

Universidad Nacional
Autónoma de México

Facultad de Ingeniería
División de Ingeniería en Ciencias
de la Tierra



**APLICACIÓN DE LA GEOLOGÍA Y GEOHIDROLOGÍA EN LA
EVALUACIÓN AMBIENTAL DE SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL DE
ACUERDO CON LA NOM-083-SEMARNAT-2003. ESTUDIO DE CASO:
RELLENO SANITARIO LOMA DE MEJÍA, MUNICIPIO DE
CUERNAVACA, MORELOS.**



TESIS

Que para obtener el título de :
INGENIERO GEÓLOGO

Presenta:

Oscar Mario Pohle Morales

Director:

Dr. Luis Marín Stillman

Ciudad Universitaria, México D.F., Febrero 2013

Contenido

I.	Antecedentes	5
II.	Metodología	6
III.	Marco geológico regional	6
	III.1. Provincias fisiográficas.....	6
	III.2. Estratigrafía	8
	III.3. Geología Estructural.....	12
IV.	Geología del Glacis de Buenavista.....	13
	IV.1 Localización y límites	13
	IV.2 Fisiografía	13
	IV.3 Geomorfología	13
	IV.4 Estratigrafía del Glacis de Buenavista	16
V.	Evaluación hidrogeológica del sitio Loma de Mejía.....	22
	V.1 Localización y límites.....	22
	V.2 Geomorfología local.....	23
	V.3 Estratigrafía de Loma de Mejía.....	25
	V.4 Pruebas de permeabilidad “In Situ”	28
	V.5 Sondeos eléctricos verticales	36
	V.7 Hidrogeología de Loma de Mejía.....	50
VI.	Cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003.....	67
VII.	Conclusiones y recomendaciones	71
VIII.	Bibliografía.....	83

I. Antecedentes

La selección y operación del sitio destinado para el confinamiento de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Cuernavaca, Mor., ha sido objeto de duras críticas por parte de importantes sectores de la sociedad, integrados por organismos no gubernamentales, académicos y un considerable número de ciudadanos pertenecientes a las poblaciones de Cuernavaca y Temixco, entre otros.

Dichos señalamientos se han basado en la misma información contenida dentro de la Manifestación de Impacto Ambiental, así como en dictámenes técnicos bien fundamentados emitidos con anterioridad, entre los que destaca el elaborado por el Instituto de Geología de la UNAM; y que no fueron considerados en su momento durante la administración 2006-2009 al conceder la concesión de recolección, traslado y disposición final a la empresa Protección Ambiental, S.A. (PASA)

Sorteando una fuerte oposición social y cuestionamientos de índole técnica, dio inicio la construcción y operación del relleno sanitario bajo condiciones de estricta vigilancia para impedir el acceso al sitio, obstaculizando cualquier verificación sobre el cumplimiento de la NOM-083 y la serie de condicionantes establecidas para la aprobación del proyecto. No obstante, a partir del cambio en la administración municipal 2009-2012, se resolvió la ejecución de una evaluación ambiental realizada por una Unidad de Verificación Ambiental (UVA) acreditada independiente, con la participación del M.I. Jorge Sánchez Gómez, entonces Presidente de la Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, A.C. (FEMISCA).

Paralelamente a los trabajos efectuados por dicha UVA, se realizaron una serie de estudios geológicos que abarcaron el sitio del emplazamiento del relleno sanitario y una extensa zona del abanico aluvial denominado Glacis de Buenavista. Complementado con numerosas anotaciones que el autor recopiló a lo largo de 5 años durante su gestión como Coordinador de Estudios y Proyectos Ambientales en el Ayuntamiento de Cuernavaca (2001-2005), el presente trabajo reúne y sintetiza los resultados obtenidos durante dichos trabajos, así como el grado de cumplimiento de la norma NOM-083-SEMARNAT-2003 en el sitio de disposición final; sobre todo, enfocado a la vulnerabilidad del acuífero alojado dentro de dicho glacis.

II. Metodología

Los trabajos realizados se circunscriben dentro de los siguientes conceptos:

- a) Recopilación y análisis de información antecedente
- b) Ejecución de trabajos de campo, consistentes en:
 - Reconocimiento geológico general del área
 - Ejecución de sondeos eléctricos verticales
 - Realización de pruebas de permeabilidad “In Situ”
 - Obtención de muestras con penetrómetro portátil
 - Excavación de pozos a cielo abierto
- c) Análisis y procesamiento de datos obtenidos
 - Geología de campo
 - Inversión y modelado de registros geofísicos
 - Cálculo de conductividades hidráulicas
 - Interpretación de análisis químicos
 - Elaboración del informe

III. Marco geológico regional

III.1. Provincias fisiográficas

El estado de Morelos queda comprendido dentro de dos provincias fisiográficas: el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur, ésta última situada dentro de la cuenca del río Balsas-Mezcala. Estas unidades a su vez se subdividen en las subprovincias de: Lagos y Volcanes de Anáhuac, Sierras del Sur de Puebla y Sierras y Valles Guerrerenses, las dos primeras dentro del Eje Neovolcánico; y la tercera, ubicada en la Sierra Madre del Sur (*Figura No.1*).

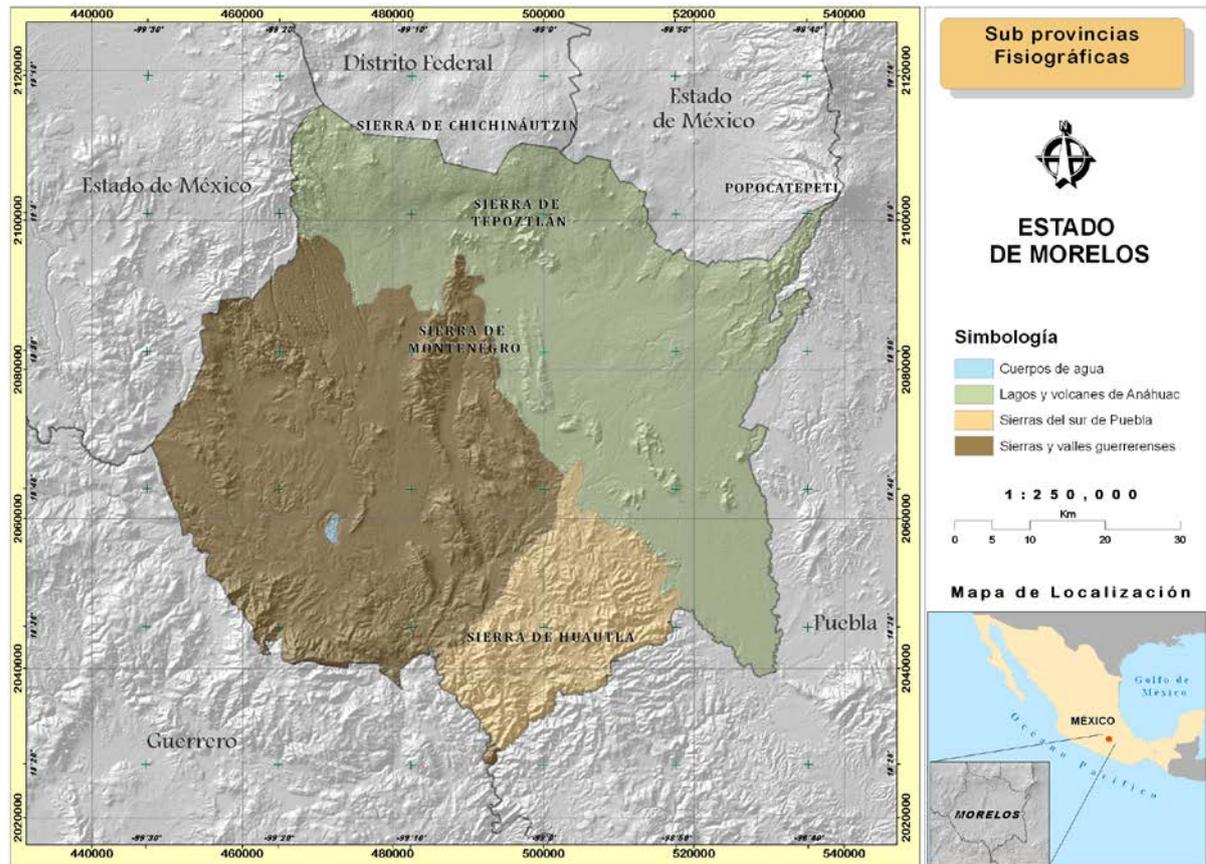


Figura No.1 Subprovincias Fisiográficas de Morelos. Fuente: Formado a partir de datos vectoriales del INEGI.

Eje Neovolcánico

Dentro del Eje Neovolcánico, predominan materiales ígneos extrusivos del Cuaternario que forman extensos campos de lava ocupados por cientos de volcanes monogenéticos. Dentro de éstos, destacan los derrames lávicos de basalto, traquibasalto, traquiandesita y andesita, así como depósitos de piroclastos o tefras formadas por tobas y brechas. Las rocas ígneas extrusivas del Terciario se encuentran formadas principalmente por derrames de lava andesítica y dacítica, así como brechas y tobas de igual composición. Los aparatos volcánicos de este periodo corresponden con grandes estrato-volcanes que destacan en el paisaje por su altitud. Toda la parte norte del estado de Morelos, comprende corrientes lávicas, estratos de tobas, brechas y materiales clásticos interestratificados, siendo su composición principalmente basáltica y se interna en forma de coladas hacia el sur, configurando un relieve endógeno acumulativo de coladas lávicas y domos que conservan su aspecto original.

Sierra Madre del Sur

Ocupando la parte meridional de Morelos, la provincia Sierra Madre del Sur se caracteriza por alargadas serranías que son el reflejo de fuertes plegamientos formados en depósitos marinos del Cretácico. Estructuralmente pueden describirse como anticlinales y sinclinales recostados, cuyos ejes se orientan preferencialmente hacia el norte y noreste, encontrándose además afectados por extensas fallas de tipo normal que originaron alargadas fosas tectónicas, cuyo relleno dio lugar a los valles de Cuernavaca, San Gaspar y Ticumán. Son también característicos de esta provincia, lagos y embalses de origen kárstico, como son Tequesquitengo, Coatetelco y El Rodeo; depresiones o poljes, como Alpuyeca; y sistemas cavernosos que se encuentran en las cercanías de Xochicalco; a lo largo de la Sierra de Montenegro; en el valle de Moyotepec; y cerca de la localidad de Atotonilco.

III.2. Estratigrafía

La historia geológica del estado, considerando las diferentes rocas expuestas dentro de su territorio, inicia a partir del Cretácico inferior, época durante la cual formaba parte de un mar somero antiguo que rodeaba la paleopenínsula de Taxco. En dichas aguas se acumuló una serie potente de sedimentos, graduados desde el calcáreo bioquímico al arrecifal y finalmente terrígeno de aguas someras. En la misma zona, a principios de la Era Cenozoica, las aguas marinas se retiraron como consecuencia del inicio de la Orogenia Laramide, dando comienzo el depósito de sedimentos continentales, particularmente en las partes bajas formadas a partir de fosas tectónicas, acumulándose las rocas del Grupo Balsas (Eoceno-Oligoceno) e interrumpiéndose éstas por el surgimiento de un sistema volcánico en el Oligoceno (López, E., 1979), representado por las formaciones: Riolita Tilzapotla, Grupo Buenavista, Formación Tepoztlán e inicios de la Formación Zempoala. Como resultado de lo anterior, fueron extravasadas andesitas y basaltos, así como riolitas y riodacitas. Posteriormente se formaron pequeños lagos y planicies aluviales donde se depositaron los sedimentos de la Formación Cuernavaca durante el Plioceno, la cual fue cubierta posteriormente por los basaltos cuaternarios que componen la Formación Chichináutzin.

A continuación se describen las características litológicas generales de las principales unidades estratigráficas que afloran en la parte occidental del estado de Morelos, también referidas en la columna estratigráfica de la *Figura No. 2*:

Formación Xochicalco.- Rocas del período Cretácico Inferior, son las más antiguas y afloran en las inmediaciones de la zona arqueológica de Xochicalco, que consiste de una sucesión de capas de calizas de espesor delgado a medio, cuyo color varía de gris a negro, con nódulos y pequeñas capas intercaladas de pedernal.

Formación Morelos.- Son rocas marinas del periodo Cretácico Inferior, constituidas por calizas y dolomías de espesor medio a grueso. Su color varía de gris claro a oscuro. Estas rocas se encuentran distribuidas ampliamente en todo el estado de Morelos.

Formación Cuautla.- Son rocas marinas del Cretácico Superior que se integran de calizas con lentes y nódulos de pedernal, así como fósiles silicificados. Esta formación, junto con la Morelos, sufrieron un intenso fracturamiento por efectos orogénicos, el cual que fue sellado posteriormente por calcita en muchos sitios.

Formación Mexcala.- Esta unidad deriva de depósitos marinos del Cretácico Superior, y está constituida por capas interestratificadas de arenisca, limolita y lutita calcárea, con escasos lentes de calizas clásticas. Sobreyace a la Formación Cuautla y está cubierta a su vez por los depósitos clásticos del Grupo Balsas.

Grupo Balsas.- Son rocas del periodo Eoceno Superior que comprenden a una gran variedad de tipos de rocas, entre las que se incluyen: evaporitas, conglomerados calizos que muestran una característica coloración rojiza, yesos lacustres y coladas máficas interestratificadas con capas vulcanoclásticas.

Riolita Tilzapotla.- Son rocas del periodo Oligoceno y se caracterizan por una brecha riolítica que sobreyace al Grupo Balsas.

Granito Colotepec.- Pertenece al periodo Pre-mioceno; es un cuerpo intrusivo que atraviesa a las formaciones Xochicalco y Morelos, formando los cerros de El Jumil y Colotepec, al Sureste de la zona arqueológica del mismo nombre.

Formación Tepoztlán.- Son rocas del periodo Mioceno que se ubican en la porción noroeste y norte del estado. Se encuentra formada por capas vulcano-sedimentarias intercaladas con

lahares de composición predominantemente andesítica. Su expresión geomorfológica es muy característica, ya que muestra grandes acantilados de paredes verticales.

Andesita Zempoala.- Son rocas extrusivas del Plioceno, que integran antiguos volcanes y coladas lávicas de composición andesítica y que ocupan la sierra del mismo nombre.

Formación Cuernavaca.- Son rocas del Plioceno Tardío, que afloran en la zona poniente, centro y sur del estado, constituidas por gruesos depósitos clásticos continentales, cuya consolidación es muy variable y que se han originado por grandes flujos de detritos procedentes de las sierras de Zempoala, Ahuatenco y Ajusco. Su expresión geomorfológica característica comprende un amplio cono de deyección, denominado Glacis de Buenavista y el extenso valle surcado por numerosas y profundas barrancas que se prolonga hacia el sur y sureste de Morelos, en los límites con Guerrero.

Grupo Chichináutzin.- Conformado por rocas de los periodos Pleistoceno y Cuaternario, toman el nombre del volcán que destaca al oriente de la población de Tres Marías. Dicho grupo comprende amplios y extensos campos de lava, estratos de tobas, brechas y materiales clásticos interestratificados de composición andesítica y basáltica. Debido a su baja viscosidad, los campos de lava se extienden cerca de 50 km hacia el Sur, cubriendo valles y depresiones antiguas ocupadas por la Formación Cuernavaca, principalmente.

Sobreyaciendo a todas las rocas anteriores se encuentran depósitos clásticos continentales del periodo Pleistoceno, formados por derrames de lava o conos cineríticos que produjeron materiales poco consolidados que varían desde detritus angulosos y gruesos hasta limos y arcillas, así como cantidades menores de marga, turba, ceniza volcánica, loess, travertino y tufa. Finalmente, la secuencia estratigráfica se completa con Depósitos Aluviales Cuaternarios del periodo Holoceno, integrados por depósitos sedimentarios clásticos continentales con menor porcentaje de elementos volcánicos que el estrato anterior.

Figura No. 2 Columna estratigráfica de la zona occidental del Morelos.

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA GENERALIZADA DEL ESTADO DE MORELOS (tomada de Carl Fries, Jr., 1960)						
ERA	PERIODO	FORMACIÓN	ESPESOR	ESTRUCTURA	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	
CENOZOICO	Reciente	Dep. clásticos continentales EROSIÓN	0 - 30 m		Aluvión, ceniza volcánica, marga, caliche, travertino y tierra diatomácea	
	Reciente y Pleistoceno	Grupo Chichináutzin EROSIÓN	0 - 1 800 m		Corrientes lávicas, brecha volcánica, ceniza, escoria y conos cineríticos, principalmente de composición basáltica pero incluyendo algo de andesita; arena, limo y arcilla depositados por agua, interestratificados localmente.	
	Plioceno superior	Formación Cuernavaca EROSIÓN	0 - 300 m		Grava, arena y arcilla derivadas principalmente de rocas andesíticas, con mezcla local de ceniza volcánica, travertino y marga.	
	Plioceno inferior y Mioceno superior	Andesita Zempoala EROSIÓN	0 - 800 m		Grupos Buenavista y No Diferenciado — Corrientes lávicas interestratificadas con brecha y ceniza, principalmente de composición andesítica y en parte dacítica y riolítica; contiene intercalado un poco de arenisca tobácea depositada por agua. Estas dos series equivalen en edad a la Andesita Zempoala y a la Formación Tepoztlán, juntas, pero aparecen en áreas separadas situadas más al sur y no están en contacto con estas ni entre sí. Andesita Zempoala — Corrientes lávicas interestratificadas con capas de brecha y ceniza, principalmente de composición andesítica; contiene capas laháricas intercaladas. Se presenta sólo en la parte noroccidental de la región.	
	Mioceno inferior y Oligoceno superior	Formación Tepoztlán EROSIÓN				0 - 1 000 m
	Oligoceno superior	Riolita Tilzapotla EROSIÓN	0 - 250 m		Corrientes lávicas, corrientes piroclásticas (ignimbritas), brecha y toba, principalmente de composición riolítica y en parte dacítica	
	Oligoceno inferior	Grupo Balsas EROSIÓN	0 - 2 500 m		Conglomerado compuesto principalmente por detritos erosionados de las formaciones pre-terciarias, predominando la caliza; bien cementada en algunos lugares y deleznable en otros; predomina el color rojizo, por lo general, y el color parduzco localmente. La parte superior o más joven está compuesta principalmente por arena, limo y arcilla derivados de rocas pre-terciarias, mezclados localmente con rocas volcánicas máficas contemporáneas, incluyendo corrientes lávicas y brechas de composición basáltica y andesítica. En algunas localidades se presentan capas de caliza lacustre y de yeso con mezcla de arcilla y material tobáceo de grano fino. En otros lugares aparecen capas de conglomerado, arenisca y limolita compuestas en gran parte por material volcánico andesítico.	
Eoceno superior						
MESOZOICO	Cretácico superior	Senoniano	Formación Mexcala	0 - 1 200 m		La parte basal consiste en capas delgadas de caliza arcillosa con un espesor máximo de 50 m. Estas están cubiertas por capas de lutita calcárea, limolita y arenisca, con escasos conglomerados de grano fino; disminuye la proporción de lutita hacia arriba y aumenta la de arenisca o grauvaca. Aparecen en la parte inferior de la formación, pequeñas lentes de caliza y algo de materia carbonosa. Gran parte del material clástico deriva de rocas volcánicas e intrusivas de composición intermedia. Predomina el color olivo oscuro y en menor proporción el negro y el rojizo, cambiando a la intemperie a tonos amarillentos de intensidad variable.
		Turoniano	Formación Cuautla	0 - 750 m		La parte basal consiste generalmente en unos cuantos metros de conglomerado calizo de grano fino o de calcarenita clástica, con mezcla variable de arcilla. El resto consiste principalmente en una facies de banco o "bahamita" compuesta por calcilita y calcarenita en capas de 20 a 50 cm de espesor, hasta más de 2 m.
	Cretácico inferior	Cenomaniano inferior y Albiano	Formación Morelos	0 - 900 m		Las capas basales consisten en anhidrita en la parte oriental de la región y en caliza o dolomía en otras partes. La cima está compuesta de calcilita y calcarenita con cantidades menores de calcirudita. La mayoría de las capas están parcialmente dolomitizadas. Los colores varían de negro a crema claro. Las capas generalmente oscilan entre 20 cm y 1 m de espesor.
		Aptiano	Formación Xochicalco	0 - 500 m		La parte basal consiste en capas alternadas de caliza y lutita; el resto es de caliza en capas de 10 a 30 cm de espesor y hasta 1 m. Es común el pedemal en forma de nódulos, lentes y láminas delgadas.

En la *Figura No. 3*, se muestran la distribución de los diferentes tipos de roca que afloran en el territorio morelense y la localización del Glacis de Buenavista, área dentro de la cual se encuentra el sitio de disposición final.

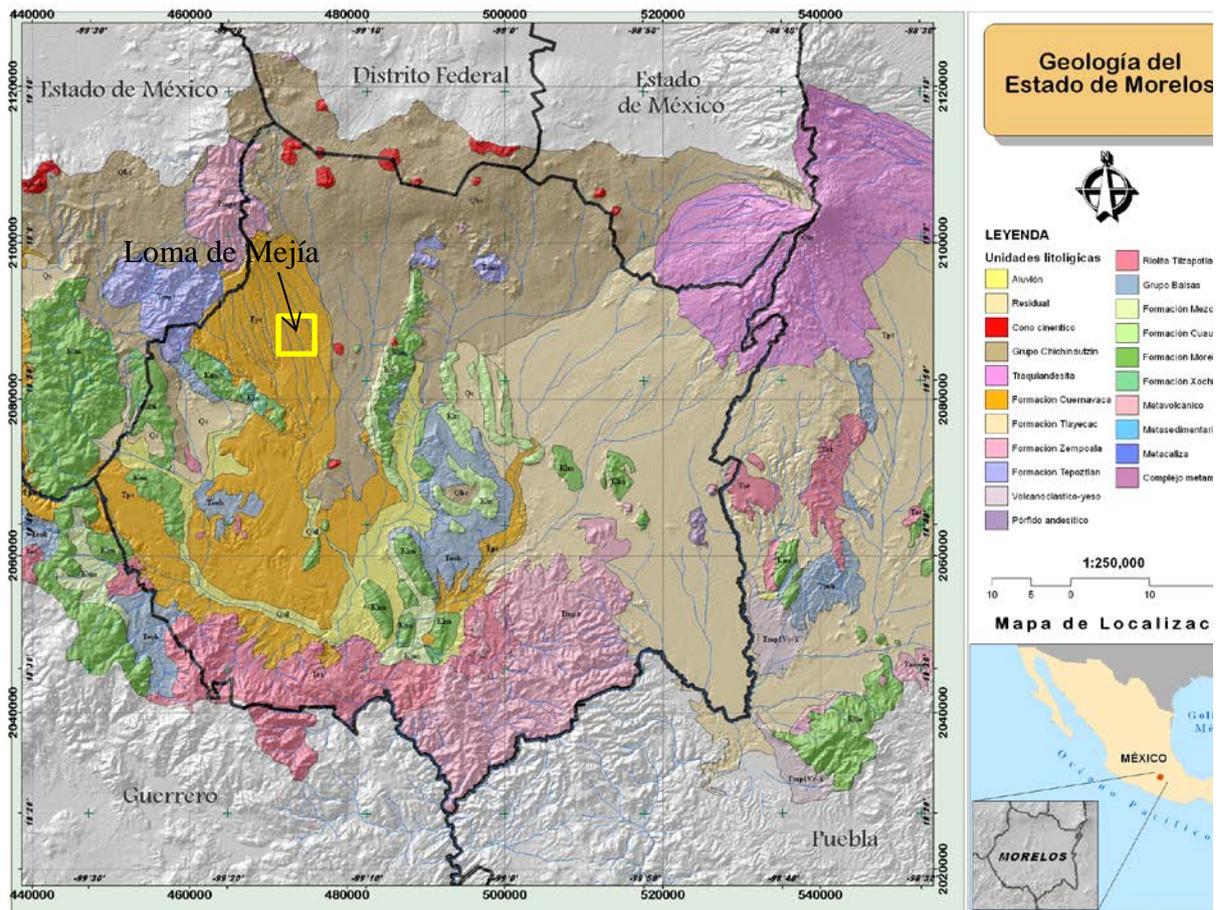


Figura No. 3 Geología del estado de Morelos. Fuente: Formada a partir de datos vectoriales del INEGI

III.3. Geología Estructural

Las estructuras más importantes de esta provincia son, en primer lugar, los pliegues producidos en las rocas cretácicas; originados por perturbaciones orogénicas de fines del Cretácico y principios del Terciario. Estas estructuras se proyectan sepultadas bajo rocas clásticas y rocas ígneas extrusivas del Cenozoico, observándose que dichas estructuras se encuentran afectadas por una gran cantidad de fallas; ya sea de compresión, originando cabalgaduras, fallas inversas y de rumbo; o fallas normales, debido a esfuerzos de tensión. Otros rasgos estructurales importantes son los conos cineríticos y sus derrames lávicos, los

cuales se encuentran asociados a fracturas profundas que han permitido la extravasación de grandes paquetes de rocas ígneas. También son característicos de esta provincia hundimientos de zonas cavernosas (dolinas y poljes), debidos a la disolución de las rocas calcáreas y anhidrita.

IV. Geología del Glacis de Buenavista

IV.1 Localización y límites

El Glacis de Buenavista queda comprendido casi en su totalidad dentro del estado de Morelos y una pequeña parte en el estado de México. La fracción norte, ocupa aproximadamente la mitad del territorio municipal de Cuernavaca y pequeñas porciones del municipio de Ocuilán, estado de México. La parte sur, incluye prácticamente todo el municipio de Temixco y pequeñas áreas de los municipios de Miaatlán y Xochitepec. Su mayor longitud es de 27.35 km, con una amplitud de 16 km. La superficie total del Glacís es de 253.504 km², lo cual destaca su importancia geohidrológica. Dicho territorio se ubica geográficamente entre los paralelos 18.778 y 19.0087 de Latitud Norte y los meridianos 99.2063 y 117.3685 de Longitud Oeste.

IV.2 Fisiografía

Fisiográficamente, el Glacis se encuentra en el límite Sur de la subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac perteneciente al Eje Neovolcánico. Su origen y evolución se encuentran íntimamente ligados a la erosión del macizo andesítico de Zempoala y los depósitos laháricos de la Sierra de Ahuatenco, así como por el aporte de flujos piroclásticos (nubes ardientes) y cenizas volcánicas de composición intermedia a básica que se extienden principalmente en la fracción Norte de su superficie y que localmente se les conoce como “Tepetate”.

IV.3 Geomorfología

El Glacis está integrado por una serie de depósitos apilados al pie de las sierras de Zempoala y Ahuatenco, que se extienden en dirección Sureste y que en conjunto forman un extenso abanico aluvial caracterizado por más de un centenar de barrancas (ver *Tabla No. 1*) que se alternan con alargados lomeríos o interfluvios que acusan una ligera pendiente en la misma

dirección. Dentro de este territorio se distinguen siete microcuencas tributarias del río Apatlaco, según se muestra en la *Figura No. 4*

Tabla No. 1

RESUMEN DEL CATÁLOGO DE BARRANCAS GLACIS DE BUENAVISTA, MUNICIPIO DE CUERNAVACA				
Microcuenca	Área (km ²)	No. de barrancas	Longitud total (km)	Long. Barrancas Cuernavaca (m)
Tembembe	6.27	1	46.00	1.50
Cuentepec	31.20	71	225.26	105.21
El Limón	16.00	18	75.79	45.48
Los Arquillos	0.95	2	6.57	2.44
Panocheras	8.85	10	45.84	18.24
Río del Pollo	67.18	75	102.50	102.50
Suma	130.45	177	501.96	275.37

Fuente: Datos obtenidos a partir de SIG y datos vectoriales del INEGI, Esc. 1:50, 000.

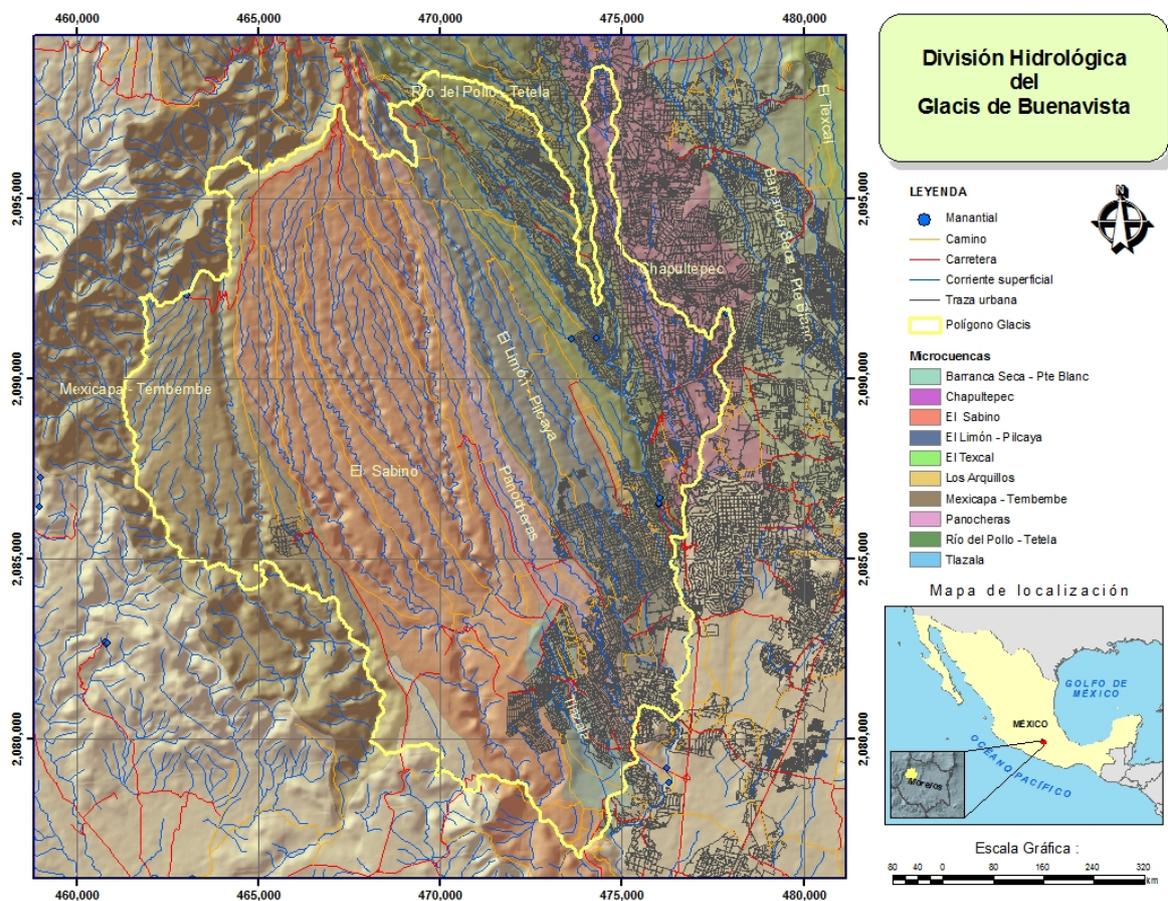


Figura No. 4 Microcuencas del Glacis de Buenavista

La combinación de los diversos agentes erosivos, tales como: gelifracción, torrentes de montaña, deslizamientos y corrientes de lodo, asociados a cambios de regímenes climáticos y eventos volcánicos, le han conferido el relieve característico que lo destaca dentro de la región. En las Figuras 5 y 6, se pueden observar las fuentes de que dieron origen al Glacis y su relieve característico.



Figura 5. Abanico aluvial compuesto, derivado de los procesos erosivos que han actuado sobre la vertiente sur de la Sierra de Zempoala, antiguo volcán cuyos rasgos apenas se distinguen. Fuente: Elaboración a partir de imagen Google Earth.

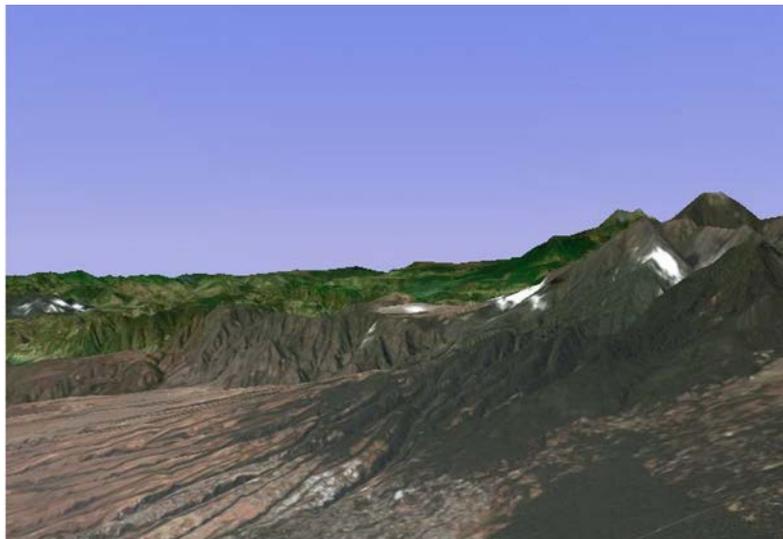


Figura No 6. Perfil del terreno donde se aprecia el accidentado pie de monte de la vertiente austral de la sierra de Zempoala, el cual está constituido por lava y ceniza andesítica cuyo ángulo de reposo configura una fuerte pendiente. La proyección de los depósitos volcánicos dan una idea de la magnitud que alcanzó este antiguo estrato-volcán. Fuente: Formada a partir de imágenes de Google Earth

Su estructura aluvial, en apariencia llana, esconde en realidad una estratigrafía muy compleja, la cual deriva de una serie de eventos geológicos que han generado una intrincada secuencia sedimentaria con características petrográficas muy heterogéneas. Así, en esta serie de depósitos, se intercalan horizontes de granulometría muy gruesa y pobre selección, con gravas y arenas limpias. La forma de los clastos es generalmente redondeada, aún que no es raro encontrar también formas angulosas.

Otra característica notable se refiere al visible traslape entre los depósitos, lo que indica la ocurrencia de diferentes eventos sedimentarios (*Figura No. 7*).

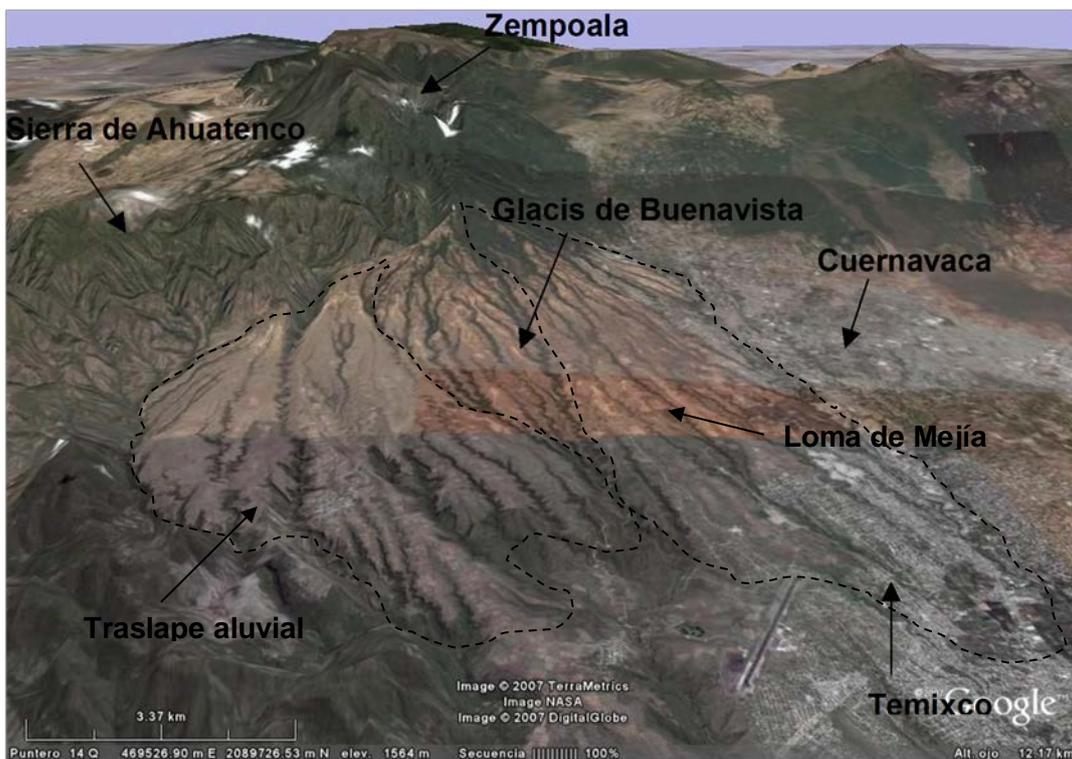


Figura No. 7 Geomorfología del Glacis y traslape de depósitos aluviales. Fuente: Formada a partir de imagen Google Earth.

IV.4 Estratigrafía del Glacis

Hasta la fecha no hay un acuerdo general sobre el origen y edad del Glacis de Buenavista dado que algunos autores como Ortiz (1977), sitúan el límite cronológico del Glacis en el Holoceno, debido a la presencia de interestratificaciones lávicas dentro de la formación, por

lo que las considera equivalentes tanto en composición como en edad, a las del Grupo Chichináutzin, pudiendo incluso corresponder al mismo grupo. Palacio-Prieto (1982) menciona que se le atribuye una edad pliocénica, asignada particularmente por la presencia de osamentas de mastodontes. Mooser et al., (1996) asocian el origen de esta formación con el de las Sierras Mayores (Sierra de Las Cruces y Nevada); de acuerdo con estos autores, estas meso-estructuras están definidas por la Formación Tarango, y se caracterizan por la creación de extensos abanicos volcánicos compuestos por flujos piroclásticos de composición intermedia a ácida, capas de pómez, depósitos fluviales y paleosuelos. Por su parte Fries (1954) le asigna una edad Pliocénica, subrayando la falta de correspondencia con la época glacial y sugiere un origen relacionado con el movimiento de grandes masas de derrubios, transportados principalmente dentro de un medio acuoso.

Posiblemente la mayoría de las opiniones antes mencionadas se aproximen en mayor o menor grado a la realidad, pero evidencian la falta de un estudio detallado que permita la comprensión de su origen y estructura.

Partiendo de las observaciones geológicas registradas en campo, y siguiendo el orden cronoestratigráfico acostumbrado, se puede establecer la siguiente secuencia estratigráfica dentro del Glacis:

Formación Xochicalco (Kix).- Localizada en el límite Sur y Sur-poniente del Glacis, así como pequeños relictos que muestran echados verticales en la barranca Bedolla. Lo anterior sugiere un alto estructural o pilar tectónico cubierto casi en su totalidad por la Formación Cuernavaca.

Formación Morelos (Ksm).- Se localiza en una franja que se extiende en el límite Sur-poniente del Glacis, principalmente cerca de la localidad de Cuentepec, donde existe además un sistema kárstico en apariencia extenso.

Grupo Balsas (Teob).- Pequeño afloramiento constituido por estratos de arenisca visiblemente inclinados, sobre la margen izquierda de la barranca El Sabino, en la confluencia con la barranca Bedolla.

Riolita Tilzapotla (Tot).- Localizada a lo largo de 500 m aproximadamente, aguas abajo de la cascada de Cocotzina, sobre el cauce de la barranca El Sabino. La roca expuesta muestra

un intenso fracturamiento casi vertical y se encuentra cubierta por diversas unidades litológicas que comprenden desde brechas y gravas polimícticas hasta coladas de basalto (cascada Cocotzina) y aluvión reciente

Formación Tepoztlán (Tomt).- Ocupa la accidentada sierra cercana a la localidad de Ahuatenco que se extiende de Noreste a Suroeste, en el límite Noroccidental del Glacis. También se observó esta formación en algunos relictos localizados en la barranca El Salado y la parte norte de las barrancas La Tilapeña y Atzingo. Cabe mencionar que dentro de la gran variedad de depósitos que integran a la Formación Cuernavaca se encontraron grandes bloques de la Formación Tepoztlán que pueden inducir a suponer que constituyen un afloramiento de la citada formación, pero que por su posición que acusa una fuerte inclinación, descarta tal hecho.

Andesita Zempoala (Tmpz).- Formación localizada en el vértice Norte del Glacis, integrada por lapilli y derrames andesíticos que forman un relieve empinado con facetas triangulares, típicas del flanco de un edificio volcánico de grandes proporciones. Los depósitos vulcanoclásticos están formados por grava y arena finas muy sueltas, que muestran una fuerte inclinación hacia el sur de acuerdo con el ángulo de reposo del material (camino Cuernavaca-Ocuilan). Los derrames de lava le confieren formas bulbosas y muy escarpadas al terreno, notándose un fuerte fracturamiento casi vertical que afecta a las rocas y que le proporciona una apreciable permeabilidad secundaria que no ha sido considerada.

Volcánico No Diferenciado (Tim).- Formado por brechas volcánicas y coladas lávicas de composición basáltica principalmente, que cubren a la Riolita Tilzapotla y que se encuentran interestratificadas con conglomerados arenosos y brechas monomícticas de la Formación Cuernavaca, en una posición cercana a la base de esta última formación. Dentro de la mencionada unidad, también se ha considerado el afloramiento situado en el cerro de Mazatepetongo, de composición dacítica, el cual sobresale dentro del Glacis en la cercanía del la localidad de la Unión. Los derrames basálticos mencionados han dado lugar a dos singulares cascadas localizadas dentro de la zona: Acatzingo (Arroyo Salado) y Cocotzina (El Sabino), cuyo deterioro lamentablemente crece día a día.

Formación Cuernavaca (Tpc).- Unidad que cubre la mayor parte de la superficie del Glacis y que se encuentra formada por una sucesión de depósitos cuya granulometría, forma y

selección es muy variada, pero cuya composición es casi exclusivamente andesítica. Dentro de esta formación es muy común encontrar lentes de grava y arena que pueden abarcar varios metros, así como estratificación cruzada, corrientes de lodo interestratificadas, paleosuelos y abundantes huellas fósiles (barrancas: El Sabino, La Tilapeña, Bedolla, El Cerro y Río del Pollo, entre otros). La erosión diferencial que ha actuado sobre los lentes areno-gravosos, dada su pobre consolidación, ha originado numerosas cavidades en las paredes de las barrancas que pueden internarse una decena de metros e indican los cambios en el patrón de drenaje que antiguamente era transversal al actual (paleocanales).

La erosión diferencial que actúa sobre esta unidad le confiere una apariencia similar a la Formación Tepoztlán, por lo que algunos autores la asignan equivocadamente a dicha formación, pudiéndose diferenciar de esta última por su composición monomítica, grado de compactación, ausencia de cementación y fracturamiento, así como el ligero buzamiento hacia el Sur, contrario al que acusa la Formación Tepoztlán. En su porción Norte, los depósitos descritos se encuentran cubiertos parcialmente por una capa de toba (denominada en general como Tepetate), de coloración rojiza muy característica, e incluso depósitos piroclásticos (nube ardiente) que incluyen grandes bloques andesíticos y dacíticos muy alterados, indicadores de una violenta actividad volcánica al final de la formación del Glacis.

Grupo Chichináutzin (Qbcb, Qtob, Qbc, Qtc).- Formación que se extiende a partir del límite oriental del Glacis y que se encuentra constituida por derrames basálticos y traquibasaltos, intercalados con material piroclástico de la misma composición, así como los conos cineríticos que sobresalen sobre la planicie volcánica; tales como los cerros: La Herradura, Tezontepec, El Tezontle y el sistema volcánico de Palmira, entre otros. Esta unidad sobreyace a todas las formaciones descritas anteriormente, cubriendo principalmente a la Formación Cuernavaca, cuyos bajos topográficos preexistentes como barrancas y hondonadas, fueron sepultados por fluidas corrientes de lava. Cabe destacar que los manantiales más importantes de Cuernavaca, como son los de Chapultepec, El Túnel y antiguamente los de Tlaltenango, La Selva, Tezontepec y Amatitlán, se localizan precisamente en el contacto entre ambas formaciones. También es importante hacer mención la notable correspondencia que existe entre los pozos más productivos y su localización dentro de la zona cubierta por las rocas volcánicas del Grupo Chichináutzin.

Depósitos recientes (Qal, Qc).- Formados por suelos residuales y sedimentos aluviales recientes, que sustentan el estrato arbóreo y ocupan los cauces de las barrancas, respectivamente.

En la *Figura No. 8* se muestra la distribución de las diferentes unidades litoestratigráficas descritas y la sección geológica inferida de acuerdo con los datos recopilados en campo y a través de referencias bibliográficas.

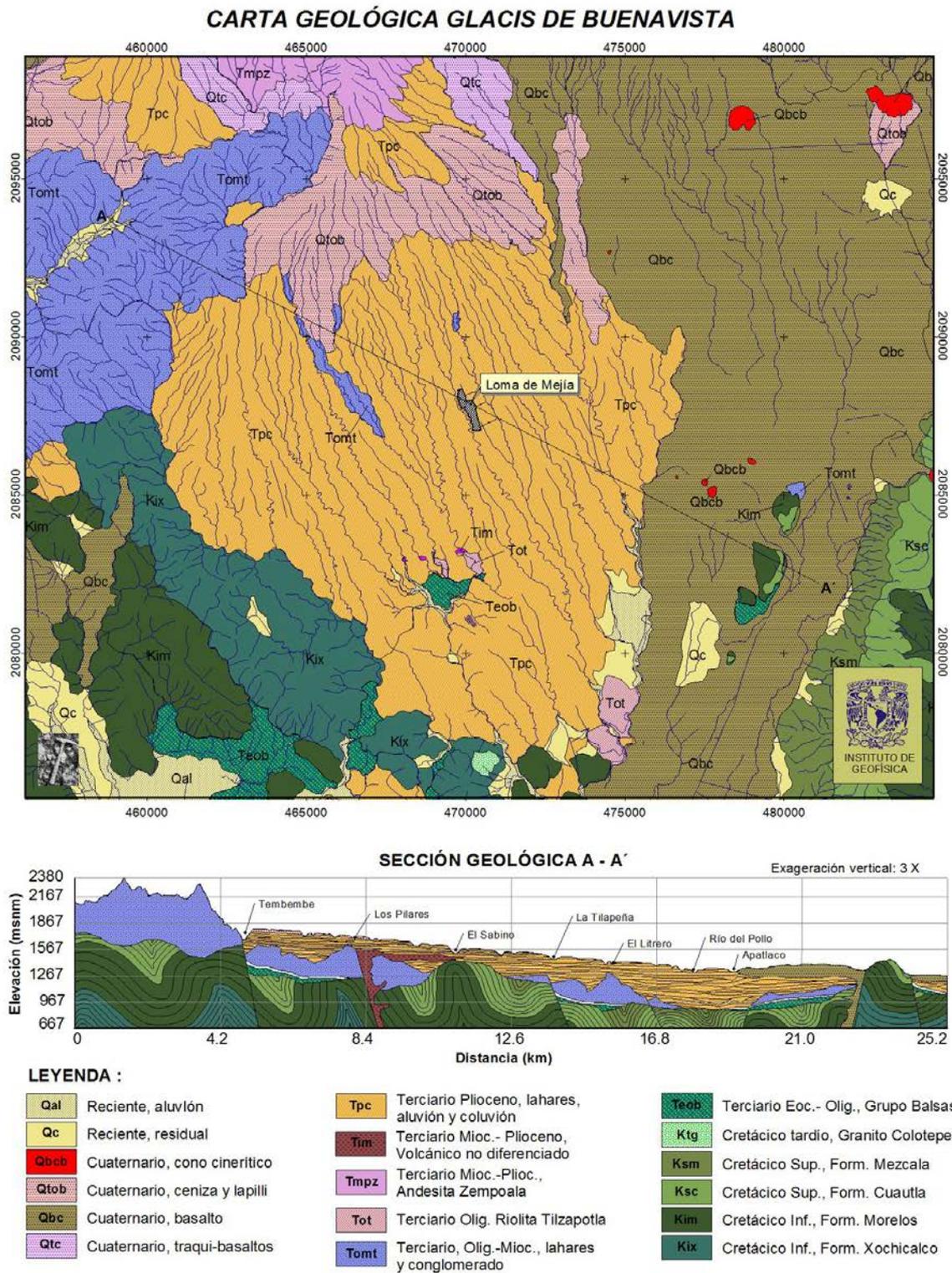


Figura No. 8. Carta Geológica del Glacis de Buenavista y Valle de Cuernavaca. Fuente: Formada a partir de reconocimientos geológicos, sondeos geoelectricos (TACSA, 1985) y datos vectoriales del INEGI.

V. Evaluación hidrogeológica del sitio Loma de Mejía

V.1 Localización y límites

El terreno en estudio se localiza dentro del Glacis de Buenavista, al poniente de la ciudad de Cuernavaca, en las inmediaciones del límite que divide a los municipios de Cuernavaca y Temixco. El sitio de disposición final abarca 48 Ha según el proyecto original y su régimen es de carácter ejidal, por lo que se ubica dentro de las tierras del Ejido de San Antón.

Sus límites son: al sur con la barranca La Colorada y parcela ejidal, al oriente con camino de terracería, al norte con parcelas del mismo ejido y al poniente con la barranca La Colorada. Geográficamente queda comprendido dentro de las coordenadas UTM: 2'088, 878 y 2'090, 068 de latitud norte; y 470, 701 a 471, 524 de longitud oeste (*Figura No 9*).

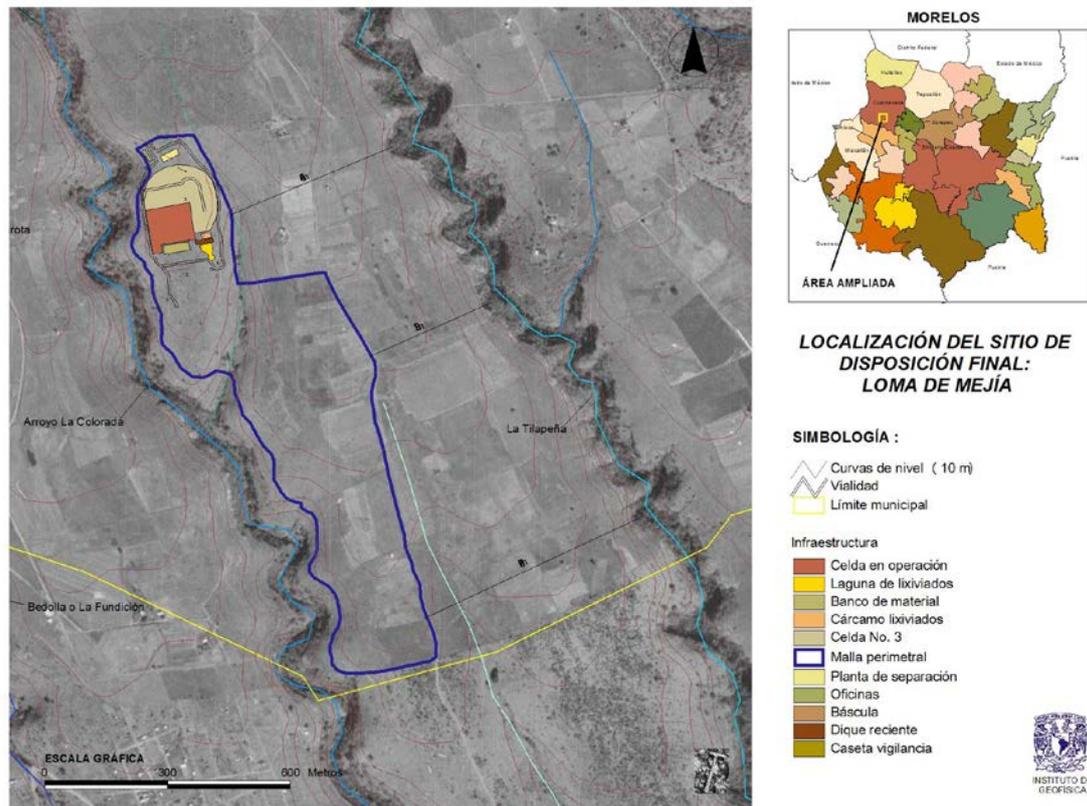


Figura No. 9 Fuente: Formado a partir de datos vectoriales del INEGI y Ortofoto Esc. 1:50, 000.

V.2 Geomorfología local

El sitio de disposición final se encuentra emplazado dentro de una pequeña loma denominada Loma Blanca, la cual semeja un pequeño apéndice del interfluvio principal conocido como Loma de Mejía. El relieve es ligeramente convexo y está seccionado por dos profundas barrancas, La Colorada y La Tilapeña situadas al poniente y oriente, respectivamente, conformando un alargado interfluvio de aproximadamente 700 m de ancho por 7 km de longitud, que comprende parte de los municipios de Cuernavaca y Temixco (*Figura No. 10*).

La pendiente del lomerío descrito muestra una ligera inclinación hacia el Sureste y su topografía característica corresponde con la composición litológica de los depósitos acumulados, que como ya ha sido mencionado, se componen de capas donde se intercalan horizontes de granulometría y compactación muy diversa. El amplio desarrollo de barrancas pone de manifiesto la erodabilidad de los depósitos del Glacis, donde predominan dos tipos de geometría en el drenaje superficial; en primer término muestra un patrón ligeramente curvado que bisecta las capas más superficiales de la serie sedimentaria, iniciando a partir de una ligera depresión o talweg que es el punto de partida de la mayoría de las barrancas. Posteriormente conforme va seccionando el terreno, su curso se va volviendo más sinuoso hasta pasar a un trazo que puede ser zigzageante o de amplios meandros, que labran profundas gargantas de paredes verticales.

Este patrón de drenaje, que puede clasificarse como dicotómico, no es uniforme, ya que el trazo de los cauces pasa indistintamente de semirrectos a muy sinuosos, existiendo por lo tanto una clara correspondencia entre dicha geometría y el tipo de roca que secciona, pudiéndose establecer que existe una relación entre la sinuosidad de los cauces con la existencia de horizontes francamente arenosos (minas de arena en Temixco y Cuernavaca).

Finalmente cabe destacar que la acción denudativa de los cauces más erosivos, como es el caso de la barranca El Alguacil tributaria de la barranca El Sabino, muestran un activo proceso de captura fluvial, similar al que debe haber actuado en el pasado y que puede explicar la abundancia de paleocanales y lentes arenosos que se observan en las paredes de las barrancas.

MORFOLOGÍA DE LOMA DE MEJÍA (LOMA BLANCA)

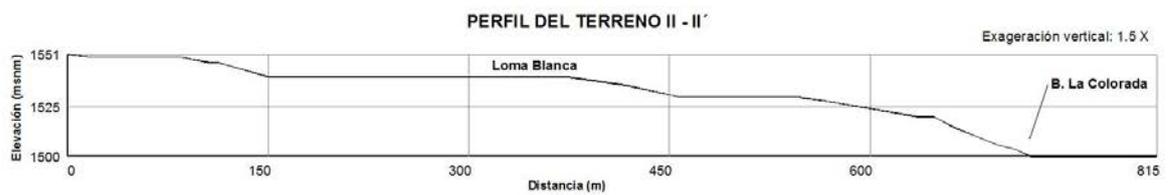
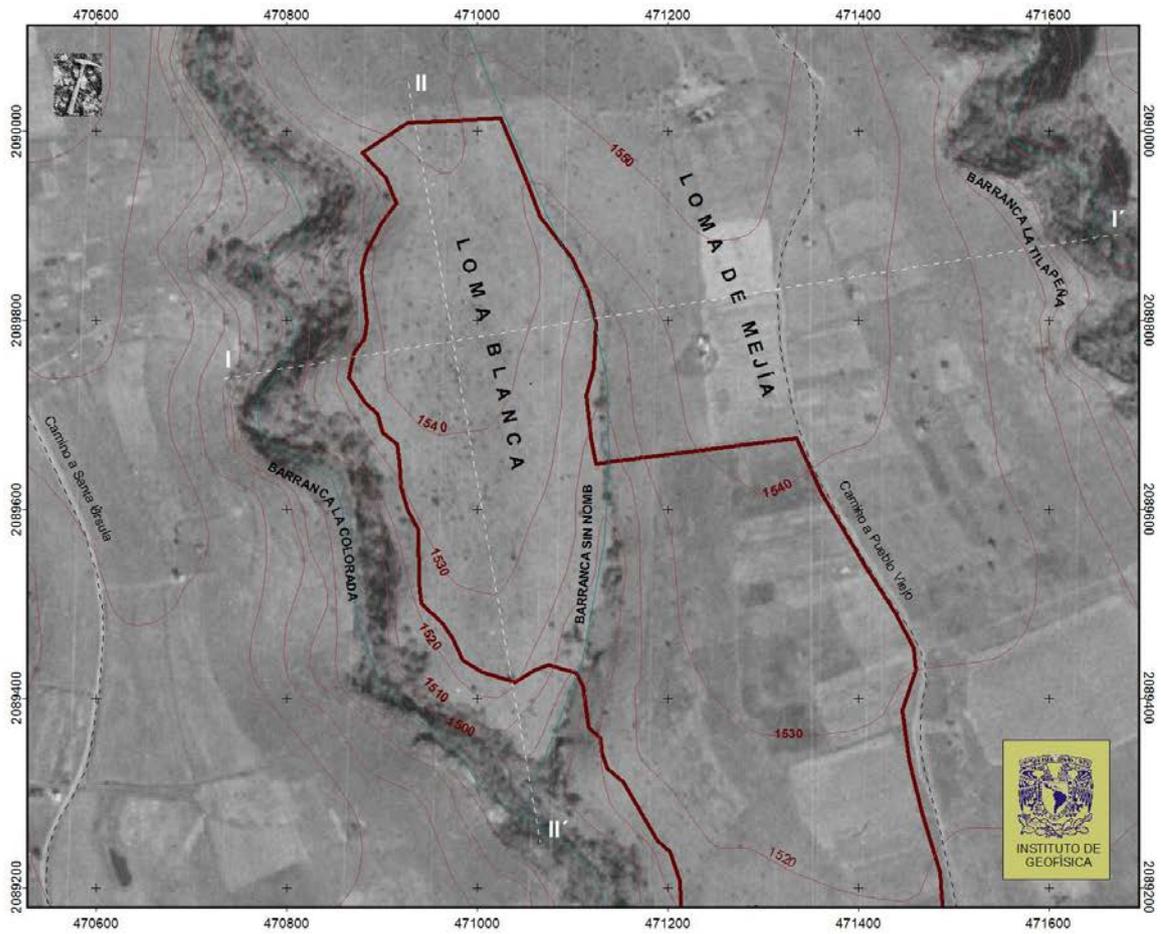


Figura No. 10 Fuente: Formada a partir de datos vectoriales y ortofoto Esc. 1: 50, 000, INEGI.

V.3 Estratigrafía de Loma de Mejía

De acuerdo con el reconocimiento geológico efectuado en el cauce de las barrancas La Colorada, Sin Nombre y La Tilapeña, así como los resultados obtenidos en cuatro sondeos eléctricos verticales ejecutados en Loma Blanca, se estableció la estratigrafía que a continuación se describe en el orden acostumbrado:

- a) Ortoconglomerado monomítico medio, de coloración ocre a gris oscuro, presenta textura matriz-soportada, donde la fracción clástica gruesa representa un 30 %; siendo de tamaño variado, desde gravas y guijarros hasta bloques mayores a un metro de diámetro. Su forma es ligeramente prolada, redondeada a subredondeada, el grado de selección es pobre y el material muestra una consolidación media a alta por lo que forma paredes casi verticales en las laderas de las barrancas. No se observa ningún cementante y su matriz está formada por arena fina a gruesa. Su composición es andesítica y el espesor observado se aproxima a los 15 metros
- b) Ortoconglomerado gravoso monomítico muy grueso, mal seleccionado de coloración crema a café claro, de textura matriz soportada por arena fina a gruesa. La fracción clástica comprende hasta un 50% y su tamaño varía de guijarros hasta grandes bloques de 1.5 m de diámetro. Los fragmentos muestran una forma aproximadamente alargada, de redondeada a subredondeada. Muestra baja compactación y forma cavidades por erosión diferencial en las paredes de las barrancas. El espesor estimado es de 16 metros.
- c) Ortoconglomerado monomítico medio, de color ocre a café oscuro, de textura matriz soportada y cierto grado de selección. Su compactación es baja por lo que forma el cambio de pendiente suave que se advierte en el límite de las barrancas. Los bloques llegan a los 0.50 m de diámetro y representan un 40 % de los clastos, mismos que en su mayoría se encuentran constituidos por guijarros, gravas y arena gruesa, todos de composición andesítica. Su espesor es de aproximadamente 6 metros.
- d) Ortoconglomerado monomítico muy grueso, contiene grandes bloques de hasta 1.5 m de diámetro, de forma ligeramente tabular, redondeada a subredondeada, y fábrica mal graduada. Los grandes bloques constituyen cerca del 30 % de los clastos y caracterizan la superficie pedregosa que se observa en la cima de las lomas. Carece de compactación por lo que tienden a formar pendientes suaves de formas convexas. Su composición es andesítica y muestran en superficie un fuerte intemperismo que

divide a los grandes bloques en “rebanadas” simétricas. Localmente tiene un espesor de 4 metros en promedio.

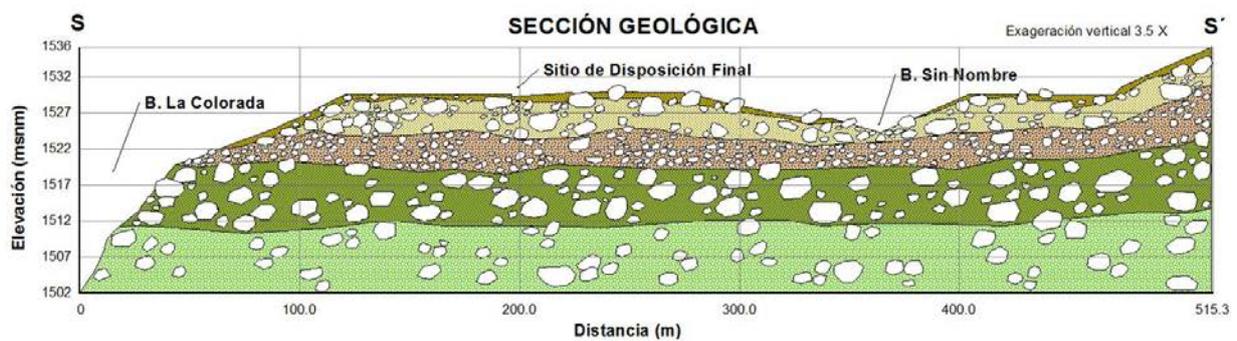
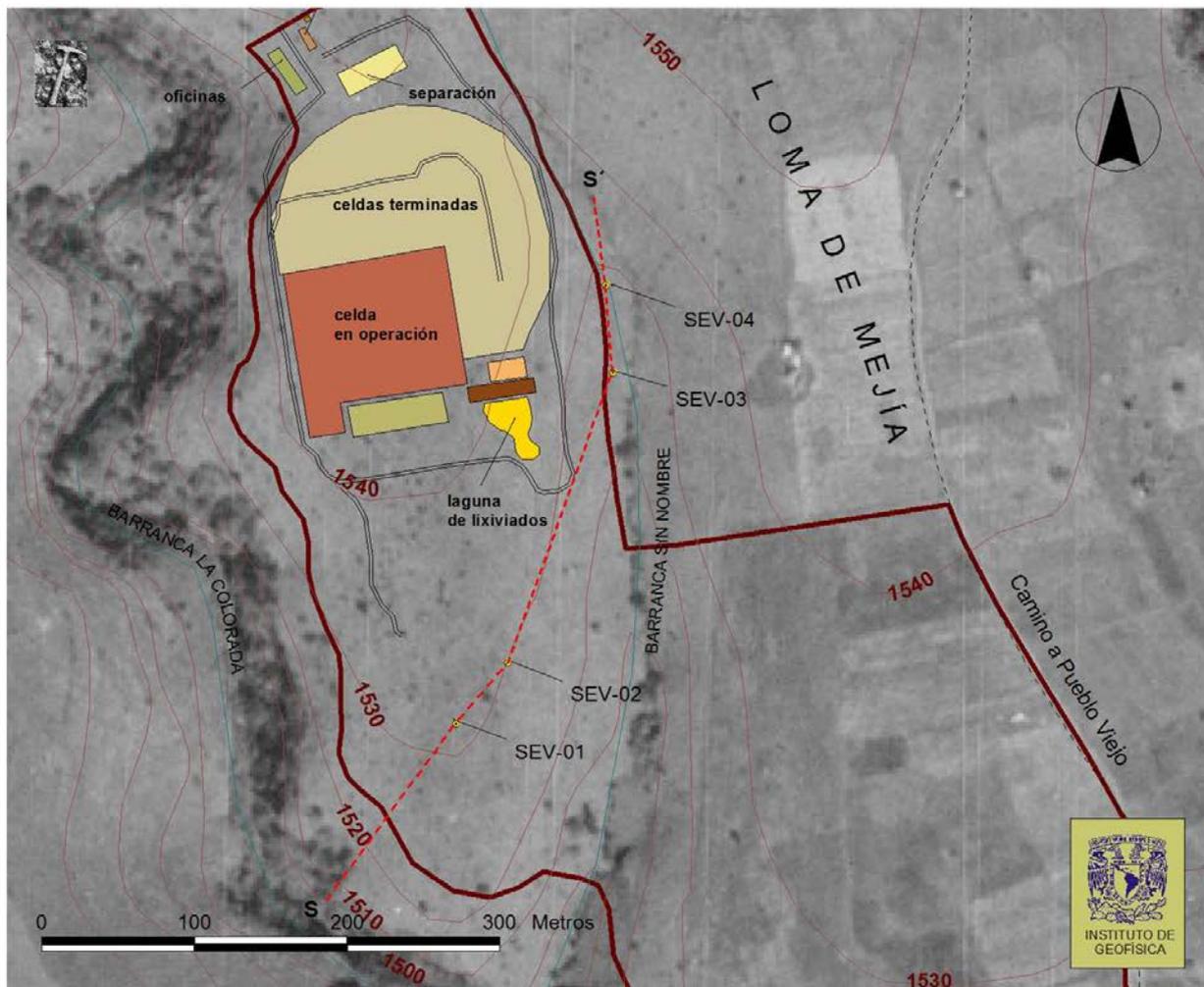
- e) Ocupando la parte superior de los depósitos descritos se encuentra una capa residual de espesor variable que sustenta a la vegetación y cultivos de la zona. Dicha cubierta es el resultado de la descomposición de los minerales que constituyen los clastos y matriz del ortoconglomerado subyacente, compuestos por feldespatos principalmente. Por lo anterior, se observa una capa arcillo-arenosa que llega hasta los 0.50 m de espesor y que soporta guijarros y gravas andesíticas muy alterados de coloración crema a café claro.

Las litofacies descritas indican dos procesos deposicionales principales: flujos detríticos y flujos no confinados (debris flows y sheet flows). Un flujo de detritus ocurre cuando sedimentos saturados de agua (que comprenden desde bloques hasta arcilla), se mueven en masa y se depositan rápidamente sin formar una estratificación bien definida, incluyendo ocasionalmente una graduación inversa. La alta energía de estos flujos permite transportar grandes bloques, como los observados en Loma de Mejía, donde predomina una clasificación polimodal (varios tamaños) y la posición de los clastos es desordenada.

Los flujos no confinados se extienden lateral y longitudinalmente, presentando clastos redondeados, mejor seleccionados. Pueden ser clasto o matriz soportados y frecuentemente presentan intercalaciones de limos y arcillas. En las barrancas más profundas, tales como La Tilapeña, pueden encontrarse este tipo de litofacies en las paredes expuestas, lo cual indica una alternancia en la deposición de flujos detríticos y no confinados que reflejan fuertes cambios climáticos y movimientos tectónicos relativamente recientes.

En la *figura No. 11*, se muestran las litofacies descritas, así como su textura representativa donde prevalecen los flujos detríticos.

SECCIÓN GEOLÓGICA Y ESTRATIGRAFÍA, SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL LOMA DE MEJÍA



COLUMNA ESTRATIGRÁFICA :

- | | |
|---|---|
|  Suelo residual |  Conglomerado gravoso grueso, compactación media |
|  Conglomerado arenoso suelto grueso |  Conglomerado arenoso, compactación media |
|  Conglomerado arenoso medio, ligera compactación |  Clastos andesíticos |

Figura No. 11 Fuente: Elaborado a partir de datos de campo y ortofoto Esc. 1: 50, 000, INEGI.

V.4 Pruebas de permeabilidad “In Situ”

Las pruebas de permeabilidad en campo son muy usadas en la hidráulica de captaciones y consisten esencialmente en la perforación de pozos dentro del material que se desea ensayar, proporcionando un valor de la permeabilidad media del estrato en estudio. Dicho método se fundamenta en la observación de los abatimientos del agua o líquido dentro de un barreno de dimensiones conocidas, en un tiempo determinado y en suelos no saturados.

Con los registros de los abatimientos y los tiempos correspondientes a cada nivel del líquido, se obtiene la permeabilidad media del suelo aplicando la ecuación experimental del Cuerpo de Ingenieros de U.S. Army (para diámetros uniformes), mostrada a continuación:

$$K_m = \pi \cdot D / 11 \cdot (t_2 - t_1) \ln H_1 / H_2$$

Donde:

K_m = Coeficiente de permeabilidad media (cm/s)

D = Diámetro del sondeo (cm)

H_1 = Carga piezométrica $t = t_1$ (cm)

H_2 = Carga piezométrica $t = t_2$ (cm)

t = Tiempo (s)

Dado que la velocidad es una relación lineal entre la distancia recorrida por el fluido y el tiempo empleado, de la curva obtenida se advierten varios segmentos, los cuales representan las velocidades de humedecimiento, saturación y transporte; el último de éstos corresponde al valor de la permeabilidad media “ K_m ” del suelo. Con el fin de obtener el valor más representativo de K_m , se repitieron varias pruebas o se extendió el tiempo de prueba en el mismo barreno hasta obtener una función aproximadamente lineal.

Los sitios seleccionados para la realización de las pruebas señaladas se localizaron dentro del sitio de disposición final, buscando caracterizar la permeabilidad de los siguientes tipos de suelo (*figura No. 12*):

- a) El material arenoso que se utiliza normalmente en la cobertura diaria de los residuos
- b) La cobertura final de las celdas terminadas
- c) El basamento de la celda en operación
- d) El suelo de la laguna para captación de lixiviados excavada en el terreno natural

Cabe mencionar que en todos los casos el material había sido compactado con un tractor oruga D8.

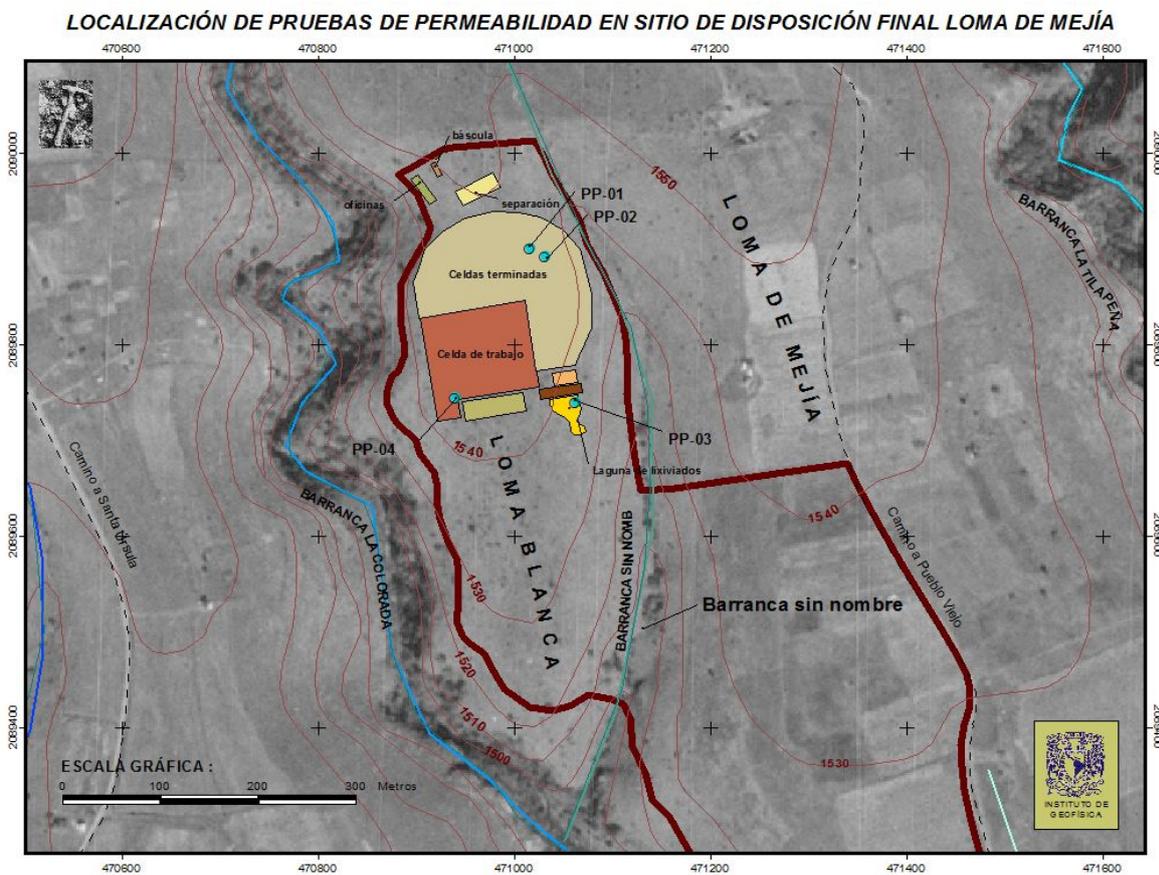


Figura No. 12 Fuente: Formado a partir de datos vectoriales, ortofoto Esc. 1: 50, 000, INEGI y levantamiento con GPS autónomo.

El resultado de las pruebas mencionadas se presenta a continuación:

En resumen, las conductividades promedio obtenidas en campo son las siguientes (Tabla No. 2) :

Tabla No. 2 Permeabilidades promedio obtenidas en pruebas de campo

Conductividad hidráulica calculada "IN SITU" para suelos representativos del relleno sanitario Loma de Mejía				
No. Prueba	Tipo de suelo	k_m (cm/s)	k_m (m/día)	k_m (m/año)
PP-01	Areno-gravoso	2.16×10^{-3}	1.8707464	682.8224373
PP-02	Arcillo-arenoso con grava	8.54×10^{-4}	0.73797	269.359049
PP-03	Arcillo-limoso	3.35×10^{-4}	0.2895626	105.6903618
PP-04	Areno-gravoso	2.7×10^{-3}	2.3314481	850.9785689

Fuente: Obtenida a partir de pruebas de permeabilidad "in situ"

Según los datos mostrados en la tabla anterior, las conductividades hidráulicas más altas se presentan en el material de cobertura diaria y piso de la celda de trabajo, aún considerando que han sido compactados por medios mecánicos. Las permeabilidades más bajas se obtuvieron en el material arcillo-arenoso que se utiliza para la cobertura final de las celdas terminadas y el fondo de la laguna de lixiviados.

Aplicando la Ley de Darcy, donde :

$$Q = K \cdot A \cdot (dh / dl)$$

Siendo:

Q = Volumen de agua drenada a través de la muestra por unidad de tiempo ($m^3/día$)

K = Conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad (m/día)

A = Sección transversal donde se infiltra el lixiviado (m^2)

(dh / dl) = Gradiente o carga hidráulica (m/m)

Se desprende que en el caso de la laguna de lixiviados, cuya superficie es de aproximadamente $1,000 m^2$ y suponiendo un tirante de 1 m de acuerdo con lo observado en

campo; se tendría una infiltración de 289.56 m³/día, considerando la conductividad hidráulica obtenida en las pruebas.

De igual forma, en el caso del fondo de la celda de trabajo y asumiendo un porcentaje de fallas en la geomembrana del 1% por hectárea (geomembrana de alta calidad, según Vector Engineering Inc.), con un tirante de sólo 10 cm de lixiviados, su tasa de infiltración sería de 233.14 l/día/ha. En la *Tabla No. 3* se resumen los datos de desempeño de geomembranas publicados por la literatura especializada.

Tabla No. 3 Tasa de fuga en geomembranas

TASA DE FUGA EN GEOMEMBRANAS (Litros / Ha / día)				
Carga (m)	Alta calidad	Calidad promedio	Baja calidad	Arcilla (1 m de espesor)
1	6	37	79	864
5	35	208	446	4, 320
10	86	503	1.077	8, 640
20	230	1, 350	2, 894	18, 280

Fuente: Geomembranas para embalses de relaves (presas de jales). Abigail Beck, PE, Mark Smith, PE & Kristin Sample. Vector Engineering Inc.

Finalmente, considerando una superficie de una hectárea, que comprende la celda que se encuentra en operación y asumiendo una precipitación efectiva de 10 mm, se tendrían 23.31 m³ de agua percolada dentro de los residuos, considerando la cobertura arenosa utilizada; y 7.38 m³, en el caso de una cobertura final compuesta de arcilla arenosa compactada.

V.5 Sondeos eléctricos verticales

Debido a que no existen pozos de monitoreo dentro del sitio de disposición final, se programó la ejecución de cuatro sondeos eléctricos verticales, cuyo objetivo fue determinar si existían evidencias de migración de lixiviados en el subsuelo, considerando que una de las razones por las que se presenta la conductividad eléctrica dentro de las rocas, es la presencia de fluidos conductores dentro de sus poros, fisuras y fracturas.

Según lo expuesto y debido a la avanzada temporada de estiaje, la presencia de bajas resistividades (inverso de la conductividad) en el subsuelo a profundidades someras, constituyen un claro indicador de la difusión de lixiviados fuera de las celdas de confinamiento. Lo anterior se desprende de las características litoestratigráficas ya descritas, que definen cambios de permeabilidad en sentido vertical, de tal suerte que, existe una componente horizontal significativa en el flujo hidráulico.

Para la obtención de resistividades aparentes en campo se utilizó el arreglo Schlumberger, que consiste básicamente en la colocación de cuatro electrodos dentro del terreno, dos de ellos se utilizan para inyectar corriente (AB) y los otros dos para medir la diferencia de potencial (MN). El equipo utilizado se llama resistivímetro y se coloca en el centro del arreglo (O), según se aprecia en la *figura No. 5.5*

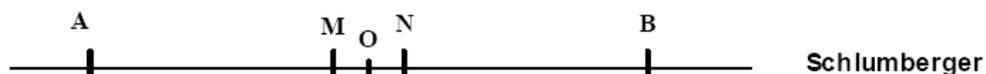


Figura No. 5.5 Arreglo electródico tipo Schlumberger

Existen varias estrategias para deducir la estructura del subsuelo con una serie de medidas sucesivas de resistividad aparente. Una de ellas es el mantener el punto central (O) y se va abriendo sucesivamente la distancia AB, por lo que la corriente eléctrica atravesará cada vez a mayor profundidad. Los sucesivos valores de resistividad aparente que se van obteniendo corresponden a profundidades cada vez mayores. En el caso de estudio se determinó una apertura máxima de $AB/2 = 100$ m, lo cual proporciona una profundidad de investigación aproximada de 30 m.

La ubicación y distribución de los sondeos eléctricos verticales (SEV's) se muestra en la *Figura No. 13* El equipo utilizado durante el levantamiento geoelectrico fué un resistivímetro Syscal R1 Plus marca IRIS con las siguientes especificaciones:

- Transmisor
 - o Resolución: 10 μ A
 - o Precisión: 0.3 %
 - o Máxima salida de corriente: 2.5 A
 - o Máxima salida de voltaje: 600 V
 - o Máxima salida de potencia : 200 W
 - o Duración del pulso: 0.5 s, 1 s y 2 s

- Receptor
 - o Especificaciones de la medición de voltaje:
 - Resolución: 1 μ V
 - Convertidor A/D: 20 Bit
 - Precisión: 0.3 %
 - Impedancia de salida: 10 Mohms
 - Rango de salida de voltaje: \pm 10V

La georeferenciación de cada uno de los sondeos se realizó con un GPS Autónomo marca Garmin con la opción habilitada WAAS (Wide Area Augmentation System) para mejorar la precisión. Los puntos georeferenciados se muestran en la siguiente tabla (*Tabla No. 4*):

Tabla No. 4

Localización de sondeos eléctricos verticales, Coordenadas UTM, DATUM WGS84		
Punto	Coordenadas UTM	
	X	Y
SEV 1	471,018	2,089,532
SEV 2	471,052	2,089,572
SEV 3	471,121	2,089,763
SEV 4	471,116	2,089,821

LOCALIZACIÓN DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES EN SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL LOMA DE MEJÍA

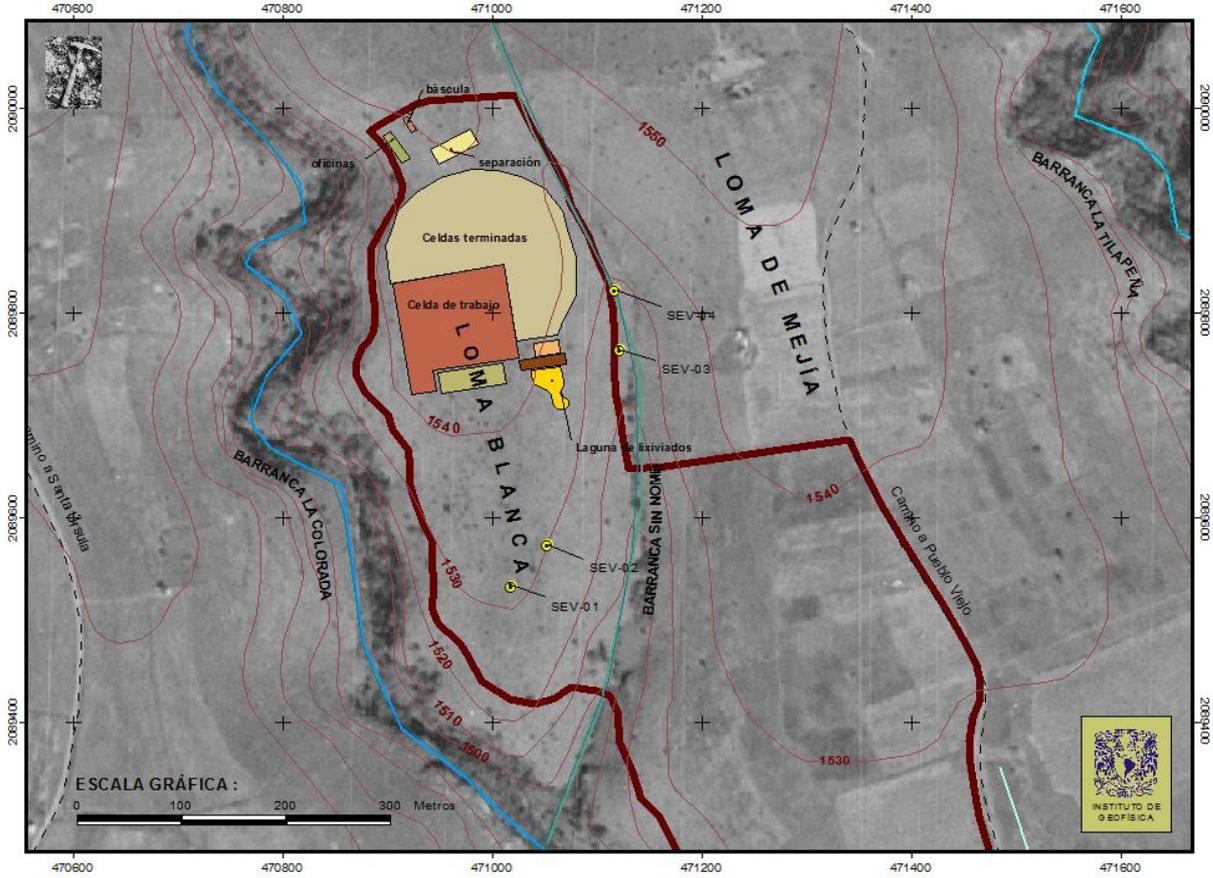


Figura No. 13 Localización de sondeos eléctricos verticales (SEV's)

A continuación se muestran los datos obtenidos en campo. $AB/2$ se indica en metros y ρ_a (resistividad aparente) se indica en ohm/m (Tabla No. 5).

Tabla No. 5

Registro de resistividades aparentes en sondeos eléctricos verticales, sitio: Loma de Mejía				
AB/2 (m)	Resistividad aparente ρ_a			
	SEV1	SEV2	SEV3	SEV4
1.0	73.3	67.8	53.8	161.7
1.5	73.9	101.5	43.4	129.2
2.0	76.3	117.0	44.9	107.5
3.0	130.4	165.9	61.7	126.7
4.5	153.4	176.6	88.9	164.1
7.0	188.7	411.0	118.8	241.9
10.0	186.2	495.7	156.9	335.0
15.0	226.8	307.8	186.1	334.8
22.0	271.7	351.5	211.0	277.6
32.0	324.5	376.1	211.3	250.2
46.0	347.5	377.7	208.5	218.6
68.0	353.0	300.1	177.7	171.5
100.0	313.1	488.4	155.8	124.4

Para el procesamiento e interpretación en 2D de los datos se utilizó el software IPI2WIN, así como la geología expuesta en la zona de estudio para la calibración de los modelos.

A continuación se muestran los resultados del procesamiento y la inversión de datos. La curva en color negro representa la curva de campo, la roja la curva sintética y la azul el modelo de capas. En el pequeño recuadro se presenta numéricamente la cantidad de capas, las profundidades, espesores y resistividades reales (*Figuras Nos. 14, 15, 17 y 18*).

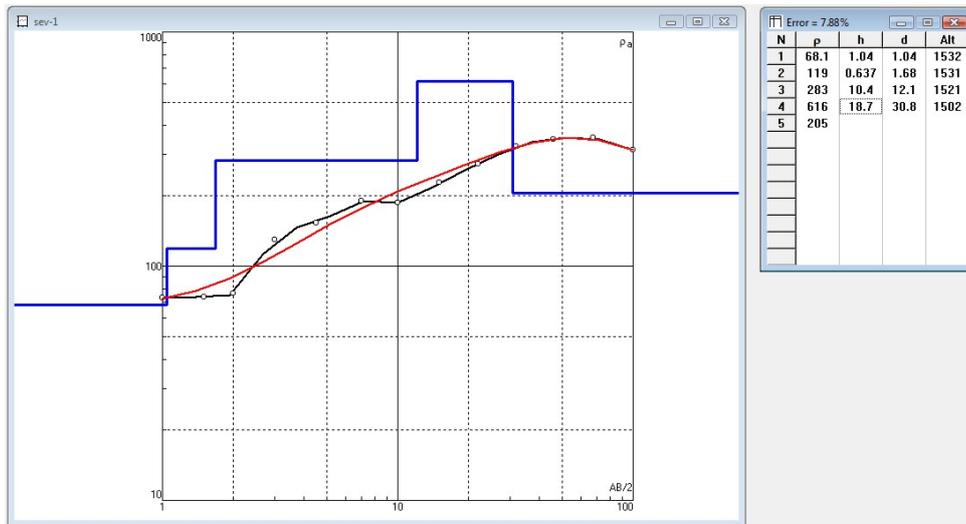


Figura No. 14 Procesamiento de datos, SEV-1

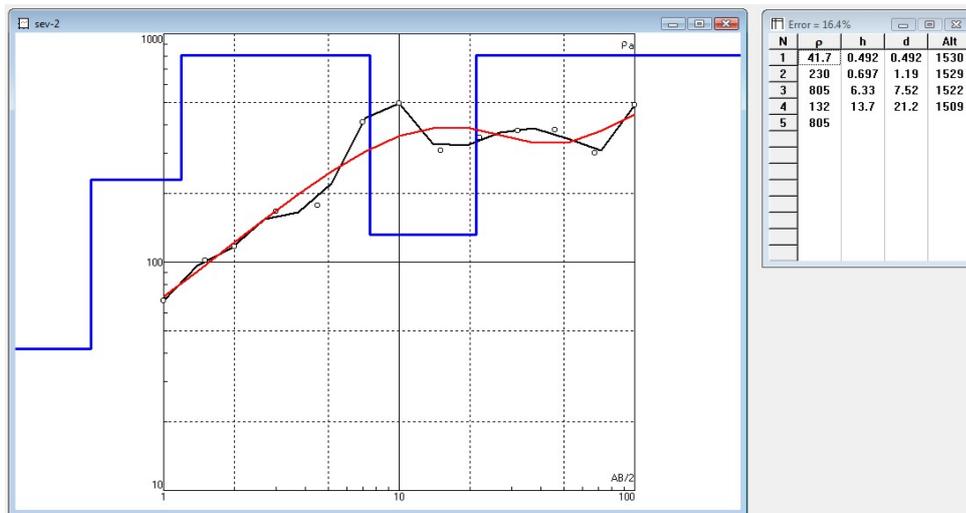


Figura No. 15 Procesamiento de datos, SEV-2

Interpretación de los sondeos geoelectricos SEV1 y SEV2

Interpolando los valores obtenidos en los sondeos anteriores, se obtiene la pseudo-sección de resistividad aparente que se muestra a continuación (Figura No. 16):

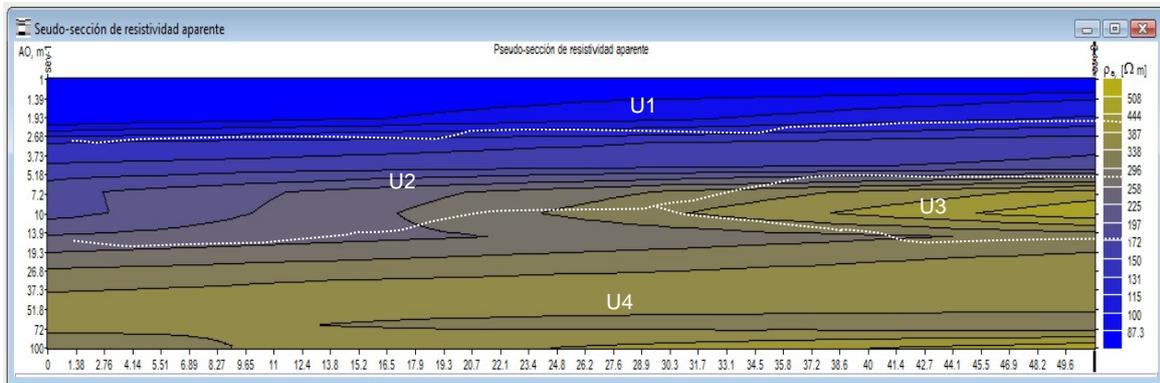


Figura No. 16 Pseudo-sección de resistividad aparente, SEV1 – SEV2

Tomando en consideración la figura anterior, los valores de resistividad real y la calibración litoestratigráfica del modelo, se determinaron las siguientes unidades geoelectricas:

U1.- Resistividades comprendidas entre 41.7–119 Ω/m . Comprende depósitos residuales producidos por la meteorización del ortoconglomerado monomítico suelto que ocupa la cima de la serie estratigráfica. Su espesor es variable y abarca desde algunos decímetros hasta más de un metro. Esta capa incluye arcillas arenosas que soportan guijarros y gravas muy alterados. Su composición es andesítica y conforman una superficie pedregosa muy peculiar donde sobresalen grandes bloques oblongos semiredondeados.

U2.- Resistividades comprendidas entre 230-283 Ω/m . Incluye capas de ortoconglomerado monomítico de baja consolidación, donde predomina la matriz arenosa sobre la fracción clástica. Su espesor es variable, pudiendo alcanzar los 10 m y parece acuñarse lateralmente o pasar a una facies sedimentaria diferente.

U3.- Resistividades de 616-805 Ω/m . Relacionadas con depósitos que contienen grandes bloques soportados por una matriz gravo-arenosa gruesa, medianamente compactados. Su espesor varía entre los 6 y 18 metros e incluye grandes cuerpos gravo-arenosos lenticulares que parecen corresponder con paleocauces sepultados.

U4.- Resistividades de 132 Ω/m . Indicativo de depósitos gravo-arenosos de granulometría menos gruesa. Subyace a las unidades anteriores y también parece interdigitada con la U3 o pertenecer a una facies sedimentaria. Su espesor es de aproximadamente 14 metros.

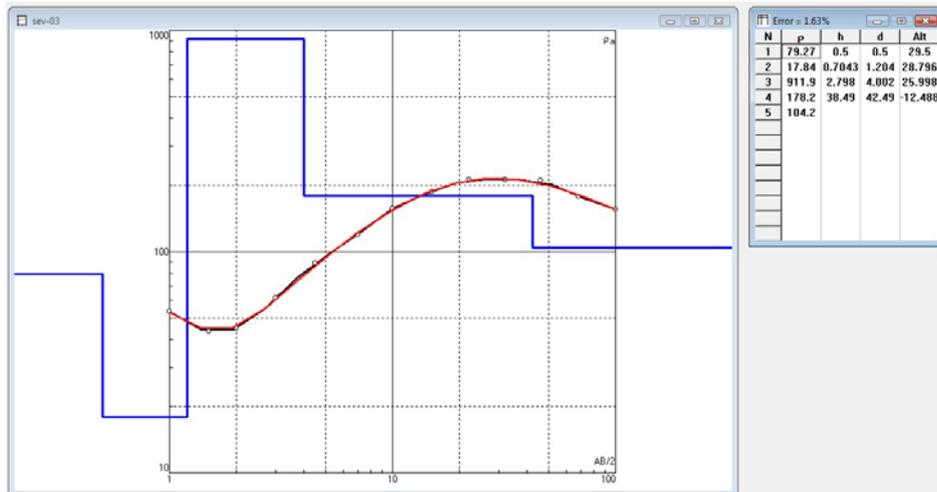


Figura No. 17 Procesamiento de datos, SEV-03

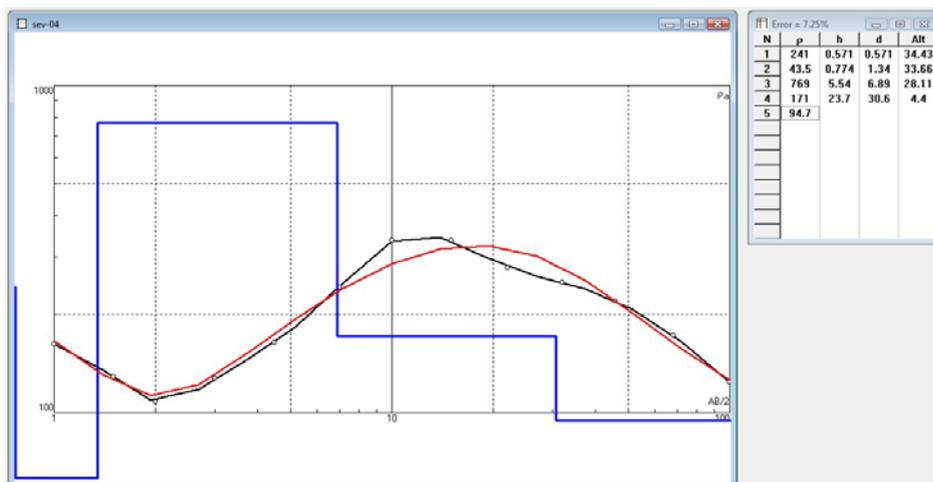


Figura No. 18 Procesamiento de datos, SEV-04

Interpretación de los sondeos geoelectricos SEV3 y SEV4

De manera similar al procedimiento anterior, se obtiene la pseudo-sección de resistividad aparente que se ilustra en la Figura No. 19

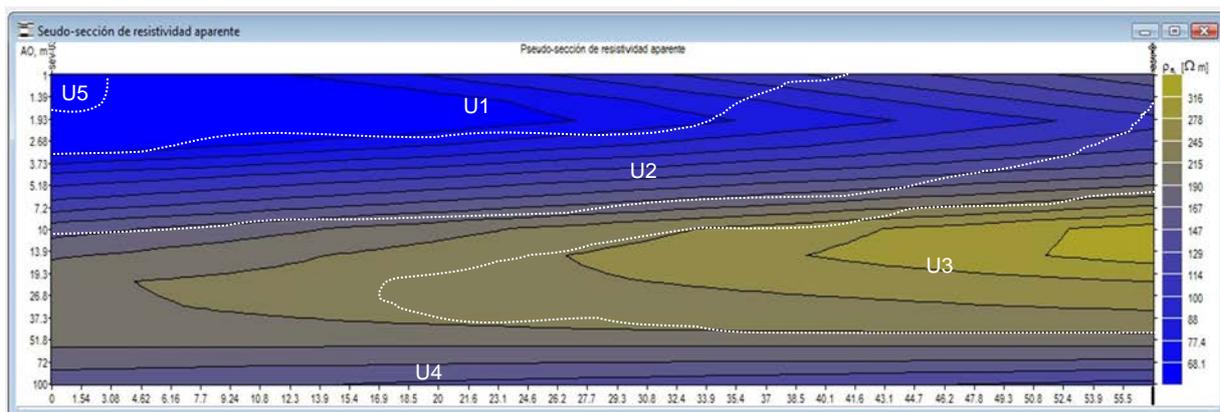


Figura No. 19 Seudo-sección de resistividad aparente SEV3 – SEV4

Siguiendo la misma metodología, se advierte una similitud con las unidades U1, U2, U3 y U4, de tal forma que:

U1.- Comprende resistividades de 43.5 a 79.27 Ω/m , equivalente a la ya descrita. Espesor de 0.5 metros.

U2.- Resistividades de 241 Ω/m . Similar a la descrita anteriormente. Espesor de 0.6 metros.

U3.- Resistividades entre 769 y 911.9 Ω/m . Equivalente a la señalada. Espesor de 2.8 a 5.5 metros.

U4.- Resistividades de 171 a 178.2 Ω/m . Equivalente a la ya mencionada. Espesor entre 23 y 38 metros.

U5.- A diferencia de los sondeos SEV1, SEV2 y SEV4; en el SEV3 se registró una resistividad real de 17.84 Ω/m , aproximadamente a 0.5 m de profundidad. Estas bajas resistividades se observan bajo condiciones de saturación hídrica, como pueden ser arcillas y formaciones acuíferas; o bien, por la existencia de yacimientos minerales.

Dada la cercanía del sondeo referido con las celdas de confinamiento, se consideró muy probable la presencia de un canal preferente saturado con lixiviados, por lo que se programó

la excavación de dos pozos a cielo abierto para su comprobación y colecta de muestras en su caso.

V.6 Pozos a cielo abierto

De acuerdo a la localización del sondeo SEV-3, se excavaron los pozos a cielo abierto cuya descripción se hace a continuación (*Figuras Nos. 20 y 21*):

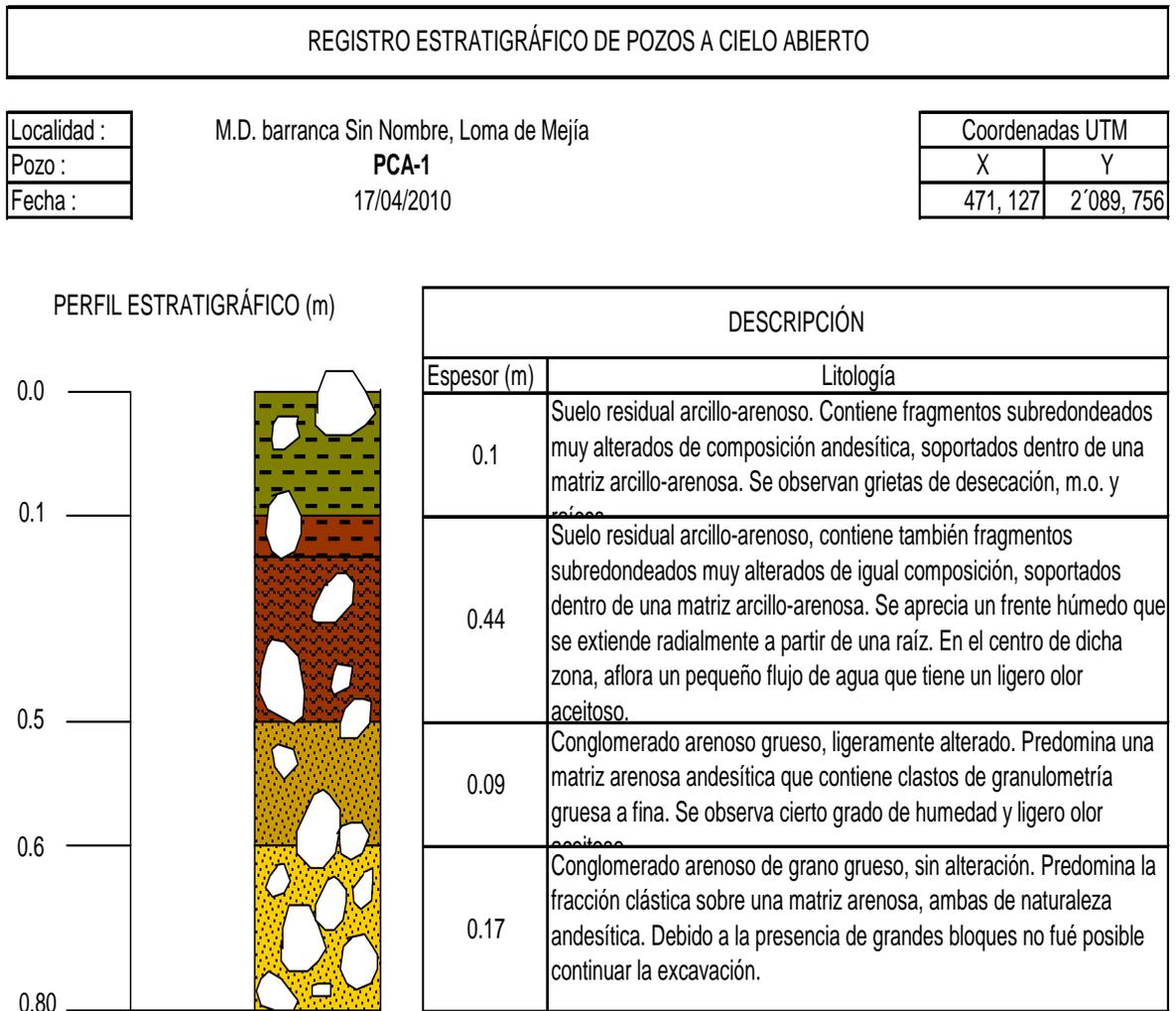


Figura No. 20 Descripción estratigráfica de PCA-1, Barranca sin nombre.

REGISTRO ESTRATIGRÁFICO DE POZOS A CIELO ABIERTO

Localidad :
Pozo :
Fecha :

M.D. barranca Sin Nombre, Loma de Mejía
PCA-2
 17/04/2010

Coordenadas UTM	
X	Y
471, 139	2'089, 749

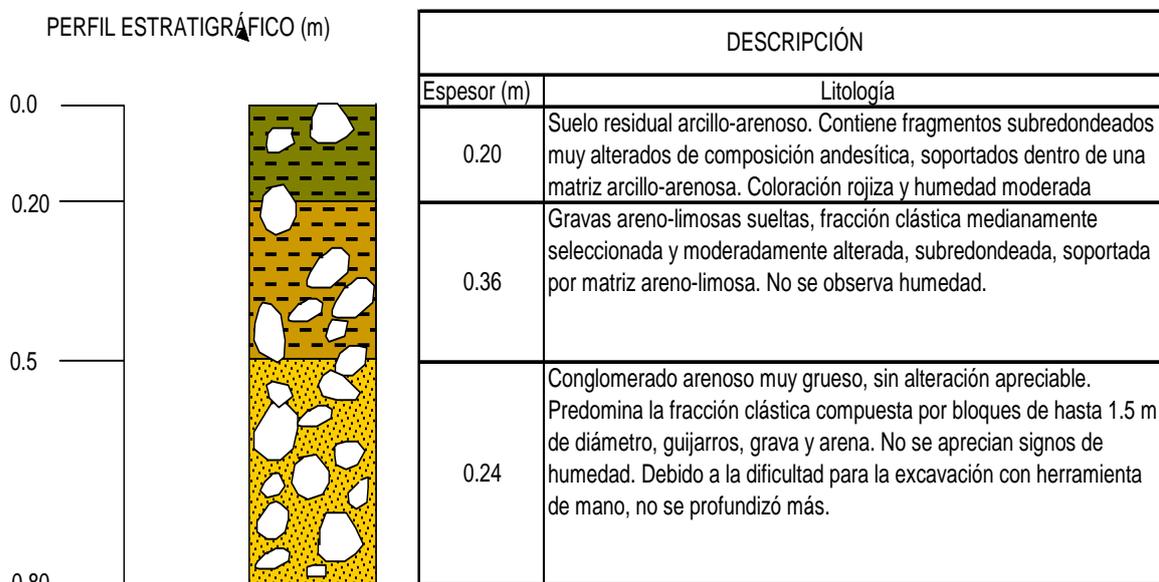


Figura No. 21 Descripción estratigráfica PCA-2, Barranca sin nombre

Como puede observarse en la descripción del PCA1, existe un pequeño flujo de agua sobre la margen derecha de la barranca Sin Nombre, coincidente con la localización de las celdas de confinamiento, percibiéndose en el agua y suelo un ligero olor característico de los lixiviados.

Por tal motivo se solicitó a la empresa ONSITE Laboratories de México, S.A. de C.V., la colecta de muestras de agua y suelo para su análisis químico, dada su acreditación jurídica para la evaluación ambiental del sitio Loma de Mejía, según solicitud expresa del Ayuntamiento de Cuernavaca para la revisión de la concesión otorgada a la empresa PASA.

Dicha colecta se realizó el mismo día en que se excavaron los pozos, obteniéndose dos muestras de suelo en el pozo PCA-1 a una profundidad de 0.33 m y 0.90 m sobre la pared y piso, respectivamente. También se obtuvo una muestra de 500 ml del agua que surgió dentro de la excavación.

En el pozo PCA-2 sólo se detectó cierta humedad dentro de los primeros 0.36 m, extrayéndose una muestra de suelo para su análisis.

Resultados de los análisis

De acuerdo con los informes técnicos del laboratorio ONSITE Laboratories de México, S.A. de C.V.¹, referencias: 49563-SUELOS y 49564-AGUA, con fecha 27/Abril/2010, que incluyen Protocolo de Muestreo y Cadena de Custodia Externa, determinados por la NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004 que establece los criterios para concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilo, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio; así como las Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales (Ley Federal de Derechos), se tienen los resultados mostrados en las tablas siguientes (*Tablas Nos. 6 a 8*):

*Tabla No. 6 Resultados de análisis de metales pesados en suelo de PCA1.
Muestra obtenida a 0.90 m de profundidad*

RESUMEN DEL INFORME TÉCNICO DE LABORATORIO ONSITE LABORATORIES DE MÉXICO, S.A. DE C.V. MUESTRA DE SUELO, SITIO LOMA DE MEJÍA			
Muestra	Contaminante	Resultados (mg/kg) (UpH)	Límite Max. Permisible* (mg/kg)
PCA-1 , piso (0.90 m) M.D. B. Sin Nombre	Arsénico	0.13	22
	Bario	<0.5	5,400
	Cadmio	<0.05	37
	Mercurio	0.022	23
	Níquel	7.34	1,600
	Plata	2.13	390
	Plomo	8.75	400
	Selenio	<0.001	390
	Vanadio	<1	78
	Berilo	<0.02	150
	Talio	<0.5	5.2
	Cromo VI	<0.01	280
	pH	8.56	N.E.

Fuente: Protocolo de Muestreo e Informe Técnico de Laboratorio, referencia 49563, ONSITE Laboratories de México, S.A. de C.V., 27/04/2010.

¹ Facilitados por el Ayuntamiento de Cuernavaca, Mor., únicamente para su consulta.

Tabla No. 7 Resultados de análisis de metales pesados en suelo de PCA1.

Muestra obtenida a 0.33 m de profundidad

RESUMEN DEL INFORME TÉCNICO DE LABORATORIO ONSITE LABORATORIES DE MÉXICO, S.A. DE C.V. MUESTRA DE SUELO, SITIO LOMA DE MEJÍA			
Muestra	Contaminante	Resultados (mg/Kg) (UpH)	Límite Max. Permisible* (mg/kg)
PCA-1, pared (0.33 m) M.D. B. Sin Nombre	Arsénico	0.44	22
	Bario	<0.5	5,400
	Cadmio	<0.05	37
	Mercurio	<0.0005	23
	Niquel	13.13	1,600
	Plata	2.25	390
	Plomo	13.86	400
	Selenio	<0.001	390
	Vanadio	<1	78
	Berilo	<0.02	150
	Talio	<0.5	5.2
	Cromo VI	<0.01	280
	pH	8.38	N.E.

Fuente: Protocolo de Muestreo e Informe Técnico de Laboratorio, referencia 49563, ONSITE Laboratories de México, S.A. de C.V., 27/04/2010.

Tabla No. 8 Resultados de análisis de metales pesados en suelo de PCA2.

Muestra obtenida a 0.20 m de profundidad

RESUMEN DEL INFORME TÉCNICO DE LABORATORIO ONSITE LABORATORIES DE MÉXICO, S.A. DE C.V. MUESTRA DE SUELO, SITIO LOMA DE MEJÍA			
Muestra	Contaminante	Resultados (mg/Kg) (UpH)	Límite Max. Permisible* (mg/kg)
PCA-2, pared (0.20 m) M.D. B. Sin Nombre	Arsénico	0.25	22
	Bario	28.84	5,400
	Cadmio	<0.05	37
	Mercurio	0.034	23
	Niquel	13.33	1,600
	Plata	2.3	390
	Plomo	14.97	400
	Selenio	<0.001	390
	Vanadio	<1	78
	Berilo	<0.02	150
	Talio	<0.5	5.2
	Cromo VI	<0.01	280
	pH	7.86	N.E.

Fuente: Protocolo de Muestreo e Informe Técnico de Laboratorio, referencia 49563, ONSITE Laboratories de México, S.A. de C.V., 27/04/2010.

De los resultados anteriores se obtiene el gráfico de la *Figura No. 22*, donde se establece un comparativo entre los valores obtenidos y la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece los límites máximos permisibles de metales en suelos para uso agrícola, residencial y comercial.

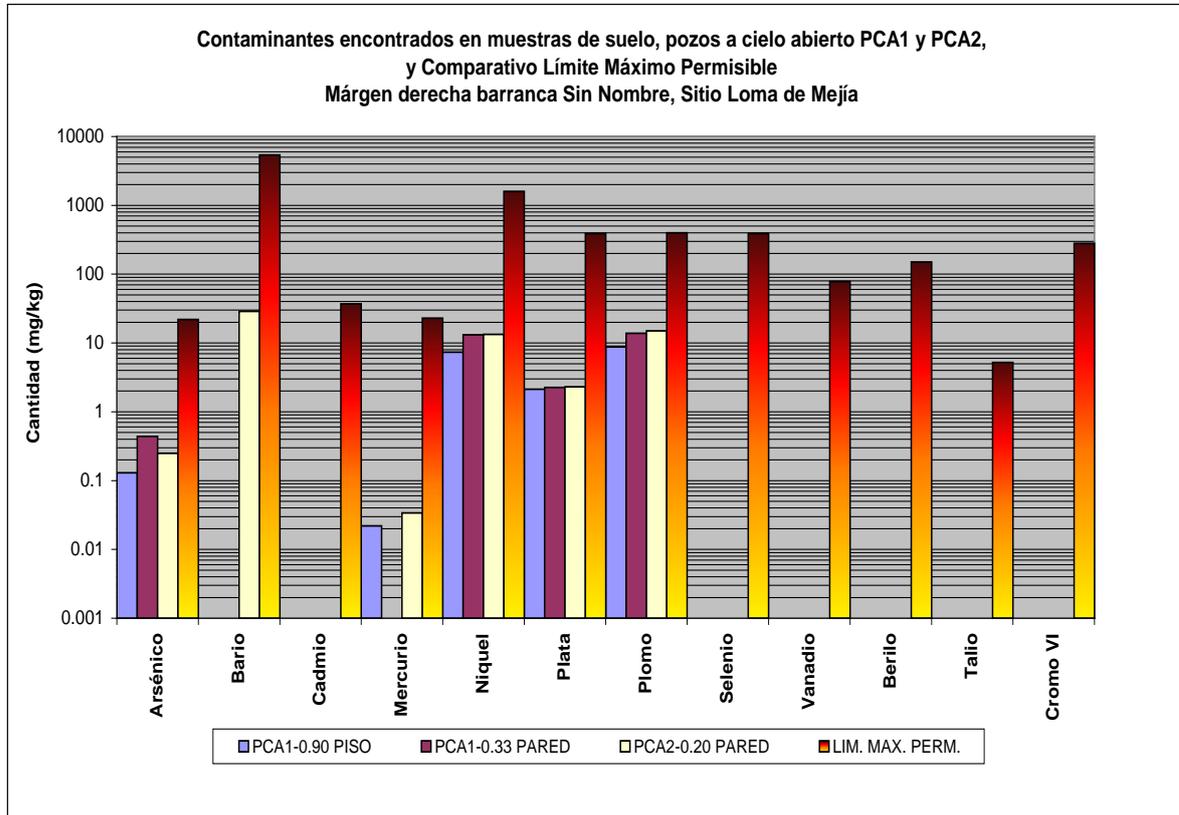


Figura No. 22 Límites máximos permisibles de metales en suelos y resultado de los análisis efectuados en muestras de los pozos a cielo abierto PCA1 y PCA2. Fuente: Elaboración a partir del Protocolo de Muestreo e Informe Técnico de Laboratorio, referencia 49563, ONSITE Laboratories de México, S.A. de C.V., 27/04/2010.

Por otra parte, los resultados que arroja el informe técnico sobre presencia de metales pesados en la muestra de agua colectada en el pozo PCA-1, se muestra en la *Tabla No. 9*; así como su gráfica correspondiente (*Figura No. 23*), donde se establece un comparativo con los límites máximos permisibles en fuentes de abastecimiento para uso público.

Tabla No. 9 Resultados de análisis de metales pesados en muestra de agua obtenida en flujo sub-superficial de PCA1, Muestra obtenida a 0.40 m de profundidad

RESUMEN DEL INFORME TÉCNICO DE LABORATORIO ONSITE LABORATORIES DE MÉXICO, S.A. DE C.V. MUESTRA DE AGUA, FLUJO SUBSUPERFICIAL, SITIO LOMA DE MEJÍA			
Muestra	Contaminante	Resultados (mg/Kg)	Límite Max. Permisible*
PCA-1, pared (0.40 m) M.D. B. Sin Nombre	Bario	1.27	1.0
	Aluminio	0.120	0.02
	Cromo total	<0.05	0.05
	Mercurio	<0.0005	0.001
	Níquel	0.057	0.01
	Plomo	<0.1	0.05
	Zinc	0.100	5.0

Nota: Valores ambiguos reportados en el informe:

Cromo total <0.05

Plomo <0.1

Fuente: Protocolo de Muestreo e Informe Técnico de Laboratorio, referencia 49564,
ONSITE Laboratories de México, S.A. de C.V., 27/04/2010.

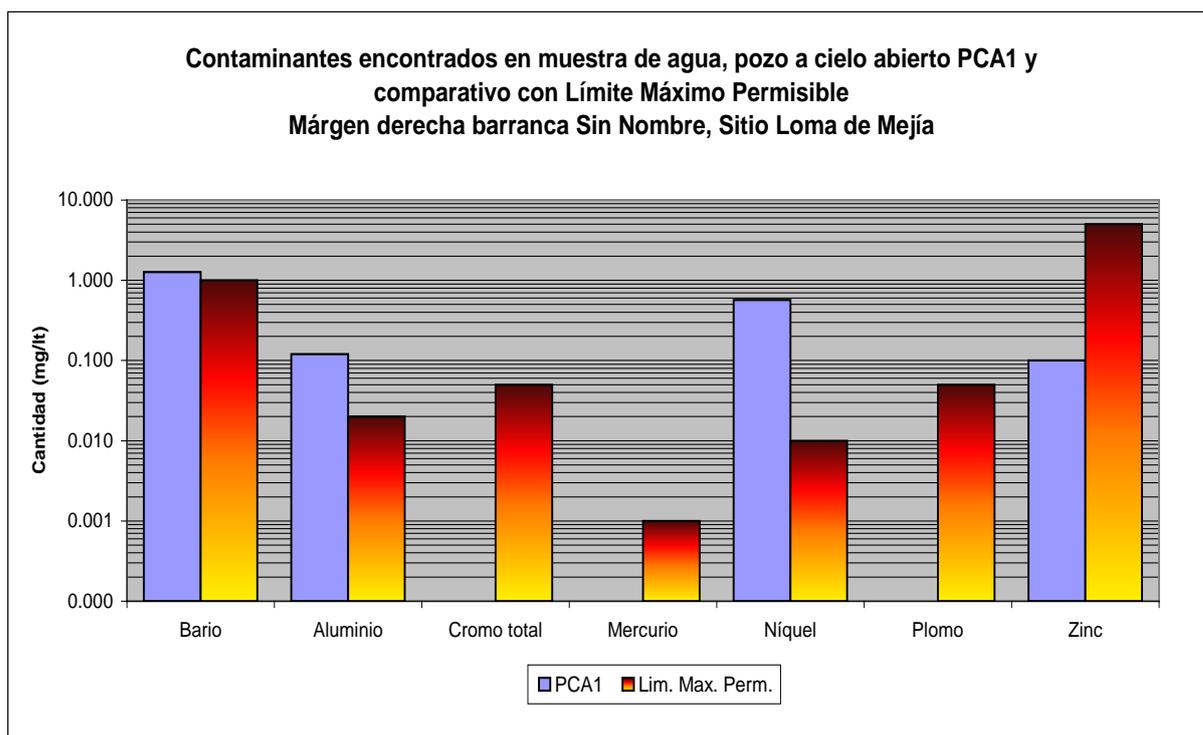


Figura No. 23 Contenido de metales pesados en muestra de agua subsuperficial, colectada en el pozo a cielo abierto PCA1. Fuente: Elaboración a partir del Protocolo de Muestreo e Informe Técnico de Laboratorio, referencia 49564, ONSITE Laboratories de México, S.A. de C.V., 27/04/2010

De la información anterior se desprende lo siguiente:

1. Si bien en las muestras de suelo no se observaron valores por encima de la norma, se advierte un contenido inusual de metales tales como: Ba, Cd, Hg, Ni, Ag, Pb y Cr^{VI}, además de un pH ligeramente básico, contrario al de las aguas meteóricas que alimentan los manantiales de la zona.
2. En el caso de la muestra de agua, se exceden los límites máximos permisibles en: Ba, Al y Ni. Se advierten valores ambiguos en Cromo total y Plomo, ya que en el caso del Cr no se especifica que tan abajo del límite se encuentra; y en caso del Pb se señala un valor que está por encima del límite máximo permisible.
3. De los resultados obtenidos es razonable suponer que el flujo descubierto en el PCA-1, corresponde a la migración de lixiviados fuera de las celdas de confinamiento; y por lo tanto, la geomembrana que debería evitarlo presenta fallas aún no cuantificadas.

V.7 Hidrogeología de Loma de Mejía

Hidrología

Hidrológicamente, Loma de Mejía constituye el parte-aguas que separa a las microcuencas de Panocheras y El Limón-Pilcaya, las cuales confluyen en el río Apatlaco a la altura de la Colonia Granjas Mérida y la población de Acatlipa, respectivamente, cubriendo en conjunto una superficie de aproximadamente 46 km² (ver *Figura No.24*).

Ambas microcuencas contienen al menos ocho pozos de abastecimiento de agua potable; de los cuales cinco son los más expuestos a la contaminación por lixiviados, mismos que se enumeran en la *Tabla No. 10*:

Tabla No. 10 Relación de pozos más vulnerables a la contaminación por lixiviados

Pozo	Coordenadas UTM		Gasto (lps)	Vol. extracción (m ³ /año)
	X	Y		
Pueblo Viejo	473, 604	2'086, 042	10	157, 752
Col. Lázaro Cárdenas	474, 595	2'083, 828	24	300, 481
Rubén Jaramillo I	474, 478	2'083, 337	3	47, 304
Rubén Jaramillo II	474, 477	2'082, 538	12	189, 216
Lázaro Cárdenas del Río	474, 125	2'082, 016	23	120,888
TOTAL :				815, 641*

* Cantidad suficiente para dotar de agua potable a 14, 897 personas durante un año, suponiendo un consumo de 150 l/hab/día. Fuente: Elaboración a partir de datos de CNA.

UBICACIÓN HIDROLÓGICA DEL SITIO LOMA DE MEJÍA

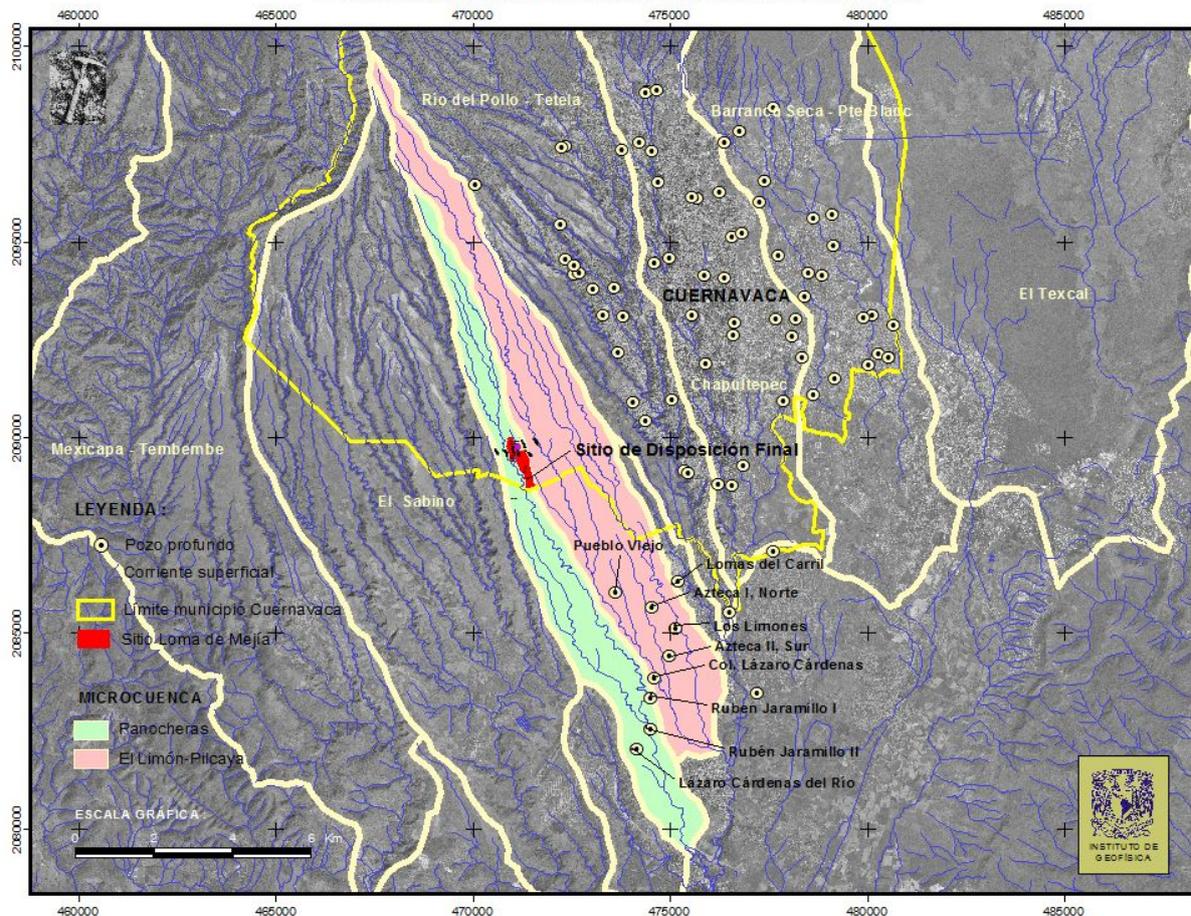


Figura No. 24 Localización del sitio de disposición final Loma de Mejía en relación a la hidrología regional y la ubicación de pozos de abastecimiento de agua potable. Fuente: Elaboración a partir de datos vectoriales y ortofoto Esc. 1:50, 000, INEGI.

Hidrogeológicamente Loma de Mejía está situada dentro del polígono que delimita al acuífero de Cuernavaca, formando parte a su vez del Glacis de Buenavista, que comprende más o menos la tercera parte de dicha unidad hidrogeológica (Figura No. 25).

En la zona del Glacis se considera que existe un acuífero libre alojado exclusivamente en rocas de la Formación Cuernavaca; aunque, según se ha mencionado en incisos anteriores, existe un cuerpo basáltico cubierto por depósitos del Glacis que puede constituir un acuífero semiconfinado, amén de las unidades calcáreas, como la Formación Morelos, que parece formar parte del basamento.

Los vértices del acuífero considerados por la Comisión Nacional del Agua, se muestran a continuación en la *Tabla No. 11*.

Tabla No. 11 Vértices del polígono que delimita al acuífero de Cuernavaca

Vértice	Longitud Oeste			Latitud Norte			Observaciones
	Gdos	Min	Seg	Gdos	Min	Seg	
1	99	16	44.4	19	7	51.6	Del 1 al 2 por el límite estatal
2	99	4	37.2	19	3	25.2	
3	99	8	13.2	18	46	44.4	
4	99	10	48.0	18	42	46.8	
5	99	12	39.6	18	45	18.0	
6	99	13	40.8	18	46	4.8	
7	99	18	21.6	18	47	2.4	
8	99	24	32.4	18	52	55.2	Del 8 al 9 por el límite estatal
9	99	19	8.4	19	4	44.4	Del 9 al 10 por el límite estatal
1	99	16	44.4	19	7	51.5	

Fuente: Determinación de la disponibilidad de agua del acuífero de Cuernavaca, estado de Morelos. CNA, 2002.

LÍMITE DEL ACUÍFERO DE CUERNAVACA

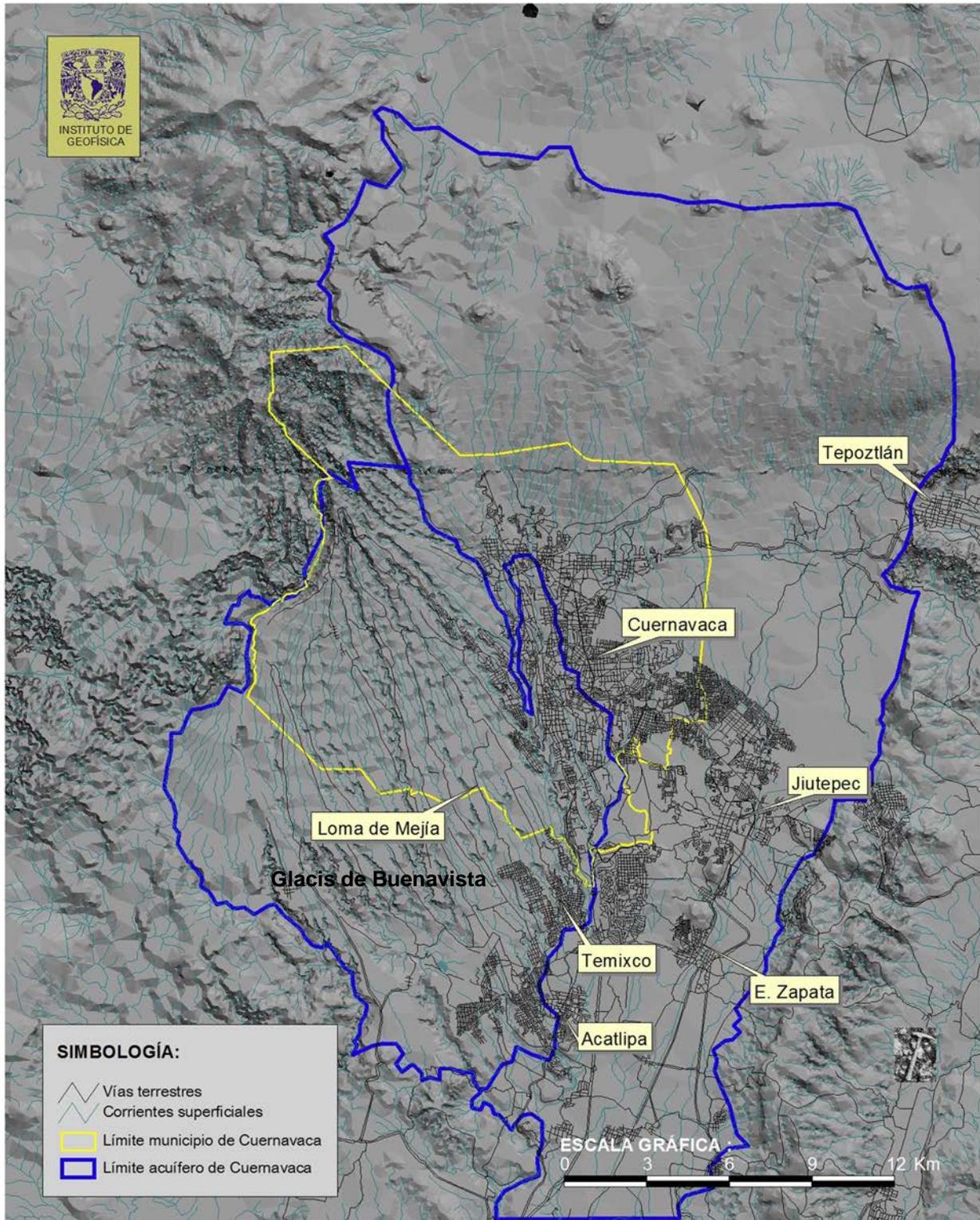


Figura No. 25 Límites del acuífero de Cuernavaca y subcuenca hidrogeológica Glacis de Buenavista.

Fuente: Mapa elaborado a partir de datos vectoriales Esc 1: 50, 000 del INEGI y datos de la CNA.

Dentro del Glacis existen al menos 39 pozos profundos (SAPAC, 2002) y 20 manantiales perennes, alimentando estos últimos a las barrancas: El Cabellito, El Sabino, Bedolla o La Fundición, La Tilapeña, Las Escobas y El Litrero-Pilcaya. La mayoría de dichos manantiales se presentan en el fondo de las laderas o surgen dentro del cauce, aún que en algunos casos afloran pequeños flujos de agua en la parte alta de las laderas, justo en donde cambia la suave pendiente de las lomas e inician los cortes verticales que forman profundas barrancas.

La distribución de los manantiales referidos se muestra en la *Figura No. 26* y su localización en la tabla siguiente (*Tabla No. 12*):

Tabla No. 12 Localización de manantiales dentro del Glacis de Buenavista

Cuenca	Manantial	Coordenadas UTM		Observaciones
		X	Y	
El Mango-Cabellito	CAB-1	465600	2093910	Perenne, sobre cauce
	CAB-2	465600	2093910	Perenne, sobre cauce
El Sabino	SAB-1	469802	2089656	Perenne, ladera M.D.
	SAB-2	469560	2090705	Perenne, ladera M.D.
	SAB-1A	469912	2089371	Perenne, ladera M.D.
	LSB-3	471398	2084573	Perenne, sobre cauce
Bedolla o La Fundición	SU-1	470642	2088450	Perenne, ladera
	SU-2	471558	2084878	Perenne, ladera
Los Sabinos-Salada	LSB-1	470695	2081909	Perenne, ladera M.I.
	LSB-2	470673	2082022	Perenne, ladera, M.D.
Tilapeña-El Limón	LIM-1	471425	2090690	Perenne, ladera, M.I.
	LIM-2	471420	2090670	Perenne, ladera, M.D.
	LIM-3	471309	2090558	Perenne, ladera, M.D.
	LIM-4	471122	2091020	Perenne, ladera, M.D.
	LIM-5	471057	2091081	Perenne, ladera, M.D.
	SDIM-1	472727	2088878	Perenne, ladera, parte alta, M.D.
Litrero-Pilcaya	CHIP-1	473471	2089346	Perenne, ladera, M.D.
	CHIP-2	473787	2088080	Perenne, ladera, M.I.
	CHIP-3	473800	2088020	Perenne, ladera, M.I.
	CHIP-4	474092	2087498	Perenne, ladera, M.D.

Fuente: Academia Nacional de Investigación y Desarrollo, A.C. (ANIDE)

LOCALIZACIÓN DE MANANTIALES PERENNES EN EL GLACIS DE BUENAVISTA

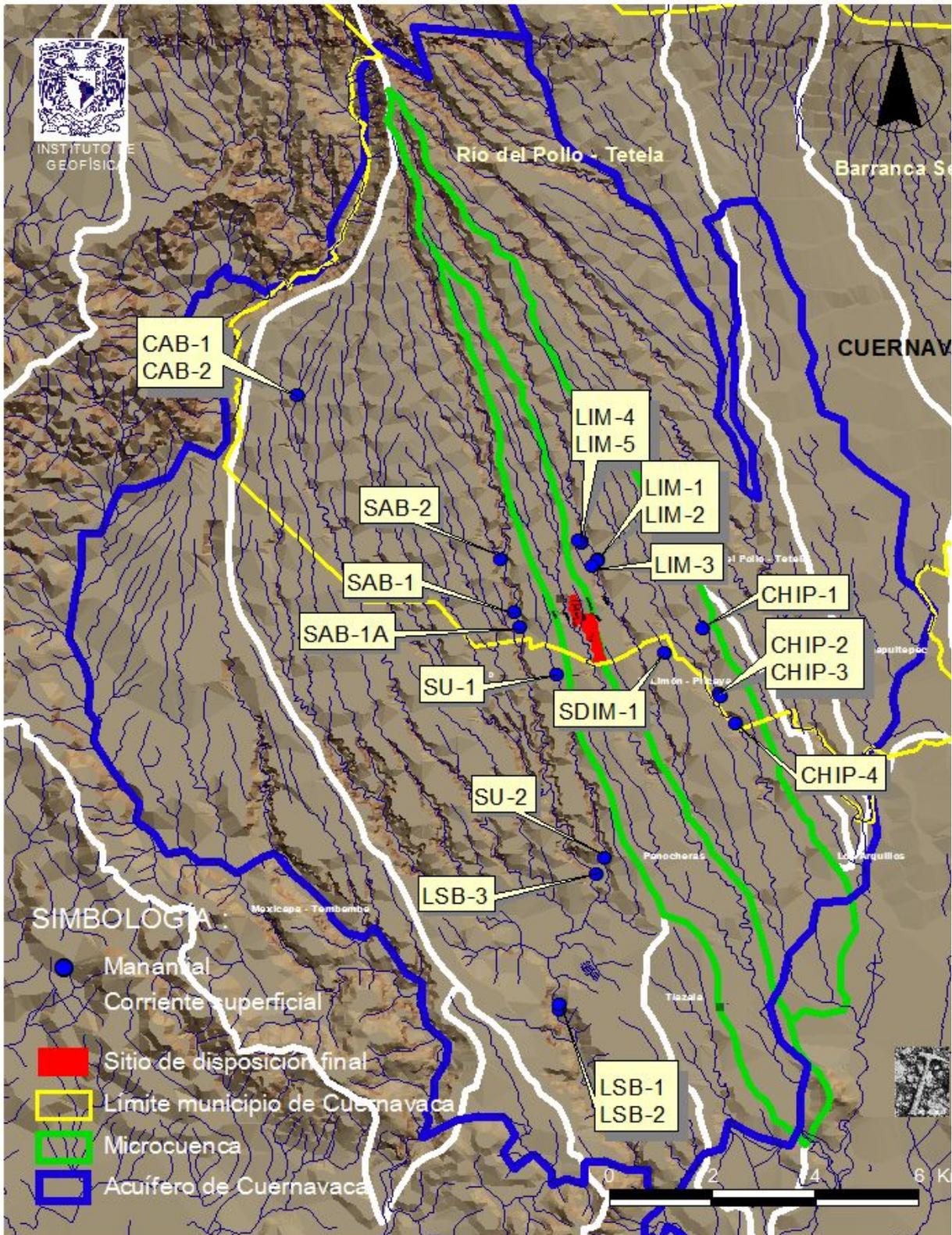


Figura No. 26 Fuente: Elaboración a partir de datos de ANIDE, A.C. y datos vectoriales del INEGI

Modelo conceptual del acuífero, sub unidad hidrogeológica: Glacis de Buenavista.

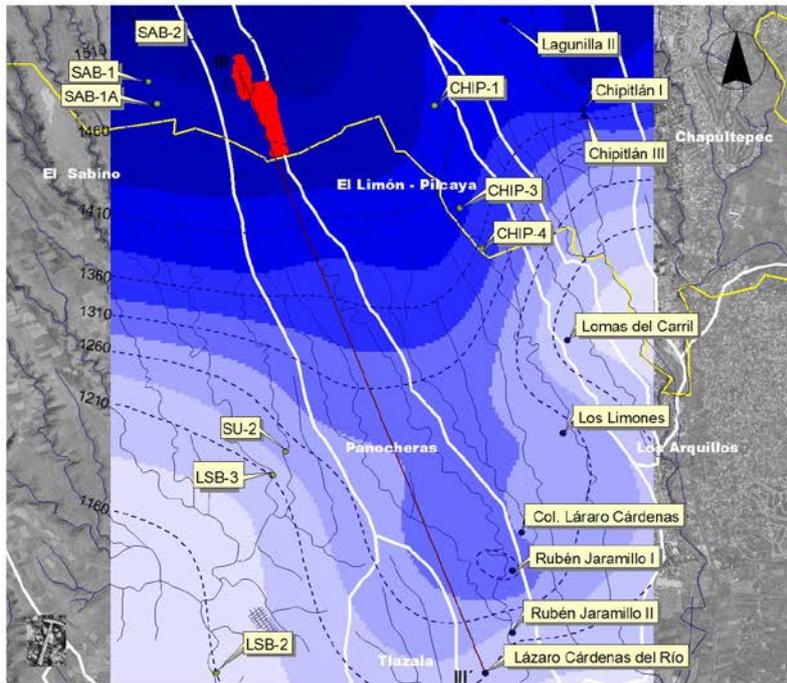
Debido a sus características climáticas, geomorfológicas y litoestratigráficas, el Glacis puede considerarse como una subunidad independiente del acuífero de Cuernavaca, ya que su cuenca de captación se circunscribe dentro de las sierras de Ahuatenco y Zempoala principalmente, coincidiendo aproximadamente su flujo subterráneo con la pendiente que muestra dicha topografía; es decir, en dirección Noroeste-Sureste y oblicua con respecto al flujo proveniente de la Sierra de Chichináutzin, que se encuentra alojado dentro de las rocas basálticas que se proyectan de Norte a Sur, formando los valles de Cuernavaca, San Gaspar y Zacatepec.

Lo anterior puede constatarse al determinar las equipotenciales hidráulicas que se obtienen al considerar el nivel freático que se observa en los principales manantiales localizados dentro del Glacis y los niveles estáticos de pozos profundos, sobre todo, los localizados al sureste, en el municipio de Temixco (*ver Figura No. 27*).

Lo anterior puede explicar la limitada productividad de los pozos Ruben Jaramillo I y Rubén Jaramillo II (3 y 12 lps), respectivamente, en comparación con los pozos situados en la colonia Lázaro Cárdenas y Lázaro Cárdenas del Río, localizados a 500 metros al Norte y Sur de los pozos mencionados, y cuyo gasto es evidentemente superior (24 y 23 lps, respectivamente)

De lo anterior se desprende que en los “altos” equipotenciales cabe esperar bajos rendimientos, como lo confirma el pozo Pueblo Viejo (10 lps), que también se ve influenciado por dicha condición hidrogeológica.

Otra consideración es que precisamente en el “bajo” equipotencial es de esperarse pozos más productivos, lo cual queda evidenciado por los manantiales de la Barranca El Sabino, cuya vulnerabilidad a la dispersión de lixiviados es elevada.



LÍNEAS EQUIPOTENCIALES FREÁTICAS Y GRADIENTE HIDRÁULICO, PERFIL : LOMA DE MEJÍA - POZO L. CÁRDENAS DEL

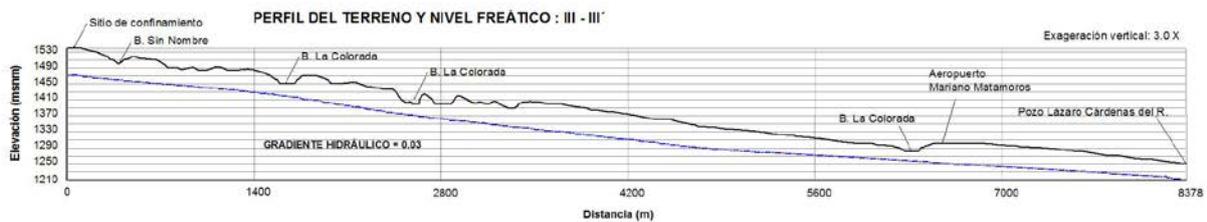
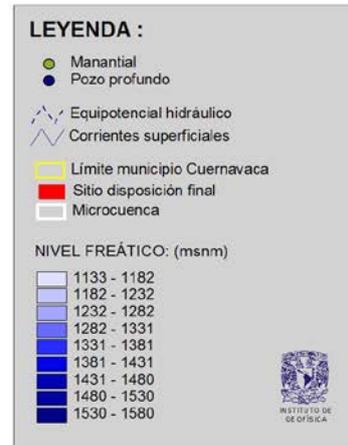


Figura No. 27 Configuración de equipotenciales freáticos y gradiente hidráulico de la sub unidad hidrogeológica Glacis de Buenavista. Fuente: Elaboración a partir de datos de ANIDE, A.C., CONAGUA y datos vectoriales Esc. 1:50, 000 del INEGI.

Con respecto al modelo conceptual del acuífero, particularmente dentro de la zona cercana al sitio de disposición final de Loma de Mejía, se pueden determinar las siguientes condiciones hidrogeológicas:

Zonas de Recarga:

1. La principal zona de recarga ocupa la superficie de los interfluvios que integran el Glacis, ya que corresponden con material granular grueso, pobremente compactado, de alta permeabilidad y con pendiente ligera.

2. Otra zona de recarga la constituye una porción de la Sierra de Zempoala, debido al intenso fracturamiento que afecta a las rocas andesíticas, lo cual le confiere una permeabilidad secundaria moderada.
3. Cabe también considerar como zona de recarga, las numerosas barrancas intermitentes y efímeras que constituyen corrientes influentes, aportando durante la época de lluvias parte del caudal que escurre por sus cauces.

Zonas de descarga:

1. Los manantiales de fondo y de ladera que afloran en los cauces perennes de las barrancas más profundas que bisectan al acuífero, constituyéndose en corrientes efluentes.
2. Pequeños manantiales que se localizan en las partes altas de las laderas, surgiendo en el cambio de la pendiente entre los lomeríos y las barrancas. Su permanencia es generalmente intermitente, aun cuando existen casos en que su reducido flujo subsuperficial es de carácter permanente.
3. Cauces de barrancas en zonas cercanas a su confluencia con el río Apatlaco, donde van aflorando pequeñas surgencias que se van sumando hasta constituir corrientes perennes que alimentan el Apatlaco sobre su margen derecha.
4. Flujos horizontales en zona de contacto con basaltos y partes cubiertas por lava, que ocupan el límite oriental del Glacis.
5. Infiltración vertical en calizas de la Formación Morelos, las cuales forman parte del basamento sobre el cual descansan los depósitos aluviales.

En la *Figura No. 28* se ilustran los conceptos expresados.

**MODELO CONCEPTUAL DE LA SUB UNIDAD HIDROGEOLÓGICA
GLACIS DE BUENAVISTA, ACUÍFERO DE CUERNAVACA**

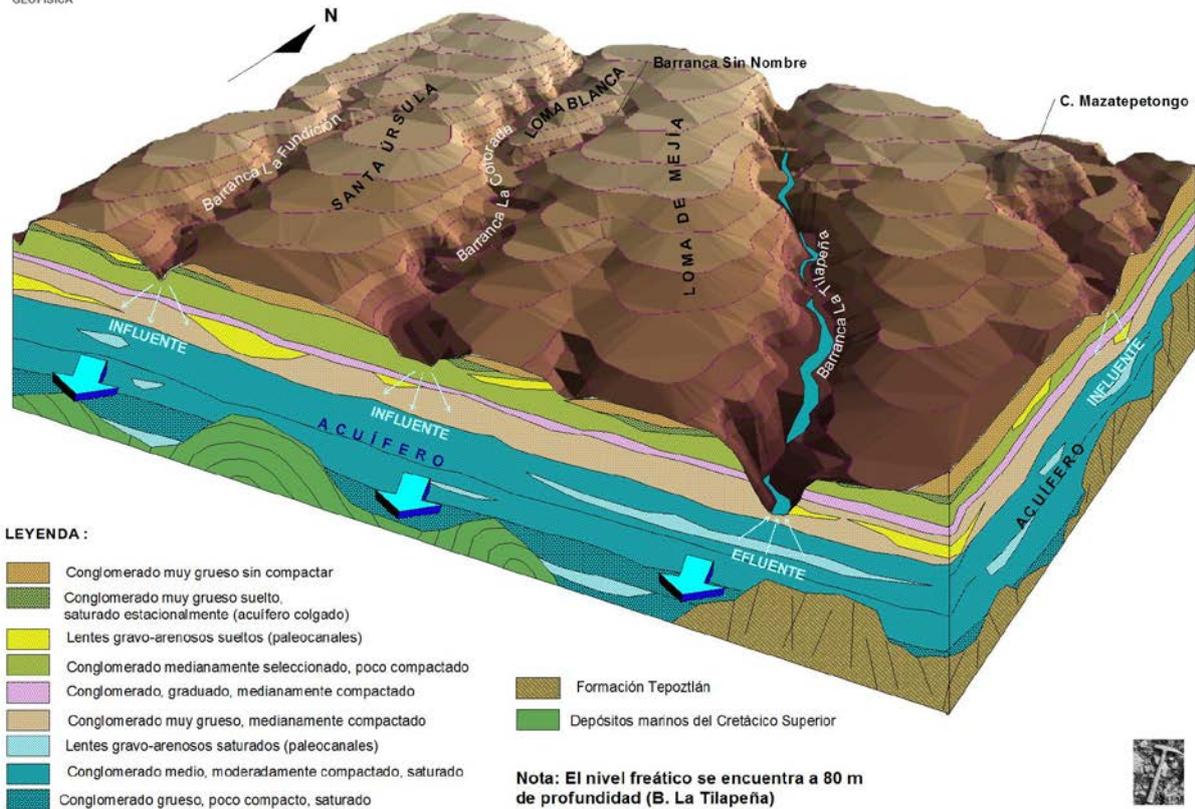


Figura No. 28 Fuente: Elaboración a partir de datos vectoriales Esc. 1: 50,000 del INEGI e interpretación geológica.

Unidades Hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas emplazadas dentro del Glacis y especialmente dentro del área de estudio, son las siguientes:

Acuíferos:

- a) De tipo libre en material granular, integrado por depósitos poco consolidados de granulometría diversa, de composición andesítica, que ocupan la mayor parte de la superficie de los interfluvios. Forman acuíferos colgados interfluviales que alimentan pequeños manantiales intermitentes y algunos perennes, situados en la línea que separa a las empinadas laderas de los lomeríos. Generalmente su descarga se efectúa un par

de meses después de la lluvia, pero en algunos casos mantienen su flujo a lo largo de todo el año.

- b) Semiconfinado granular, que ocupa una serie de depósitos de variada selección y de composición andesítica. Constituye el acuífero principal cuyo aprovechamiento beneficia a un número muy importante de habitantes, principalmente del municipio de Temixco, así como de Cuernavaca en su porción Poniente y Sur.
- c) Libre fracturado, integrado por rocas andesíticas muy fracturadas, localizadas en el límite Norte del Glacis. No afloran dentro de Loma de Mejía.
- d) Semiconfinado fracturado, formado por rocas volcánicas no diferenciadas de composición basáltica, contenidas dentro de los depósitos aluviales. Ausente en Loma de Mejía.
- e) Confinado fracturado, constituido por calizas muy fracturadas y kársticas que ocupan parte del basamento del Glacis.

Acuitardos:

- a) Horizontes de conglomerado limo-arcilloso bien compactado, con permeabilidad del orden de 1×10^{-5} , afloran cerca de la base de las barrancas más profundas y corresponden con corrientes de lodo de espesor irregular. No se observaron en la zona de estudio.
- b) Horizontes de conglomerado medianamente compactado, muestran una conductividad hidráulica de 1×10^{-4} y se alternan con horizontes más permeables. Afloran en las barrancas La Colorada y La Tilapeña.

Acuífugos:

- c) Depósitos laháricos de la Formación Tepoztlán. Ocupan parte del basamento del Glacis y aflora en algunos relictos de la zona norte y poniente del mismo.
- d) Rocas volcánicas masivas, de naturaleza andesítica, dacítica y riolítica. No se observan dentro de Loma de Mejía.
- e) Estratos de caliza delgada con nódulos de pedernal intercalados con arcilla, pertenecientes a la Formación Xochicalco. Ausentes dentro de la zona de trabajo.

Modelos de flujo bidimensional

Una vez establecidas las características hidrogeológicas del área, se compiló la información obtenida para su modelado bidimensional, teniendo como propósito conocer con certidumbre el fenómeno de la dispersión de contaminantes en un medio saturado, asumiendo que dicha condición se presenta dentro de la zona durante la época de lluvias.

A tal fin se utilizó el programa TopoDrive, elaborado por Paul A. Hsieh del Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2001), el cual simula el flujo de partículas en un medio saturado que se encuentra en equilibrio (entradas = salidas). A partir de la topografía, la conductividad hidráulica y porosidad, se obtiene un modelo que establece las trayectorias de flujo y el movimiento de las partículas del fluido, permitiendo a través de una simulación visualizar el comportamiento del modelo y comprender el flujo del agua subterránea.

El programa descrito no constituye una herramienta para obtener modelos muy refinados; sin embargo, su diseño permite un modelado conceptual o exploratorio que cumple las expectativas de carácter general que persigue el presente trabajo.

Los principales factores que controlan el flujo del agua subterránea son: la geometría de la cuenca, el gradiente hidráulico, el tipo de acuífero y la distribución de su conductividad hidráulica. Para una sección vertical de dos dimensiones, los límites del dominio de flujo quedan establecidos de la siguiente manera:

- El límite superior es el nivel freático.
- Los límites laterales y el límite inferior representan fronteras del acuífero, tales como acuífugos o estructuras divisorias subterráneas.

Fundamento teórico del programa TopoDrive

La ecuación que rige el estado de flujo en equilibrio es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

Donde:

h = carga hidráulica

K_{xx} y K_{zz} = componentes principales de la conductividad hidráulica

Se asume que las direcciones principales son paralelas a los ejes cartesianos x y z.

Si la posición del nivel freático es conocida, la condición de frontera a lo largo del acuífero es:

$$h = z$$

Donde z es la elevación del nivel freático. A lo largo de las fronteras laterales bajo condiciones de no flujo, se tiene:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

y a lo largo del dominio inferior, la condición de no flujo es:

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0$$

El programa TopoDrive resuelve las ecuaciones anteriores por el método de elementos finitos, donde el dominio del flujo es representado por una malla rectangular deformada y cada cuadrilátero que forma la malla se divide en dos elementos triangulares, que constituyen los elementos finitos representados por funciones lineales. Después de resolver para cada carga hidráulica h, los vectores de velocidad intersticial son calculados por :

$$v_x = -\frac{K_{xx}\partial h}{n \partial x}$$

$$v_z = -\frac{K_{zz}\partial h}{n \partial z}$$

Donde n es la porosidad.

Finalmente, los vectores de velocidad se utilizan para calcular las trayectorias de flujo y la circulación de partículas del fluido.

Para la aplicación del programa descrito se hacen las siguientes consideraciones:

- Se supone un medio saturado.
- Las fronteras laterales quedan definidas por los cortes de las barrancas La Colorada y La Tilapeña.
- El límite inferior es un acuitardo.
- El relieve corresponde con la sección topográfica del terreno.
- Las diferentes capas representan conductividades hidráulicas encontradas en el terreno.

De lo anterior se obtienen los siguientes resultados:

1.- Corte transversal SW-NE, Loma de Mejía, líneas equipotenciales hidráulicas (Figura No. 29)

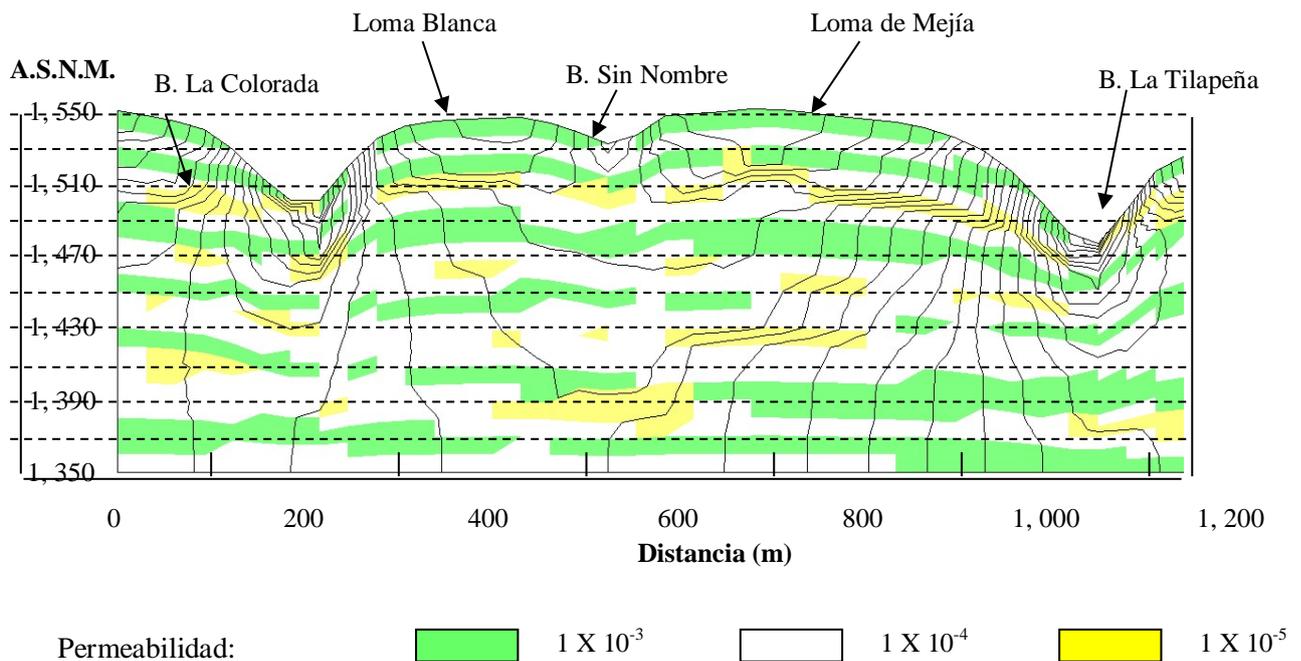


Figura No. 29 Fuente: Elaboración a partir de resultados programa TopoDrive, USGS.

2.- Corte transversal SW-NE, Loma de Mejía. En la Figura No. 30 se muestran las líneas de flujo (en color azul) que señalan la circulación de las partículas del fluido. Únicamente se considera el área donde se localizan las celdas en operación (Loma Blanca) y la zona que a futuro ha sido destinada para el confinamiento de los residuos en Loma de Mejía.

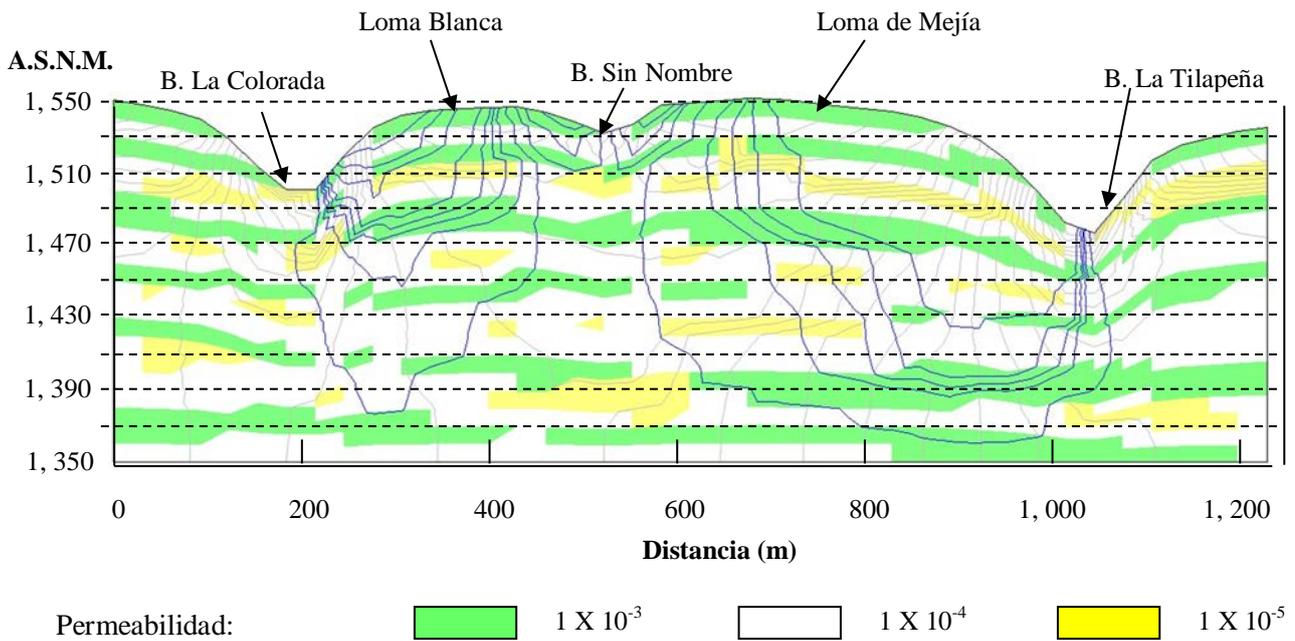


Figura No. 30 Fuente: Elaboración a partir de resultados programa TopoDrive, USGS.

En la siguiente serie de figuras (Figuras Nos. 31 a 34) se esquematiza la trayectoria y velocidad de las partículas de un fluido a partir de una simulación, por el método de elementos finitos utilizado por el programa TopoDrive, y en las cuales se representa la migración de lixiviados, una vez que estos entran en contacto con el terreno natural bajo condiciones de saturación. Las secciones mostradas conservan la misma topografía y simbología de las figuras anteriores, omitiéndose la nomenclatura para mostrar mayor claridad en la circulación del fluido.

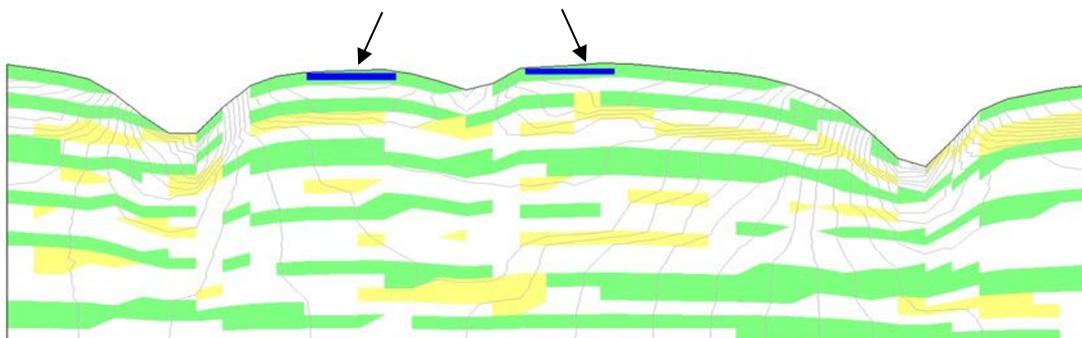


Figura No. 31 Día 0, contaminación confinada. Fuente: Simulación de trayectoria de partículas, programa TopoDrive, USGS.

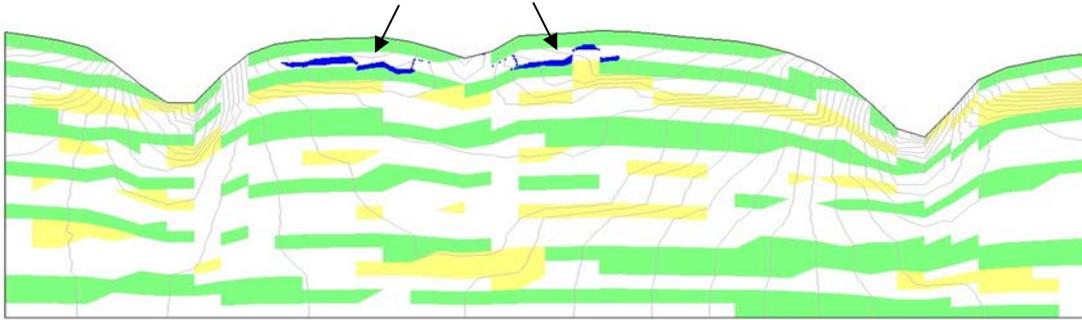


Figura No. 32 Día 1, Inicio de migración de lixiviados por falla de confinamiento. Fuente: Simulación de trayectoria de partículas, programa TopoDrive, USGS.

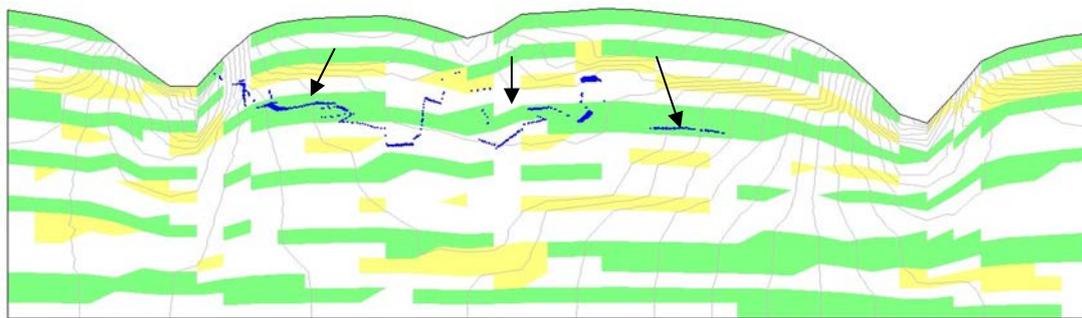


Figura No. 33 Día 10, Desplazamiento de pluma contaminante hacia barrancas e infiltración vertical. Fuente: Simulación de trayectoria de partículas, programa TopoDrive, USGS.

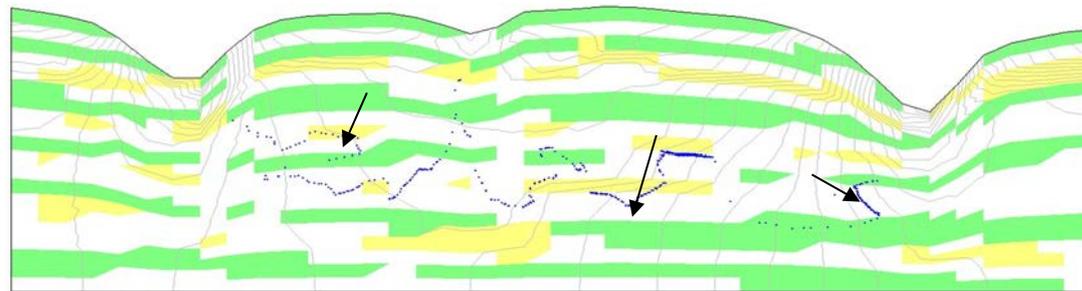


Figura No. 34 Día 30, Dispersión de lixiviados en acuífero, situado a 80 m de profundidad. Fuente: Simulación de trayectoria de partículas, programa TopoDrive, USGS.

Considerando otro escenario, bajo condiciones de baja conductividad hidráulica (1×10^{-5} , reportada en pruebas de la MIA), y partiendo de las mismas condiciones de confinamiento, pero en un medio isótropo y saturado, se tiene el siguiente resultado (Figuras Nos. 35 a 37):

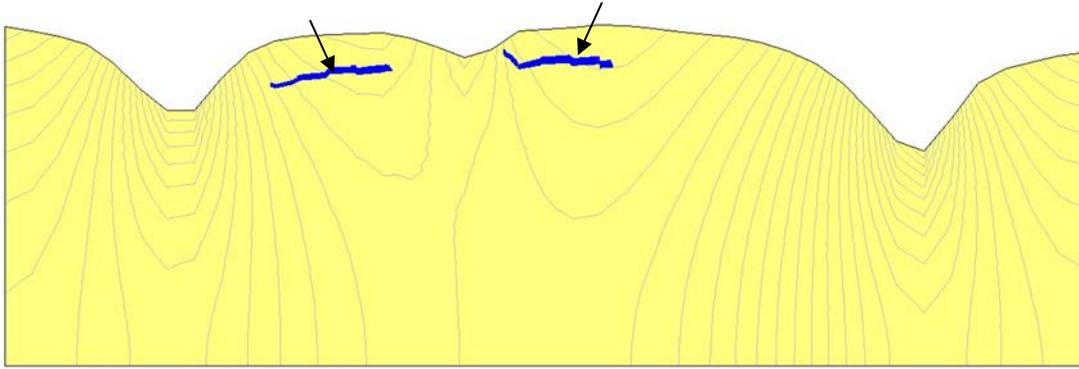


Figura No. 35 Día 25, Infiltración vertical y flujo de lixiviados hacia barrancas. Fuente: Simulación de trayectoria de partículas, programa TopoDrive, USGS.

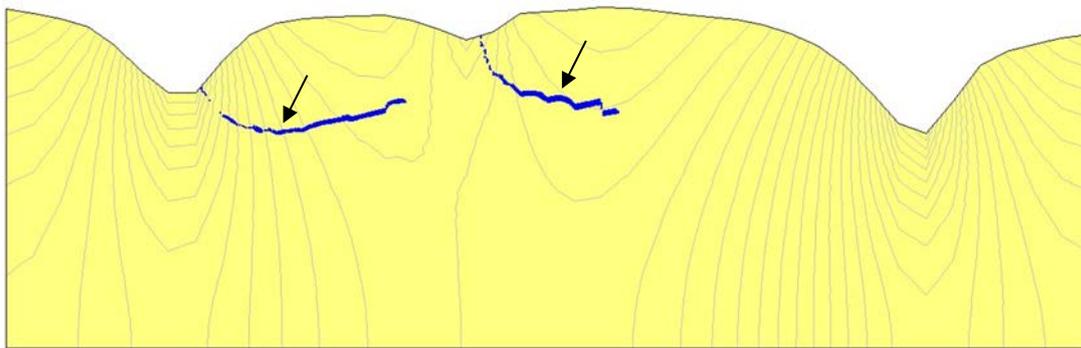


Figura No. 36 Día 100, Contaminación de barrancas La Colorada y Sin Nombre. Continúa flujo vertical. Fuente: Simulación de trayectoria de partículas, programa TopoDrive, USGS.

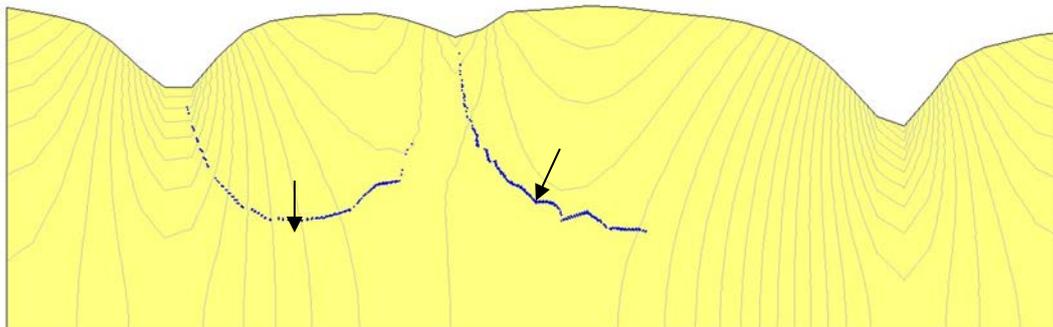


Figura No. 37 Día 365, Dispersión de lixiviados en acuífero, situado a 80 m de profundidad. Fuente: Simulación de trayectoria de partículas, programa TopoDrive, USGS.

VI. Cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003

Para efectos de la Norma Oficial Mexicana, los sitios de disposición final se categorizan de acuerdo a la cantidad de toneladas de residuos sólidos urbanos y de manejo especial que ingresan por día, por lo que el sitio Loma de Mejía queda incluido dentro de la categoría “A”, mayor a 100 ton/día.

Referidas a la misma norma, dentro de las especificaciones para la selección del sitio; Loma de Mejía muestra el siguiente grado de incumplimiento (*Tablas Nos. 13 a 16*):

Tabla No. 13 Condiciones mínimas que debe cumplir cualquier sitio de disposición final (tipo A, B, C o D)

6. Especificaciones para la selección del sitio		
6.1 Restricciones para la ubicación del sitio		
Inciso de la norma	Observancia	Consideraciones
6.1.1	Cumple	Según estudio de riesgo aviar se determinó que la ubicación del sitio no interfiere con el cono de aproximación de aeronaves. Sin embargo “se determinaron 20 especies de aves potencialmente peligrosas para la navegación aérea, en caso que la operación del sitio de disposición final tenga un manejo deficiente y se dieran condiciones que permitan la modificación de las poblaciones aviares y sus conductas...”
6.1.2	No cumple	Se encuentra dentro de la Zona Protectora Forestal de la ciudad de Cuernavaca, Mor., según decreto publicado en el DOF, el 17 de Noviembre de 1937 por el Presidente Lázaro Cárdenas del Río (<i>Figura No. 38</i>).
6.1.3	No cumple	Aún cuando no existe actualmente una población mayor a 2, 500 habitantes que se encuentre a menos de 500 m, en los planes de desarrollo urbano de Temixco (2006-2009) y Cuernavaca se contempla dicha área para desarrollo de centros habitacionales y reserva territorial, respectivamente (ver <i>Figura No. 39</i>).
6.1.4	No cumple	Se localiza en zonas de :planicie aluvial, zona de recarga del acuífero de Cuernavaca (oficio: BOO.00.R05.07.3/264, CONAGUA) y arqueológicas (inscritas en el DRPMZA, números: E14A5917061, E14A5917059, E14A5917058, E14A5917057 y E14A5917056).

Tabla No. 13 (continuación)

6.1 Restricciones para la ubicación del sitio (continuación)		
Inciso de la norma	Observancia	Consideraciones
6.1.5	No cumple	De acuerdo al proyecto ejecutivo, la barranca Sin Nombre se encuentra en el eje del emplazamiento y está sujeta a inundaciones con periodos de retorno de 100 años.
6.1.6	No cumple	Según proyecto ejecutivo se encuentra a menos de 500 m de la barranca La Tilapeña, de caudal continuo.

Tabla No. 14

6. Especificaciones para la selección del sitio		
6.2 Estudios hidrogeológicos		
Inciso de la norma	Observancia	Consideraciones
6.2.1	No cumple	No se incluyó información antecedente, tal como dictamen técnico sobre el sitio El Litro, elaborado por el Instituto de Geología, UNAM 1995; Evaluación Preliminar de Sitios de Disposición Final, Secretaría de Servicios Públicos, Salud y Medio Ambiente, Ayuntamiento de Cuernavaca, 2002; Estudio para la ubicación de Rellenos Sanitarios en el Estado de Morelos, Thessis Consulting, 2005, CEAMA.
6.2.2a	No cumple	No se consideraron evidencias de agua subterránea, tales como manantiales, pozos y norias, en la zona de influencia, para conocer el gradiente hidráulico. Asimismo, no se determinó el volumen de extracción, tendencias de explotación y planes de desarrollo de la zona.
6.2.2b y c	No cumple	No se identificaron las unidades hidrogeológicas, tipo de acuífero (confinado o semiconfinado) y relación entre las diferentes unidades que definen el sistema acuífero. Tampoco se realizó un análisis del sistema de flujo. Cabe mencionar que la MIA se limita a citar textualmente el estudio: Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero de Cuernavaca, Estado de Morelos, CNA, 2002.

Tabla No. 15

6. Especificaciones para la selección del sitio		
6.3 Estudios y análisis, en el sitio, previos a la construcción y operación de un sitio de disposición final		
Inciso de la norma	Observancia	Consideraciones
c.1	No cumple	No se precisa la litología de los materiales, así como la geometría, distribución y presencia de fracturas y fallas geológicas en el sitio.
c.2	No cumple	No se determinaron las características estratigráficas del sitio.
d.1	No cumple	No se determinaron los parámetros hidráulicos, dirección del flujo subterráneo, características químicas y biológicas del agua.
d.2	No cumple	No se determinaron las unidades hidrogeológicas que componen el subsuelo, así como las características que las identifican (espesor y permeabilidad)

Tabla No. 16

7. Características constructivas y operativas del sitio de disposición final		
Inciso de la norma	Observancia	Consideraciones
7.1	No cumple	Se observan deficiencias en la colocación de la geomembrana, tales como: perforaciones, control en termofusión, falta de geomembrana en laguna de lixiviados.
7.3	No cumple	No existe planta de tratamiento y los requerimientos de captación y extracción se ven excedidos por la infiltración de aguas meteóricas. La disposición de lixiviados excedentes se hace en una excavación temporal habilitada como laguna de oxidación, por vertido en la barranca Sin Nombre o a través de pipas a la planta de tratamiento de aguas residuales US, Filter en Acapantzingo.
7.4	No cumple	El drenaje pluvial es rebasado por los escurrimientos debido a fallas en el diseño.
7.7	No cumple	La dispersión de residuos ligeros (plásticos), provocan daños al ganado localizado en terrenos adyacentes debido a su ingesta.
7.11.3	No cumple	No existe un programa de monitoreo de acuíferos que cuente con puntos de muestreo que responda a las condiciones particulares del sistema de flujo hidráulico, mismo que defina la zona de influencia del sitio de disposición final, y por lo menos, dos pozos de muestreo, uno aguas arriba y otro aguas abajo del sitio de disposición final. El pozo actualmente considerado como de monitoreo, esta situado a 4.6 km aguas abajo en la localidad de Pueblo Viejo.

VII. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones:

El sitio de disposición final Loma de Mejía incumple claramente con al menos 18 regulaciones de la NOM-083-SEMARNAT-2003, la mayoría de ellas relacionadas con las condiciones hidrogeológicas que han sido debidamente documentadas en el presente trabajo.

El impacto ambiental que puede esperarse bajo estas condiciones de localización y operación, es la contaminación de una parte importante del Acuífero de Cuernavaca, afectando principalmente a las microcuencas de Panocheras y El Limón –Pilcaya, donde existen manantiales y pozos de abastecimiento de agua potable dentro del municipio de Temixco, Mor.

Recomendaciones:

Como resultado de la serie de incumplimientos con la NOM-083-SEAMARNAT-2003 y derivado del fuerte conflicto social generado, el 12 de mayo de 2008 se formó un comité técnico integrado por representantes de la empresa PACSA, gobiernos municipales, organizaciones sociales, particulares e investigadores de la UNAM. Dicho comité acordó realizar la inspección de 15 sitios potencialmente factibles para el emplazamiento de un relleno sanitario sustituto, de acuerdo con la metodología propuesta que a continuación se describe:

En primer término se realizó un análisis espacial, utilizando como herramienta un sistema de información geográfica (**ANIDE, 2008**), considerando las restricciones que marca la norma para la ubicación de rellenos sanitarios. Dichas restricciones se resumen en los siguientes puntos:

6. Especificaciones para la selección del sitio

6.1 Restricciones para la ubicación del sitio

- a) Si la distancia es menor a 13 km del centro de aeropistas, su localización se determinará según un estudio de riesgo aviario (*Figura No. 40*).
- b) No ubicarse dentro de áreas naturales protegidas (*Figura No. 41*).
- c) Distancia mínima de 500 m a localidades mayores a 2, 500 habitantes (a partir de la traza urbana existente o futura). Ver *Figura No. 42*.

- d) No ubicarse en zonas de: marismas, esteros, pantanos, humedales, estuarios, planicies aluviales, fluviales, recarga de acuíferos, arqueológicas; ni sobre cavernas, fracturas o fallas geológicas (*Figura No. 43*).
- e) Su localización debe evitarse en zonas de inundación con periodo de retorno de 100 años. En caso contrario, demostrar que no existirá obstrucción del flujo o posibilidad de deslaves o erosión que afecten las obras que integren el relleno sanitario.
- f) La distancia con respecto a cuerpos de agua superficial de caudal continuo, lagos y lagunas debe ser de 500 m como mínimo (*Figuras Nos. 44, 45 y 46*).
- g) La ubicación entre el límite de disposición final y cualquier pozo de agua para uso doméstico, riego, industrial ó ganadero, tanto en operación como abandonados, será de 100 m adicionales a la proyección horizontal de la mayor circunferencia del cono de abatimiento. Cuando no se pueda determinar el cono de abatimiento, la distancia al pozo no será menor de 500 m.

Considerando los criterios señalados se obtiene la zonificación que se muestra en las siguientes figuras:

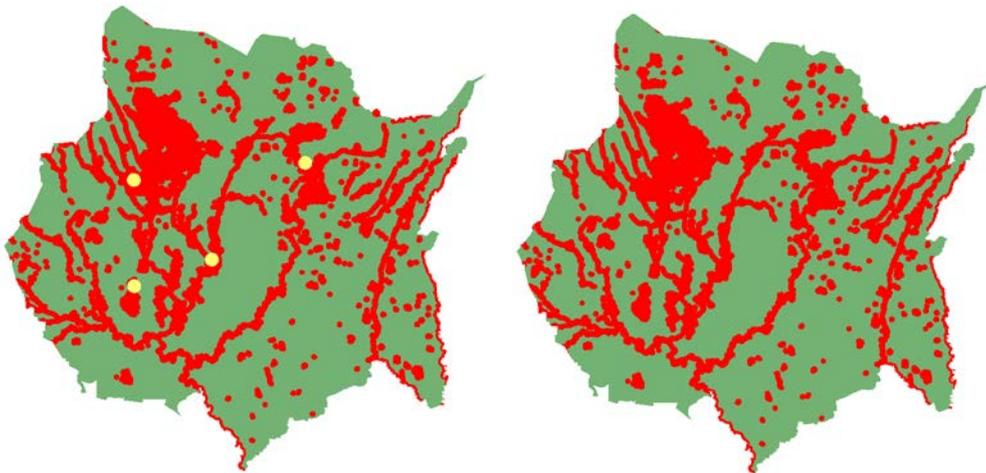


Figura No. 40 Restricción: 6.1 a) En distancias menores a 13 km de aeropistas requiere estudio de riesgo aviar.

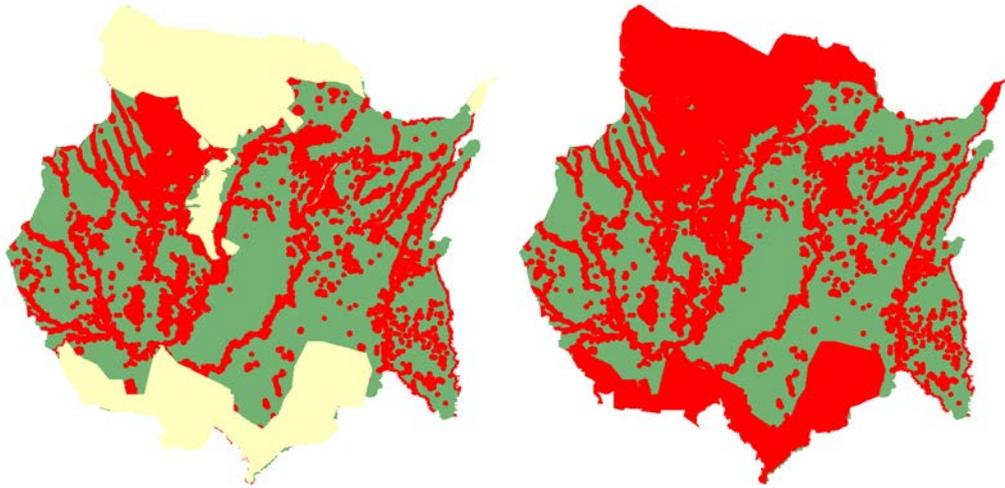


Figura No. 41 Restricción: 6.1 b) Fuera de Áreas Naturales Protegidas y Zonas Arqueológicas, a menos que se considere dentro del plan de manejo.

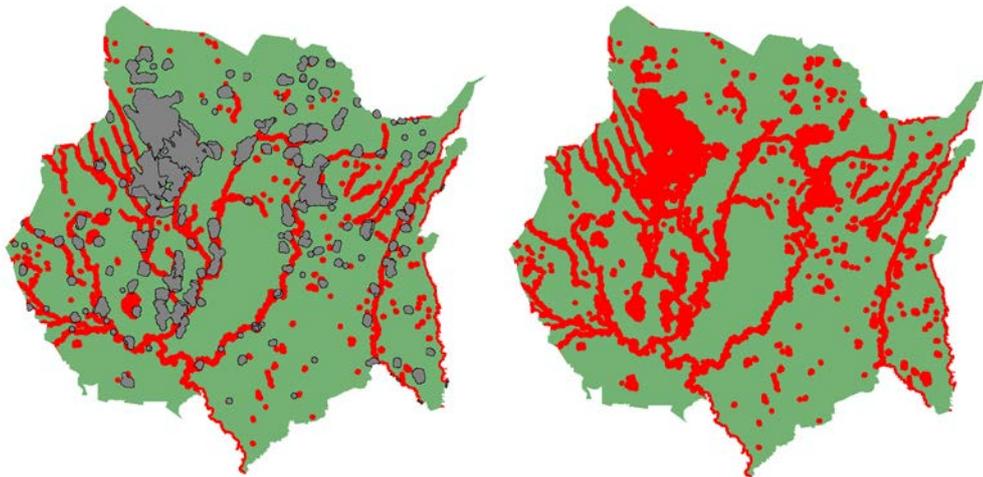


Figura No. 42 Restricción: 6.1 c) A 500 m de distancia (mínimo) de áreas urbanas con 2,500 o más habitantes

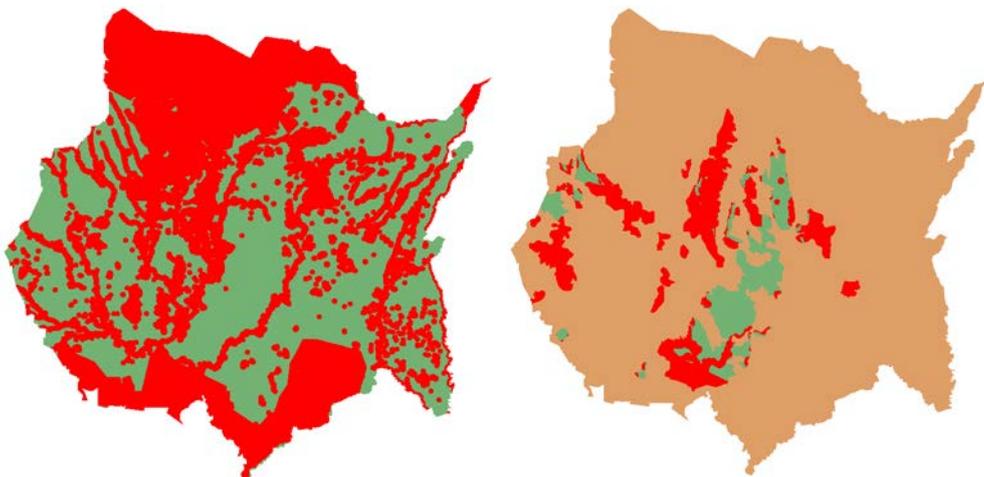


Figura No. 43 Restricción: 6.1 d) No ubicarse en planicies aluviales, fluviales, recarga de acuíferos, cavernas, fracturas o fallas geológicas.

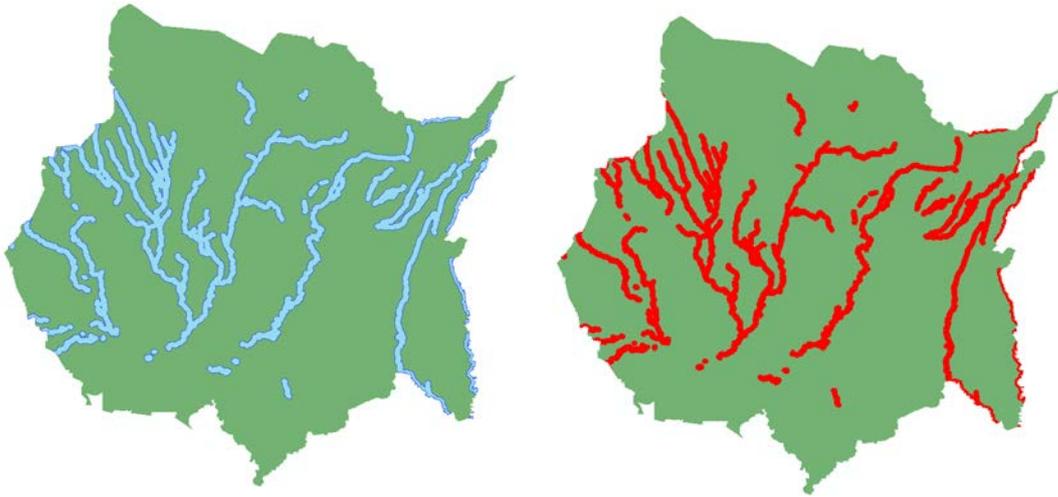


Figura No. 44 Restricción: 6.1 f) A 500 m de distancia (mínimo) de ríos o corrientes perennes.

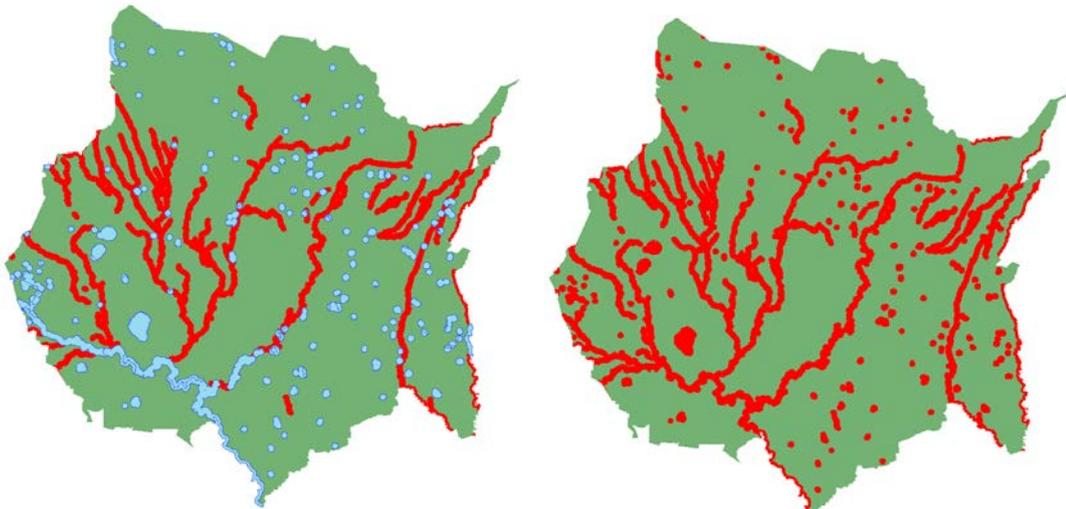


Figura No. 45 Restricción: 6.1 f) A 500 m de distancia (mínimo) de lagos, lagunas y esteros

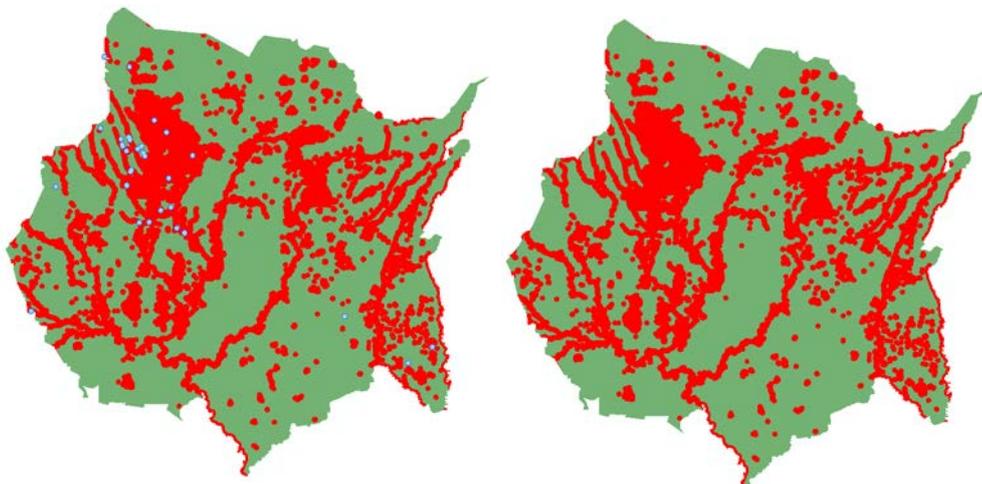
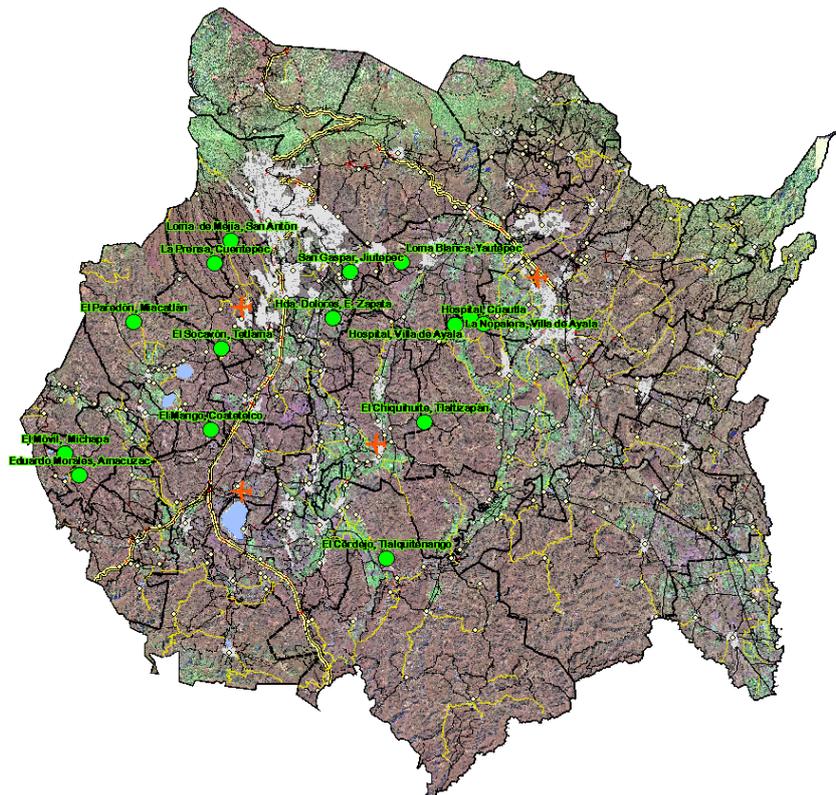


Figura No. 46 Restricción: 6.1 f) A 500 m de distancia (mínimo) de Manantiales

Áreas factibles para el emplazamiento de rellenos sanitarios de acuerdo con la NOM-083 en el Estado de Morelos: 20, 800 has.



Localización de sitios sujetos a evaluación técnica preliminar :



De acuerdo con los resultados anteriores se visitaron 15 sitios (incluyendo Loma de Mejía y La Prensa, Cuentepec), los cuales se muestran en la *Tabla No. 17*:

Tabla No. 17 Selección de sitios preliminares

RELACIÓN DE SITIOS VISITADOS POR LA COMISIÓN DE EVALUACIÓN PARA SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL			
No.	Nombre/Localidad	Coordenadas UTM WGS84	
		x	y
1	El Socavón, Tetlama	470159	2077828
2	La Prensa, Cuentepec	469433	2087210
3	El Paredón, Miacatlán	460576	2080732
4	El Mango, Coatetelco	469068	2068870
5	El Móvil, Michapa	453103	2066237
6	Eduardo Morales, Amacuzac	454667	2063828
7	La Nopalera, Villa de Ayala	495777	2080418
8	Hospital, Villa de Ayala	497439	2081213
9	Ex hacienda del Hospital, Cuautla	498849	2080553
10	Loma Blanca, Yautepec	489916	2087357
11	Loma de Mejía, San Antón	471192	2089666
12	San Gaspar, Jiutepec	484256	2086237
13	El Chiquihuite, Tlaltizapán	492431	2069684
14	Ex hacienda. Dolores, E. Zapata	482372	2081108
15	El Cerdejo, Tlalquilténango	488264	2054692

En adición a los criterios de zonificación descritos, se realizó una evaluación in situ en cada uno de los sitios previamente seleccionados, de acuerdo con el siguiente procedimiento:

1. *Evaluación del terreno seleccionado de acuerdo con los polígonos de factibilidad (zonificación).*
2. *Calificación de cumplimiento de la NOM-083 (1 cumple, 0 no cumple)*
3. *Ponderación de valores de acuerdo con la siguiente tabla (Tabla No. 18), según el grado de cumplimiento de las restricciones para la selección de sitios de disposición final:*

Tabla No. 18 Ponderación del cumplimiento de la NOM-083

>13 km	A.N.P.	>= 500 m / 2, 500 hab	Cond. Hidrol., Geol., Geohidrol.	Z.I. Tr = 100 años	>= 500 m / cuerp. Agua sup.	>= 500 m / Pozos Abast.
1	3	2	4	2	4	4

4. Multiplicar el valor ponderado por el factor de cumplimiento y efectuar la suma. Para el 100% de cumplimiento se tendría: Valor ponderado = 20.

Resultados:

Según el procedimiento descrito se obtuvieron las siguientes calificaciones:

Evaluación preliminar de acuerdo con el grado de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003

Sitio	Calificación NOM-083	Percepción social	Acceso
El Cerdejo	100	3	1.2
El Chiquihuite	96	3	1.67
Ex hacienda Dolores	96	2.5	2.67
La Nopalera	93	1.17	1.67
El Socavón	91	1.5	2.17
El Paredón	91	2.33	1.83
El Móvil	86	2.67	1.67
El Mango	77	2.67	3
Loma Blanca	70	1.17	2
Villa de Ayala	69	1.67	1.33
La Prensa	53	2	1.5
San Gaspar	50	1	2.5
Loma de Mejía	39	1.5	1.83
El Huajar	39	1.67	1.17
Eduardo Morales	30	2	1.5

De acuerdo con los resultados anteriores, se proponen los siguientes sitios para su consideración como sitios factibles:

- a) Hacienda Dolores, Municipio de Emiliano Zapata
- b) El Chiquihuite, Municipio de Taltzapán
- c) El Cerdejo, Municipio de Tlaquiltenango
- d) El Socavón, Municipio de Temixco
- e) El Paredón, Municipio de Miacatlán

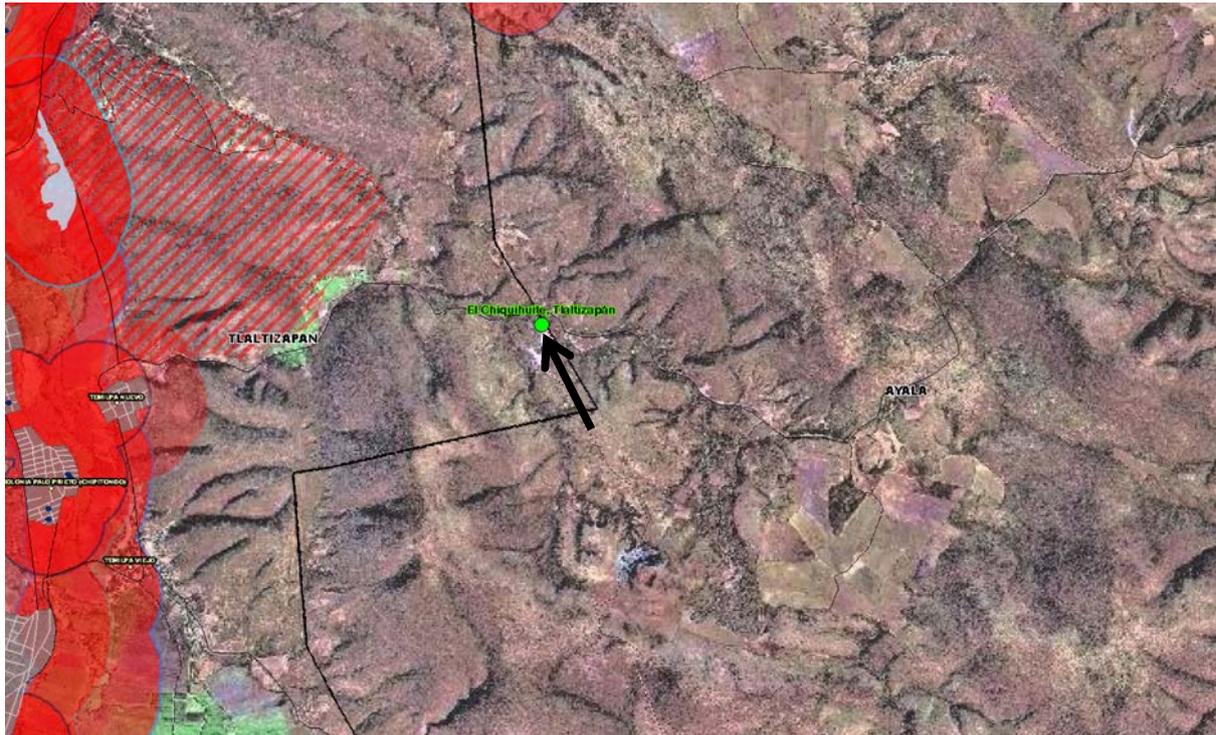
b) El Chiquihuite, Municipio de Tlaltizapán

Localización, coordenadas UTM, WGS-84:

X = 492, 431

Y = 2'069, 684

Zoneamiento según restricciones de la Norma:



Formación geológica: Grupo Balsas, conglomerado calizo soportado dentro de una matriz arcillosa.

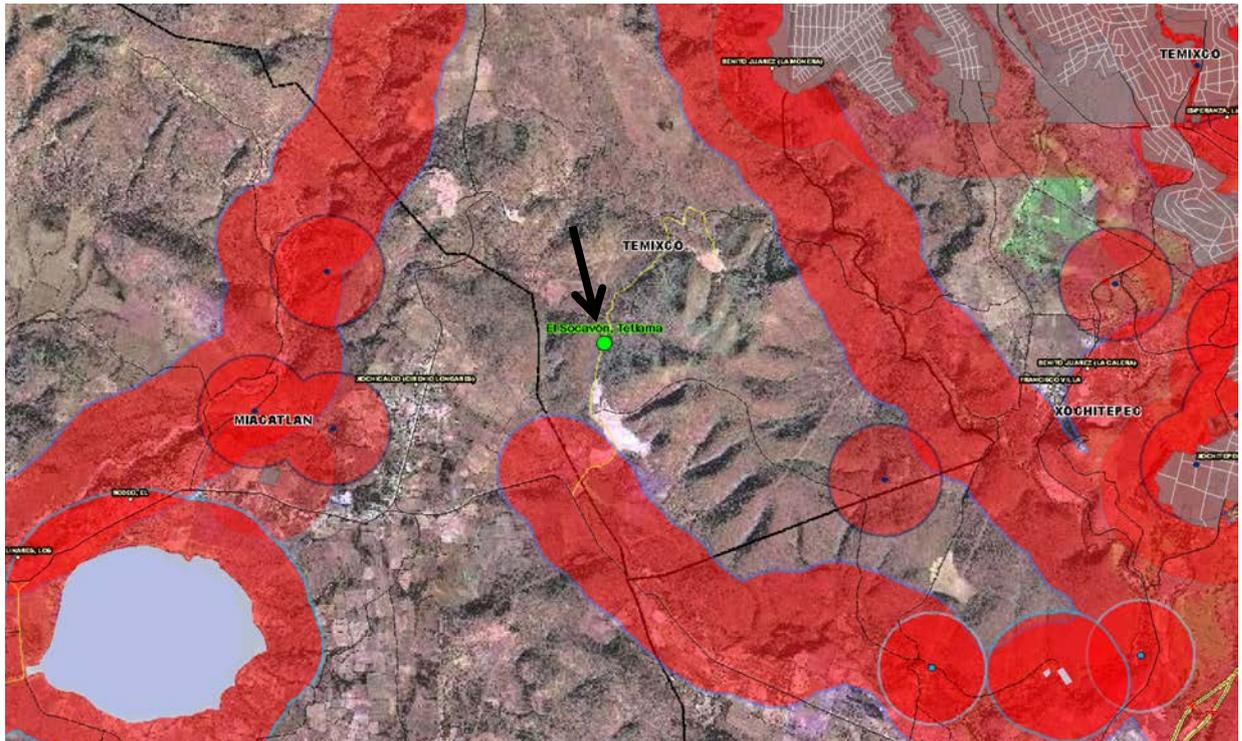
d) El Socavón, Municipio de Temixco

Localización, coordenadas UTM, WGS-84:

X = 470, 159

Y = 2' 077, 828

Zoneamiento según restricciones de la Norma:



Formación geológica: Grupo Balsas y Xochicalco. Conglomerado calizo y arcillas (Monmorillonita) y estratos de caliza delgada con pedernal, respectivamente.

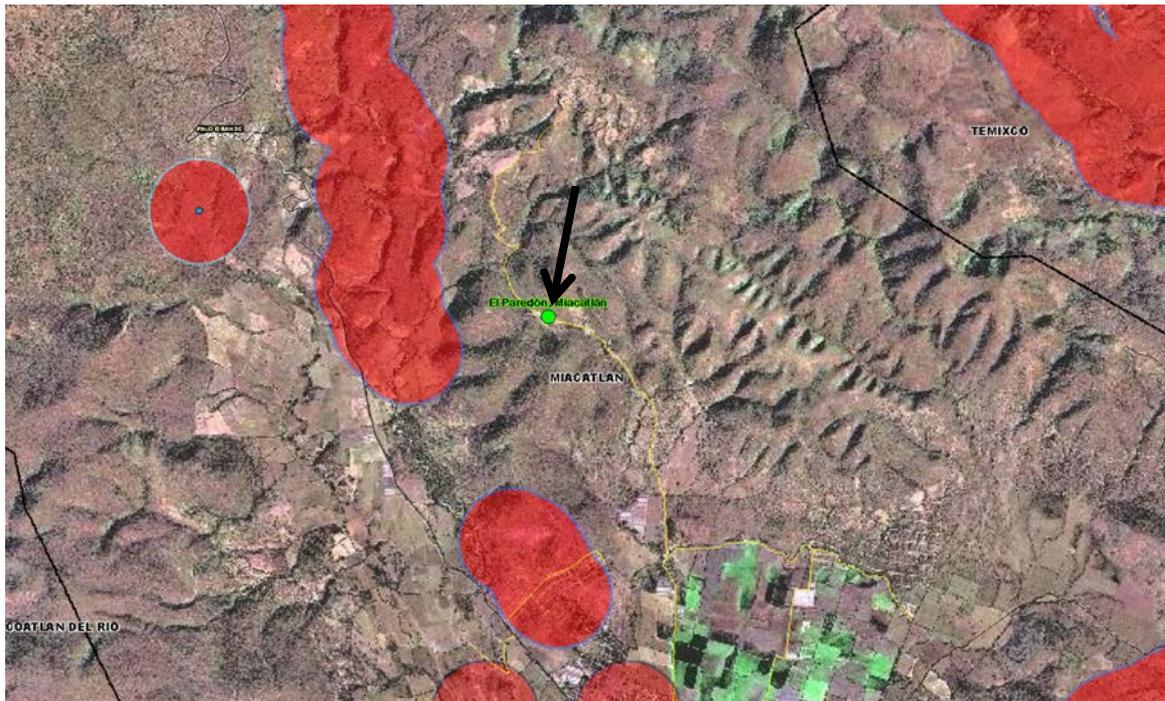
e) El Paredón, Municipio de Miacatlán

Localización, coordenadas UTM, WGS-84:

X = 460, 576

Y = 2' 080, 732

Zoneamiento según restricciones de la Norma:



Formación geológica: Grupo Balsas, Conglomerado calizo y arcillas.

VIII. Bibliografía

- Carl Fries, Jr. Geología del Estado de Morelos y de Partes adyacentes de México y Guerrero, Región Central Meridional de México. UNAM. Instituto de Geología. México, D.F. 1960.

- Carta Urbana, Plano E-7; Programa de Desarrollo Urbano Municipal de Temixco, 2005

- Caracterización Física del Pueblo de San Antón Analco y Áreas Adyacentes. Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, UNAM. Campus Cuernavaca (CRIM), 2006.

- Comisión Nacional del Agua. 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero de Cuernavaca, Mor.

- Estudio Geológico del Glacis de Buenavista, Academia Nacional de Investigación y Desarrollo, A.C. (ANIDE), 2008.

- La permeabilidad de los suelos en los problemas de transporte de contaminantes. Aplicación en la infraestructura del transporte. Publicación técnica No. 195. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), 2002.

- Ley Federal de Derechos (Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales), Subdirección General Jurídica de la Comisión Nacional del Agua, 2009.

- Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003.

- Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece los límites máximos permisibles de metales en suelos para uso agrícola, residencial y comercial.

- Paul A. Hsieh, programa TopoDrive del Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S. GEOLOGICAL SURVEY), 2001.

- Pohle, O. Notas de campo sobre recorridos de reconocimiento geológico en barrancas del Glacis de Buenavista.

- Pohle, O. Informe sobre las condiciones geohidrológicas del sitio “Loma de Mejía”. Ejido de San Antón, Cuernavaca, Mor. Facultad de Ingeniería, UNAM, 2008.

- TACSA. 1981. Estudio geohidrológico preliminar del Valle de Cuernavaca, en el estado de Morelos. Secretaría de agricultura y Recursos Hidráulicos.