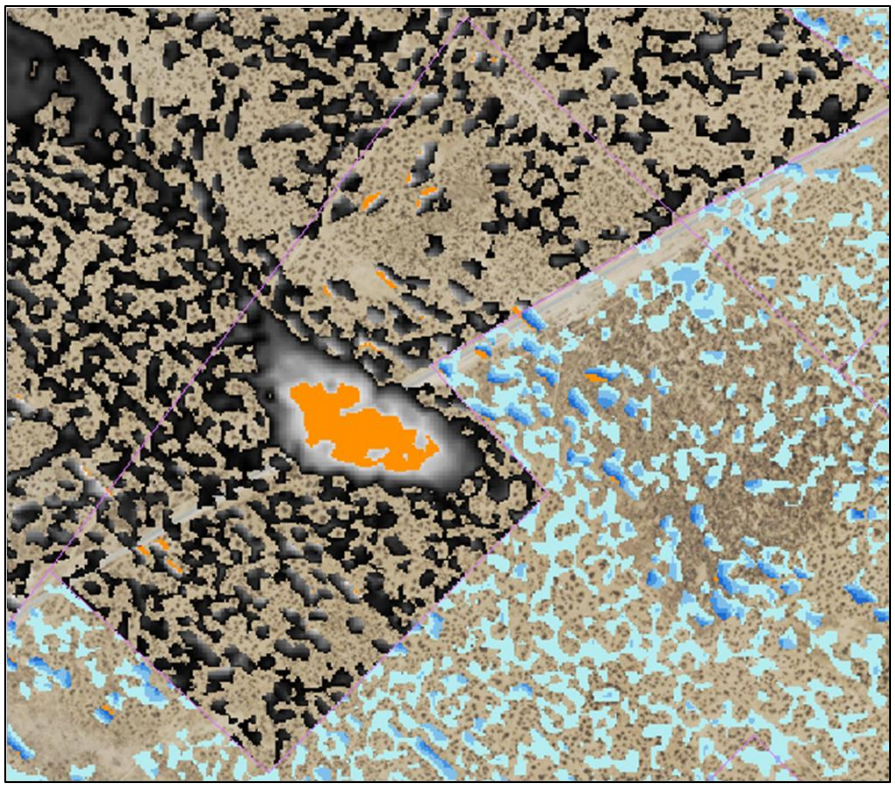


Figura VIII.14. Localización de polígono PMDU 190.

Aun y cuando el polígono no está desarrollado, se debe de contener un volumen acumulado de 72,060 m^3 para un periodo de retorno de 100 años, ya que el mapa de severidad hidrológica lo cataloga como riesgo medio, alto o muy alto. La solución para esta zona de inundación es la preservación de las zonas de lagunares que provienes de la parte suroeste de la cuenca El Barreal.

SOLUCION LOCAL POLIGONO 179

Este polígono se ubica en la subcuenca Surponiente de la Cuenca El Barreal al suroeste de la Vialidad Del Desierto (Figura VIII.15).

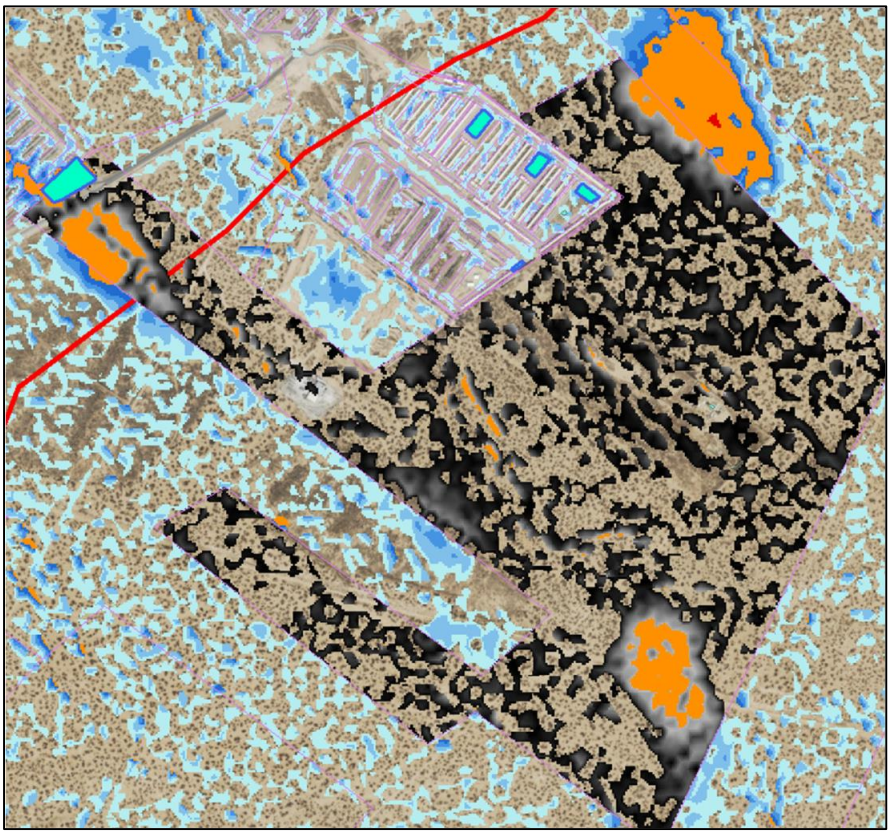


Figura VIII.15. Localización de polígono PMDU 179.

Aun y cuando el polígono no está desarrollado, se debe de contener un volumen total acumulado de todo el predio de 144,206 m^3 para un periodo de retorno de 100 años y un volumen de 33,484 m^3 dentro de la cuenca, ya que el mapa de severidad hidrológica lo cataloga como de riesgo medio, alto o muy alto. La solución para esta zona de inundación es la preservación de las zonas de lagunares que provienes de la parte suroeste de la cuenca El Barreal.

SOLUCION LOCAL PMDU 143 y 147

Este polígono se ubica en la subcuenca surponiente de la Cuenca Barreal y se refiere a los polígonos hacia el oeste de la Vialidad Miguel de la Madrid (Figura VIII.16).

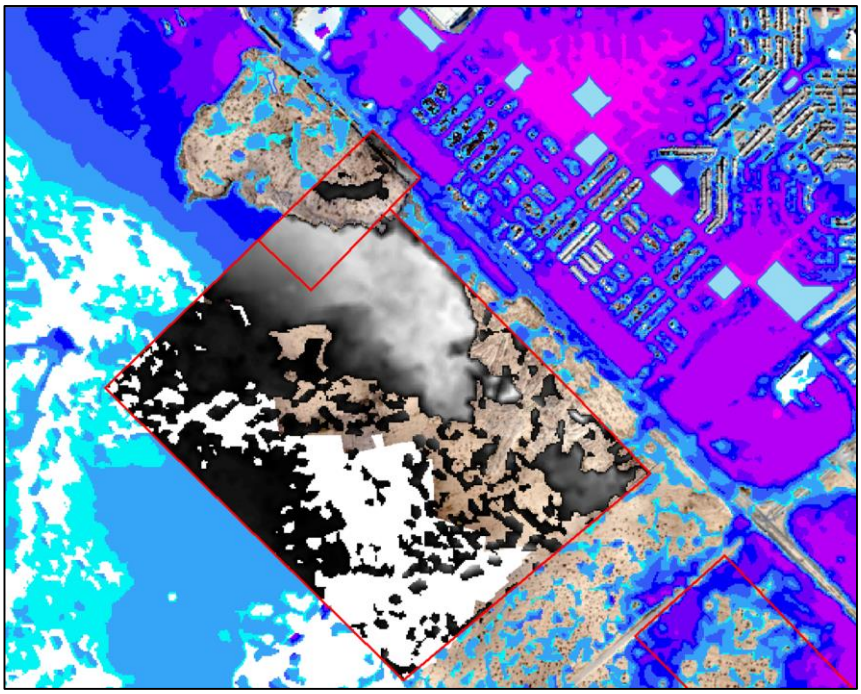


Figura VIII.16. Localización de los polígonos PMDU 143 y 147.

Estos polígonos no cuentan con desarrollos aun, por lo que necesitan manejar un volumen importante de 112,326.57 m^3 aproximadamente para TR 100 años. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya el manejo efectivo de rasantes hacia los vasos, suficiente capacidad de almacenamiento y una obra de llamada hidráulicamente efectiva para el ingreso de los volúmenes escurridos para las nuevas estructuras proyectadas.**

SOLUCION LOCAL PMDU 153

Este polígono se ubica en la subcuenca surponiente de la Cuenca Barreal y se refiere a los polígonos hacia el oeste de la Vialidad Miguel de la Madrid, y al sureste de los polígonos 143 y 147 (Figura VIII.17).

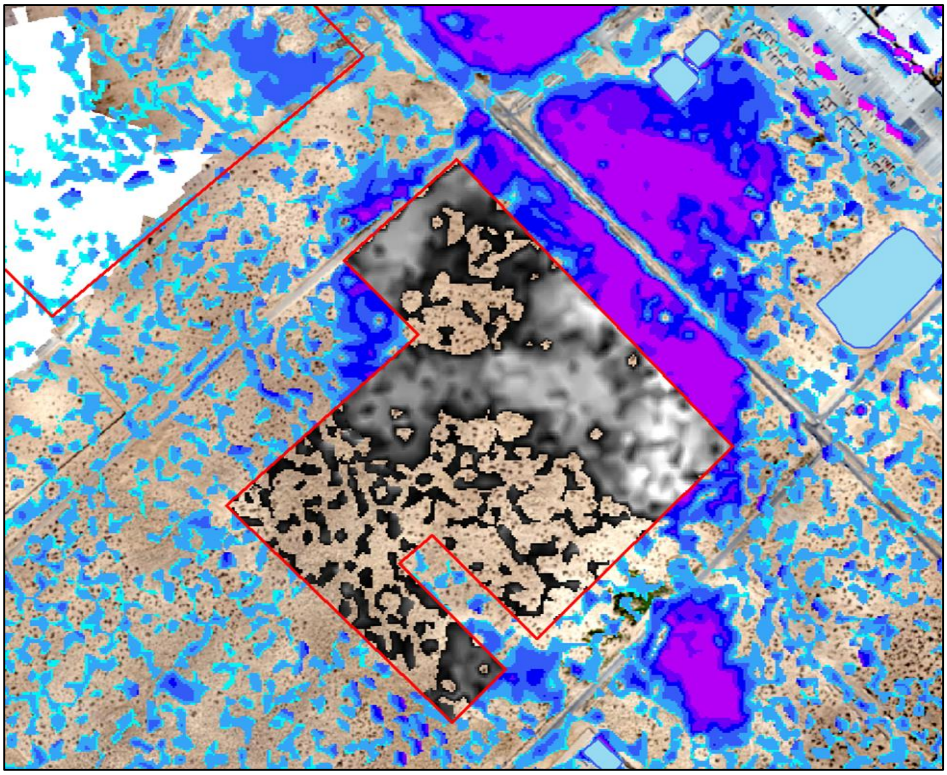


Figura VIII.17. Localización de polígono PMDU 153.

Este polígono no cuenta aún con desarrollos de ningún tipo, sin embargo, necesita manejar un volumen considerable de 142,307 m^3 aproximadamente para TR 100 años. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya el manejo efectivo de rasantes hacia los vasos futuros, suficiente capacidad de almacenamiento y una obra de llamada hidráulicamente efectiva para el ingreso de los volúmenes escurridos a la nueva estructura proyectada.**

SOLUCION LOCAL PMDU 156

Este polígono se ubica en la subcuenca surponiente de la Cuenca Barreal y se refiere a los polígonos hacia el oeste de la Vialidad Miguel de la Madrid (Figura VIII.18).

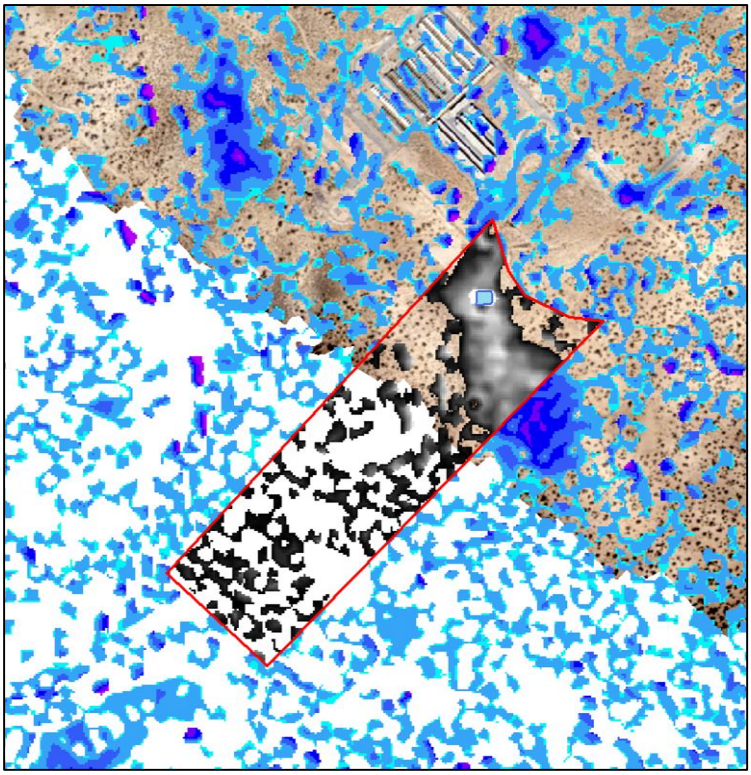


Figura VIII.18. Localización de polígono PMDU 156.

Este polígono permanece aún con pocos desarrollos y tiene solamente un vaso de captación, por lo que necesita manejar un volumen de 27,825.45 m^3 aproximadamente para TR 100 años. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya el manejo efectivo de rasantes hacia los vasos, en especial el del norte, suficiente capacidad de almacenamiento y una obra de llamada hidráulicamente efectiva para el ingreso de los volúmenes escurridos a la estructura.**

SOLUCION LOCAL PMDU 6791

Este polígono se ubica en la subcuenca surponiente de la Cuenca Barreal y se refiere al polígono localizado hacia el este de la Vialidad Miguel de la Madrid (Figura VIII.19).

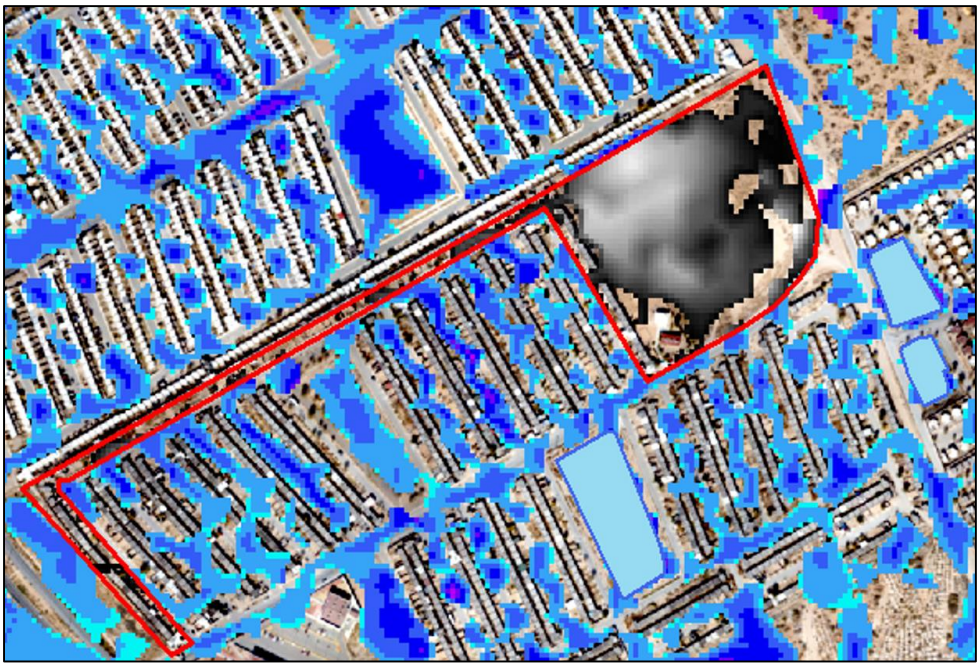


Figura VIII.19. Localización de polígono PMDU 6791.

Este polígono cuenta con desarrollos hacia la parte sur y cuenta con 3 vasos de captación muy cercanos, por lo que necesita manejar un volumen de 10,748.49 m^3 aproximadamente para TR 100 años. **Se requiere de la elaboración de un proyecto ejecutivo que incluya el manejo efectivo de rasantes hacia una obra de protección que se debe de proyectar, ya que la mancha de inundación se concentra en la parte noreste del polígono.**

SOLUCION LOCAL PMDU 18042

Este polígono se ubica en la subcuenca sur de la Cuenca Barreal y se refiere al polígono hacia el este de la Vialidad Miguel de la Madrid (Figura VIII.20).

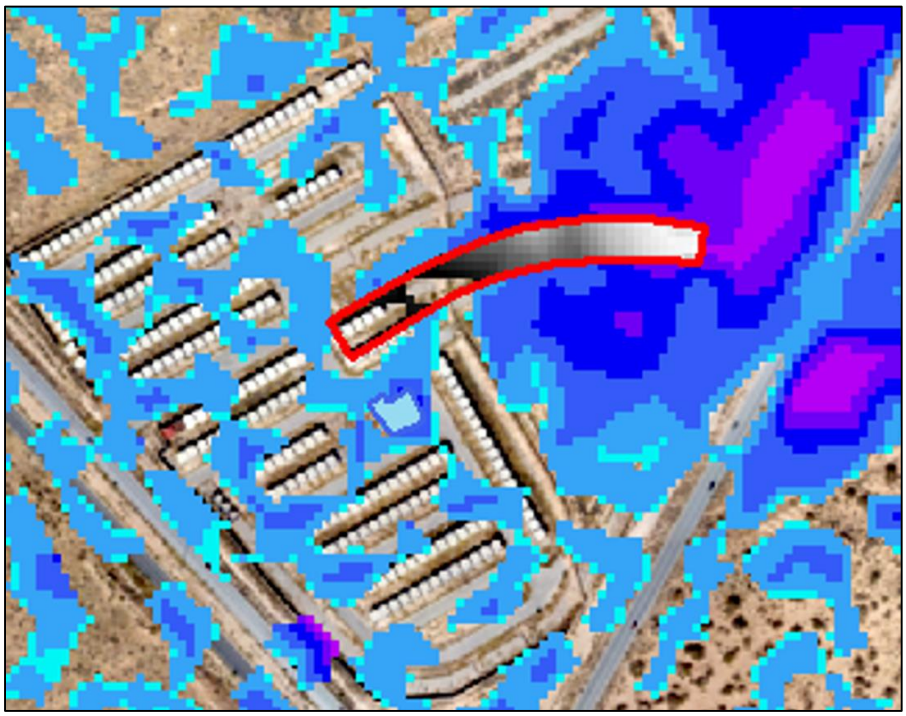


Figura VIII.20. Localización de polígono PMDU 18042.

Este polígono cuenta con desarrollos hacia la parte sur y cuenta con 3 vasos de captación muy cercanos, por lo que necesita manejar un volumen de 11,120 m^3 aproximadamente (Figura VII.28) para TR 100 años. **Se requiere de la elaboración**

de un proyecto ejecutivo que incluya el redimensionamiento de la obra de captación, el manejo efectivo de rasantes hacia la obra de protección, ya que la mancha de inundación se concentra en la parte este del polígono.

SOLUCION LOCAL POLIGONOS AGUA ARRIBA DEL BORDO MMH

Estos polígonos se ubican agua arriba del Bordo MMH en la subcuenca Centro de la Cuenca El Barreal, los polígonos son identificados con el ID_Severid, 18320, 134, 132, 139, 138, 135, 142 y 145 (Figura VIII.21).

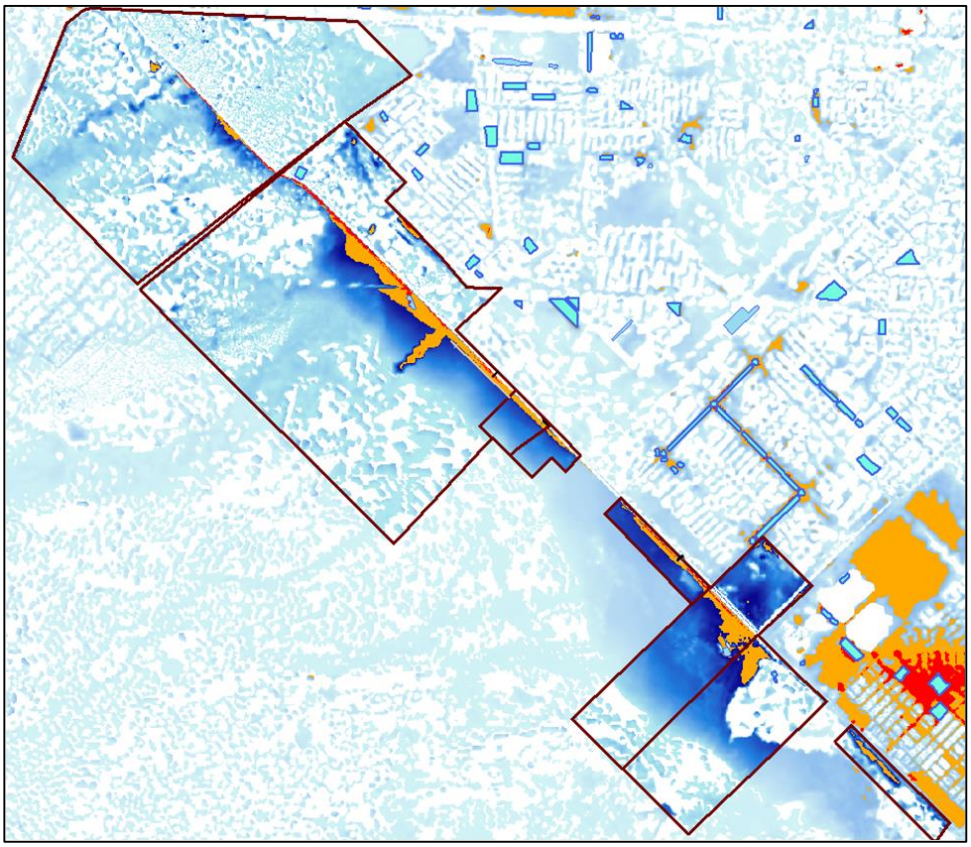


Figura VIII.21. Localización de polígonos PMDU 18320, 134, 132, 139, 138, 135, 142 y 145.

Aun y cuando en estos polígonos no existen desarrollos, se debe de contener un volumen total acumulado de 571, 078 m^3 para un periodo de retorno de 100 años, ya que el mapa de severidad hidrológica lo cataloga como riesgo medio, alto o muy alto, y la única solución es la preservación del Bordo MMH para que no se vea afectado su operación hidráulica y se altere la geometría del mismo.

IX. LISTADO FINAL DE POLIGONOS AFECTADOS

El listado final de los desarrollos afectados (Tabla I), muestra por subcuenca los desarrollos que conforme al PMDU o AGEB´s presentan un grado de exposición al peligro hidrológico catalogado como medio, alto o muy alto.

Tabla I.- Polígonos afectados.

No.	SUBCUENCA	ID_SEVERID	VOLUMEN (m^3)	PMDU	AGEB
1	NORTE	85	141,631.00		X
2	NORTE	86	240,397.00		X
3	BMMH	132	571,078.00	X	
4	BMMH	134		X	
5	BMMH	135		X	
6	BMMH	138		X	
7	BMMH	139		X	
8	BMMH	142		X	
9	BMMH	145		X	
10	BMMH	18320		X	
11	SUR	148	94,317.00	X	
12	SUR	179	144,206.00	X	
13	SUR	185	44,378.00	X	
14	SUR	186	93,907.00	X	
15	SUR	190	72,060.00	X	
16	SUR	191	358,249.00	X	
17	SUR	17441	104,376.00	X	
18	SUR	17941	69,514.00	X	
19	SUR	20476	250,873.00	X	
20	NORTE	4131	15,110.00	X	
21	NORTE	4137	21,138.00	X	
22	NORTE	4138		X	
23	NORTE	4139		X	
24	NORTE	17089	32,146.00	X	

25	NORTE	18166	13,663.00	X	
26	NORTE	7955	6,800.00	X	
27	SUR	8488	63,128.00	X	
28	SUR	8489	369,757.00	X	
29	SUR	17087		X	
30	SUR	7294		X	
31	SUR	20116		X	
32	SUR	7295		X	
33	SUR	20096		X	
34	SUR	20103	555,641.20	X	650
35	SUR	20323		X	
36	SUR	20324		X	
37	SUR	20337		X	
38	SUR	20109		X	
39	SUR	20321		X	
40	SUR	21041	22,598.00	X	
41	SUR	143	112,326.57	X	
42	SUR	147		X	
43	SUR	153	142,307.13	X	
44	SUR	156	27,825.45	X	
45	NORTE	2440	13,904.00	X	
46	NORTE	2936	88,292.00	X	
47	TRIANGULO	3259	21,569.00	X	
48		3332		X	
49		3333		X	
50		3344		X	
51	TRIANGULO	3645	5,965.00	X	
52	SUR	6791	10,748.49	X	
53	NORTE	7929	6,196.00	X	
54	NORTE	9515	17,388.00	X	
55	NORTE	16936	6,017.00	X	
56	SUR	18042	1,118.90	X	
57	NORTE	18162	24,774.00	X	
58	NORTE	18856	19,316.00	X	
59	NORTE	20380	41,566.00	X	

60	SUR	2886		X	
61	SUR	2887		X	
62	SUR	2890		X	
63	SUR	2904		X	
64	SUR	2905		X	
65	SUR	2906		X	
66	SUR	2907		X	
67	SUR	2908		X	
68	SUR	8457		X	
69	SUR	8458		X	
70	SUR	8460		X	
71	SUR	8461		X	581
72	SUR	8462	732,905.00	X	
73	SUR	8463		X	
74	SUR	8464		X	
75	SUR	8465		X	
76	SUR	8467		X	
77	SUR	8468		X	
78	SUR	8473		X	
79	SUR	8475		X	
80	SUR	18014		X	
81	SUR	18015		X	
82	SUR	19727		X	
83	SUR	7289		X	

X. RECOMENDACIONES

I. Que la autoridad establezca un Plan de mantenimiento de la infraestructura hidráulica existente en la cuenca EL Barreal.

II. Los fraccionamientos listados como afectados deberán elaborar un proyecto ejecutivo de solución que contenga los siguientes elementos:

1. Dimensionamiento de la obra conforme a los volúmenes calculados en este estudio (Tabla I)
2. Prueba Lefranc con descarga al estrato permeable conforme a los resultados del estudio de capacidad de infiltración del Entregable E si es que el dique es existente. En caso de ser una nueva obra deberá realizarse, además, un estudio geoeléctrico especifico en la zona propuesta.
3. Construcción de obra de infiltración al estrato permeable con capacidad de infiltración no mayor a 72 horas para el volumen correspondiente a TR100 (Tabla I)
4. Obras de llamada con manejo adecuado de rasantes.
5. Estudio hidrológico con cambio de numero de curva (CN) de 69 a 89.
6. Programa de mantenimiento de la obra propuesta o existente.
7. Validación del Proyecto de mitigación por parte de la autoridad municipal a través del dictamen de expertos en la materia.