



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE GEOLOGÍA
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

MODELO GEOESTADÍSTICO DE HIDROFACIES Y PARAMETRIZACIÓN
HIDROGEOLOGICA DE UNA PORCIÓN DEL ACUÍFERO ALUVIAL DE LA
CIUDAD DE MÉXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(AGUAS SUBTERRÁNEAS)

P R E S E N T A
PRISCILA MEDINA ORTEGA

DIRECTOR DE TESIS:
DR. ERIC MORALES CASIQUE



CIUDAD DE MÉXICO

2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

La realización de este proyecto se deriva del proyecto denominado “Delineación y caracterización de las unidades hidrogeológicas en el Valle de México” con clave PAPIIT-IA101412. Bajo la coordinación técnica del Dr. Eric Morales Casique del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Se agradece la información utilizada para la realización de este trabajo se derivan del proyecto denominado “Nivel de Riesgo en la Cd. De México en función de las características hidrogeológicas de la ZMVM y fuentes potenciales y activas de contaminación por hidrocarburos” clave CONACYT-DF 121128. Y el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX).

Tabla de contenido

RESUMEN.....	i
ABSTRACT	iii
CAPITULO 1.-Generalidades.....	1
1.1.- Antecedentes.....	1
1.2.- Localización.....	4
1.3.- Objetivo General.....	4
Objetivos particulares	5
1.4 Metodología	7
CAPITULO 2.-Marco geológico e hidrogeológico.....	9
2.1.-Geología Regional.....	9
Estratigrafía Regional de la Ciudad de México.....	9
2.2.- Estudios Previos	20
CAPITULO 3.-Marco Teórico: Conceptos básicos de Estadística, Geoestadística y estimación de parámetros.....	26
3.1 Conceptos básicos de estadística.....	26
3.2 Geoestadística	29
Funciones aleatorias espacialmente correlacionadas	30
Funciones aleatorias estacionarias	31
Funciones aleatorias intrínsecas.....	31
Funciones aleatorias no intrínsecas.....	32
Concepto de ergodicidad.....	32
Variograma	32
Semivariogramas teóricos	33
Anisotropía	39
3.3 Estimación del variograma mediante validación cruzada (minimización de los errores de estimación).....	40
3.4 Función indicador y krigeado indicador.....	42
Ecuaciones del krigeado Indicador	44
3.5 Simulación de variables categóricas	45
Simulación secuencial indicador	46

3.6 Estimación de parámetros con PEST	46
Estimación de parámetros para modelos lineales.....	47
Asignación de pesos a cada observación.....	49
El uso de información previa en el proceso de estimación de parámetros	50
Estimación de Parámetros no lineal	50
El parámetro Marquardt	53
3.7. Análisis de los intervalos de confianza y coeficiente de variación.....	55
CAPITULO 4. Análisis Geoestadístico	56
4.1.-Localización de los cortes litológicos	56
Geología local del área de estudio.....	56
4.2 Definición de las hidrofacies	67
Hidrofacies A.....	67
Hidrofacies B.....	67
Hidrofacies C	67
Hidrofacies D.....	68
4.3.-Identificación de hidrofacies.....	69
4.4.-Discretización de los datos	71
4.5.-Análisis de las proporciones con respecto a la profundidad.....	72
4.6.-Definición de zonas de modelación.....	77
4.7 Análisis geoestadístico de las hidrofacies.	79
4.8. Modelos tridimensionales de las hidrofacies.....	96
Modelo tridimensional de las hidrofacies Zona I.....	98
Modelo tridimensional de las hidrofacies Zona II	106
Modelo tridimensional de las hidrofacies Zona III.....	110
CAPITULO 5.-Parametrización hidrogeológica	122
5.1.- Modelación matemática con MODFLOW	122
5.2.-Estimación de parámetros con PEST.....	124
5.3.- Parametrización hidrogeológica	125
Condiciones de frontera.....	125
Discretización espacial.....	125
Discretización del tiempo.....	126

Carga hidráulica inicial.....	126
Distribución de las hidrofacies.....	128
5.4.- Modelación inversa con carga constante y carga variable.....	132
Caso Agrícola Oriental N° 4	132
Caso Ciudad Deportiva N°1	134
Caso Ciudad Deportiva N°2	137
5.5.-Resultados.....	140
5.6.-Análisis de los intervalos de confianza de los parámetros hidráulicos y coeficiente de variación.....	145
Conductividad hidráulica de la hidrofacies A (Ka).....	145
Conductividad hidráulica de la hidrofacies B (Kb).....	148
Conductividad hidráulica de la hidrofacies C (Kc)	151
Conductividad hidráulica de la hidrofacies D (Kd)	155
Almacenamiento específico de la hidrofacies A (Ssa).....	159
Almacenamiento específico de la hidrofacies B (Ssb).....	162
Almacenamiento específico de la hidrofacies C (Ssc)	165
Almacenamiento específico de la hidrofacies D (Ssd)	169
Conclusiones.....	172
Bibliografía	175
ANEXOS.....	i
Modelación de variogramas de la Zona I	ii
Análisis de sensibilidad de las hidrofacies A.....	vii
Parámetros hidráulicos (Instituto de Geofísica, 1994)	viii
Análisis de los parámetros hidráulicos (Instituto de Geofísica, 1994)	xii

RESUMEN

El sistema acuífero en explotación de la Ciudad de México está constituido por sedimentos lacustres que sobreyacen a depósitos aluviales y rocas volcánicas. La Ciudad de México, siendo una de las megalópolis más pobladas del mundo, ejerce una gran presión sobre este sistema acuífero en términos de extracción intensiva de agua y contaminación. Para afrontar estos retos, el manejo del sistema hidrogeológico requiere, entre otros aspectos, del conocimiento de la distribución espacial de las unidades hidrogeológicas y de la variación espacial de sus propiedades. El propósito del presente trabajo es la obtención de un modelo tridimensional de una porción del sistema hidrogeológico partir de registros litológicos de pozos y geoestadística; este modelo proporciona una mejor definición de la variabilidad espacial del sistema.

El área de estudio está comprendida en la porción sur –sureste de la Ciudad de México con área aproximada de 250 km². El conjunto de datos incluyó 111 registros litológicos de pozos, con un profundidad promedio de 300 metros, obtenidos del Sistemas de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), tesis de licenciatura y maestría y de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

De los registros litológicos se identificaron 9 tipos diferentes de sedimentos que fueron agrupados en cuatro hidrofacies. Una hidrofacies agrupa una o más litologías con propiedades hidráulicas similares. Las hidrofacies identificadas son de baja permeabilidad (denotadas A y B), y de alta permeabilidad (denotadas C y D). Una vez clasificados en hidrofacies, los registros litológicos fueron discretizados utilizando una función indicador para cada hidrofacies. De este proceso se obtuvieron 13,518 datos espaciales. A partir de estos datos se calcularon variogramas experimentales de las hidrofacies y se ajustó un modelo exponencial a cada variograma experimental mediante la minimización de los

Modelo geostatístico de hidrofacies y parametrización hidrológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

errores de validación cruzada con ayuda de software gratuito (PEST-Parameter ESTimation (Doherty,2005) y GSLIB (Deutsh y Journal,1998)).

Posteriormente, se exploraron dos opciones para obtener el modelo tridimensional de las hidrofacies: (a) mediante krigeado indicador y (b) mediante simulaciones secuenciales indicador. Para estas dos alternativas se utilizó el software GSLIB. Se discute que el modelo obtenido mediante la simulación (opción b) representa de manera más realista la distribución de hidrofacies.

Finalmente, puesto que se contó con tres pruebas de bombeo en el área de estudio, se construyeron modelos de flujo de agua subterránea utilizando el código Modflow. En estos modelos, la distribución espacial de las hidrofacies fue obtenida del modelo tridimensional de la opción (b). Utilizando el software PEST, se realizó una modelación inversa de las pruebas de bombeo para estimar los parámetros hidráulicos de las hidrofacies, suponiendo que cada hidrofacies es homogénea (esto debido a que únicamente se midió abatimiento en el pozo de bombeo).

La metodología implementada en esta tesis permite obtener un modelo tridimensional de la distribución espacial de hidrofacies en un sistema acuífero, condicionado en información de registros litológicos. Por otra parte, la estimación de parámetros hidrogeológicos mediante la inversión de pruebas de bombeo es factible pero se necesita de mediciones piezométricas independientes en cada hidrofacies para reducir la incertidumbre en los parámetros estimados.

ABSTRACT

The aquifer system in Mexico City is composed by lacustrine sediments that overlay alluvial deposits and volcanic rocks. Being one of the largest megalopolis in the world, Mexico City exerts considerable pressure on the aquifer system in terms of abstraction of water and contamination. To meet these challenges, managing the hydrogeologic system requires, among other elements, knowledge of the spatial distribution of the hydrogeologic units and the spatial variability of their properties. The aim of this work is to obtain a tridimensional model of a portion of the hydrogeologic system based on lithologic records from groundwater wells and using geostatistics; this model would provide a better representation of the spatial variability of the system.

The study area is located in the south-southeast portion of Mexico City with an area of approximately 250 km². The data set included 111 lithologic records from groundwater wells, with an average depth of 300 m, obtained from Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), from bachelor's and master's thesis and from the Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

From this data set 9 different types of lithologic categories were identified and these were further grouped into four hydrofacies. A hydrofacies groups one or more lithologic categories with similar hydraulic properties. The hydrofacies defined in this work are two with low permeability (denoted A and B), and two of high permeability (denoted C and D). Once grouped in hydrofacies, the data set was discretized using an indicator function for each hydrofacies. A total 13,518 spatial data were obtained from this process. Experimental variograms were computed from this second data set for each hydrofacies; an exponential model was fitted to each experimental variogram by minimizing the cross-validation errors using free software (PEST-Parameter ESTimation (Doherty,2005) and GSLIB (Deutsch and Journel,1998)).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

To obtain a tridimensional hydrofacies model, two options were explored: (a) using indicator kriging and (b) using sequential indicator simulations. These two alternatives were implemented using the software GSLIB. It is argued that option b represents the distribution of hydrofacies in a more realistic way.

Finally, since three pumping tests were available in the study area, groundwater flow models were built using Modflow. In these groundwater flow models, the spatial distribution of the hydrofacies was obtained from the tridimensional model using option (b). Inverse modeling of the pumping tests was conducted, using PEST, to estimate hydrogeologic parameters for each hydrofacies, assuming each hydrofacies is homogeneous (this assumption was adopted because only the drawdown in the pumping well was available).

The methodology implemented in this thesis allows obtaining a tridimensional model of the spatial distribution of the hydrofacies in a hydrogeologic system, conditioned on soft information (lithologic records). On the other hand, estimating hydrogeologic parameters by inverse simulation of pumping tests is feasible, but it is necessary to record piezometric level data in each hydrofacies (by means of piezometers, for example) to reduce uncertainty in the estimated parameters.

CAPITULO 1.-Generalidades

1.1.- Antecedentes

Los cuerpos sedimentarios como los aluviones son depósitos alternados de capas de granos finos a granos grandes quedando en manifiesto que tiene una gran heterogeneidad que puede afectar en propiedades de diversa índole, ya sean geotécnicas, hidráulicas, geológicas y geofísicas. En la hidrogeología la caracterización a detalle a profundidad de la heterogeneidad puede mejora los modelos de aguas subterráneas con procesos de transporte de contaminantes (Fogg, *et al*, 1986; Anderson, 1987; Johson y Dreiss, 1989). La variabilidad de los cuerpos son producto de factores de temporalidad y complejidad de los procesos responsables de la formación terrestre, erosión transporte y deposición (Marsily *et al.*, 1998.). En un intento para mejorar la descripción de la heterogeneidad, diversos estudios de caracterización hidrogeológica han aprovechado el concepto de facies sedimentaria (Anderson, 1987; Johson y Dreiss, 1989). Las facies sedimentarias son definidas con base a las características litológicas, texturales y estructurales del sedimento las cuales reflejan variaciones de los procesos de transporte y de los mecanismos de depósito. Un concepto relacionado es el de litofacies, que se definen como los sedimentos con características litológicas, texturales y estructurales que manifiestan variaciones de los procesos de transporte y mecanismos de depósito (Green y Swift, 2001).

En el contexto hidrogeológico, a partir de las litofacies y/o las facies sedimentarias se definen las hidrofacies. Una hidrofacie agrupa una o más litofacies que exhiben o poseen comportamiento hidráulico similar (Ritzi, 2000). El concepto de hidrofacie ha sido muy utilizado para representar la variabilidad espacial en acuíferos

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

sedimentarios (Johnson y Dreiss, 1989; Anderson et al, 1999; Weissmann et al, 1999; Ritzi, 2000; Heinz et al, 2003; Lunt et al, 2004; Lee et al., 2007, entre otros.

En la descripción cuantitativa de la heterogeneidad integrando conceptos de hidrofacies los métodos geoestadísticos han sido ampliamente utilizados, desarrollados a través de los años y aplicados en las reconstrucciones geoestadísticas tridimensionales de las hidrofacies de acuíferos. Entre las aplicaciones se encuentran: el acuífero aluvial al NW de España (Falivene *et al.*, 2007a); acuífero glaciofluvial en el Oeste y Centro de las planicies de Norte América (Ritzi *et al.*, 1994); acuífero Livermore Valley, EUA (Fogg *et al.*, 1998); reconstrucción de cuerpos sedimentarios palustre-aluvial y turbidíticos en España (Falivene *et al.*, 2007b); Cuenca Ainsa en el norte de España (Falivene *et al.*, 2006); Santa Clara Valley, EUA (Johnson *et al.*, 1995); acuífero de Bologna en Italia (Guadagnini *et al.*, 2004); acuífero aluvial en Milán (dell’Arciprete *et al.*, 2011). En estos trabajos se ha obtenido la distribución espacial de hidrofacies mediante geoestadística y esto ha permitido interpretar parámetros hidrogeológicos, espesores de cuerpos rocosos y sedimentarios, parámetros geológicos, así como apoyar en la interpretación de correlación estratigráfica.

El sistema hidrogeológico de la Ciudad de México está compuesto por una gran variedad de litologías en el subsuelo (Mosser, 1996). Los primeros 300 a 400 metros son constituidos por sedimentos lacustres sobreyaciendo a sedimentos aluviales y rocas volcánicas como tobas, dacitas, basaltos y andesitas de las diferentes formaciones de alrededor. Generalmente estas litologías son representadas como un grupo de capas, sin representar la gran heterogeneidad litológica que existe en ellas, menos aún respecto a sus propiedades hidrogeológicas (particularmente conductividad hidráulica y almacenamiento específico). Los sedimentos lacustres se originaron en una compleja sucesión de estratos arcillosos, intercalados con capas y lentes duros (Mooser, 1986; Santoyo, 1990). De acuerdo con Mooser(1986) la estratigrafía de la planicie lacustre de la Ciudad de México en los primeros 80 m son los siguientes: Los suelos húmicos del

Modelo geostatístico de hidrofacies y parametrización hidrológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Holoceno en depósitos recientes (0-5m aproximadamente), la serie lacustre superior (arcillas poco consolidadas) compuesto de caliche, pómez de diversas variedades, ceniza basáltica, arcilla y suelo duro (5-35 m aproximadamente), capa dura producto del 3er interglacial, serie lacustre inferior (arcillas muy consolidadas) compuestas de arcillas, arenas, gravas (deslaves glaciares) de aproximadamente una profundidad de 38 -85 m. Esta descripción resalta la variabilidad vertical que existe en esos depósitos y algunas de esas capas no necesariamente tienen continuidad horizontal. Los depósitos aluviales alcanzan espesores máximos de 500 m que disminuyen a las márgenes. Es material poco consolidado compuesto de fragmentos de tamaño de grava, arena, limos y arcillas (Fries, 1962) y se muestra gran heterogeneidad de la granulometría de los mismos. Presentan una discordancia con los depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno y se interdigita con las formaciones volcánicas de forma concordante. Esta descripción evidencia la heterogeneidad de estos depósitos. Generalmente estas litologías son representadas como un grupo de capas dado su ambiente de formación, un ambiente aluvial. El cual denota su heterogeneidad y difiere con los demás depósitos y rocas presentes en la Cuenca de México.

Los trabajos que se han realizado en la Cuenca de México van desde la descripción geológica (Vázquez-Palomera, 1989; Mooser, 1974 ; Lesser, 2000; Frías, 1962; Valencia-Cruz, 2002), la definición de la estructuras geológicas a profundidad por métodos geofísicos (Pérez-Cruz, 1988; Mooser, 1990; De Cserna et al., 1988;), estudios geotécnicos (Santoyo *et al.*, 2005; Juárez; 2001; Santoyo *et al.*, 1990; Marsal *et al.*, 1990), el hundimiento de la ciudad de México (Hiriart *et al.*, 1969, Carrillo, 1969; Cruickshank *et al.*, 1979; DGCOH-DDF, 1992, 1994, 1982, Lesser *et al.*, 1998) y problemáticas con el agua subterráneas de la Ciudad y su contaminación (Instituto de Geofísica, UNAM, 1994; Soto *et al.*, 2000; Vargas y Ortega-Guerrero, 2004; Ángeles-Serrano, 2001; Cedillo *et al.*, 2008) por mencionar algunos.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Actualmente, las profundidades de los pozos de extracción de agua de abastecimiento de agua potable explota el acuífero aluvial oscilan entre 100 m a 400 m (CONAGUA, 2002). La variabilidad de la geología descrita anteriormente de la cuenca de la Ciudad de México nos da pauta a la elaboración del presente trabajo; cuyo objetivo es el analizar la heterogeneidad de un complejo aluvial y lacustre mediante el análisis geoestadístico de las litologías y agruparlas en hidrofacies hasta una profundidad de 300 m en las delegaciones Iztapalapa, Iztacalco y Coyoacán donde se tiene la concentración de datos de pozos de extracción de agua potable de la Ciudad de México.

1.2.- Localización

La zona de estudio se localiza principalmente en las delegaciones de Iztapalapa, Coyoacán, Iztacalco y comprende un área de 234 km² con las siguientes coordenadas 481,000 m a 499,000 m Este y 2,133,000 m a 2,146,000 m Norte (figura I.1).

1.3.- Objetivo General

El propósito de este trabajo es la reconstrucción tridimensional de la distribución de las hidrofacies en una porción del acuífero aluvial de la ciudad de México basados en la descripción litológica obtenida de registros litológicos de pozos y explorar la factibilidad de asignar parámetros hidrogeológicos a estas hidrofacies mediante la inversión de pruebas de bombeo. Con ello, entender y representar cuantitativamente los patrones de variabilidad espacial de las hidrofacies que constituyen el sistema hidrogeológico actualmente en explotación en una porción de la Ciudad de México

Objetivos particulares

Con el objetivo de obtener un modelo tridimensional y parámetros hidrológicos de una parte del acuífero aluvial de la Ciudad de México se plantearon los siguientes objetivos particulares:

- I. Investigar la factibilidad de describir la distribución espacial de hidrofacies a partir de información cualitativa (cortes litológicos de pozos).
- II. Representar la estructura de correlación espacial de las hidrofacies mediante geoestadística indicador.
- III. Con base en simulación estocástica, obtener un modelo tridimensional de las hidrofacies de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México.
- IV. Proponer valores de conductividad hidráulica y almacenamiento específico de las hidrofacies mediante la inversión de pruebas de bombeo.

Modelo geostatístico de hidrofacies y parametrización hidrológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

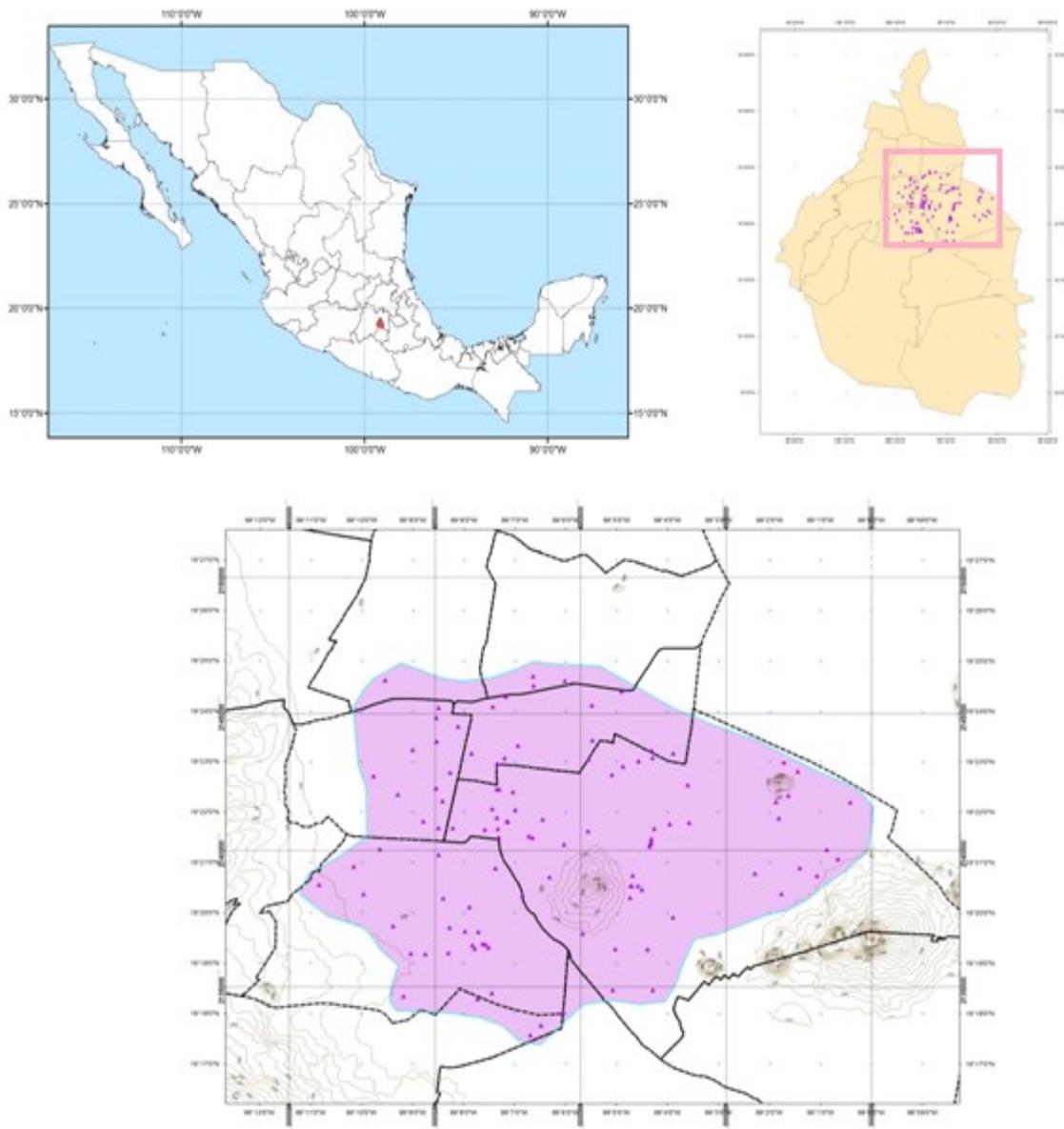


Figura I.1. Localización de la zona de estudio se encuentra en la Cuenca de México.

1.4 Metodología

Con base en los objetivos particulares se planteó la siguiente metodología:

- I. Recopilación de información. Incluye información bibliográfica tal como artículos de revistas científicas, documentación de informes técnicos o proyectos de la zona de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Petróleos Mexicanos (PEMEX), tesis de licenciatura, maestría y doctorado, mapas geológicos (Servicio Geológico Mexicano (SGM), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), etc.). Como resultado de la recopilación de información se obtuvieron 111 registros litológicos de pozos. Las fuentes de esta información fueron los Sistemas de Aguas de la Ciudad de México, la base de datos del proyecto “Nivel de Riesgo en la Cd. De México en función de las características hidrogeológicas de la ZMVM y fuentes potenciales y activas de contaminación por hidrocarburos” (Hernández - Espriú, 2013) y los registros litológicos reportados por Valencia Guzmán (2002).
- II. Análisis de la información. Incluye: identificar y estandarizar clases litológicas, discretizar los cortes litológicos de pozos cada 2 metros, asignar valores indicador, calcular proporciones, histogramas, etc. Este análisis fue apoyado en secciones geológicas representativas de la zona. Las categorías litológicas fueron agrupadas en hidrofacies.
- III. Análisis estructural de las hidrofacies. Consiste en calcular variogramas experimentales para cada hidrofacies, en las direcciones horizontal y vertical. A los variogramas experimentales se les ajustó un modelo teórico cuyos parámetros fueron optimizados minimizando los errores de validación cruzada. Para esto acoplamos la librería *Flexible*

- 3D Kriging Program (kt3d)* de krigeado de GSLIB (Deutsch y Journel, 1998) con el código PEST para estimación de parámetros (Doherty 1994).
- IV. Interpolación de hidrofacies utilizando krigeado indicador (ajustado/corregido con las proporciones). Con esto se obtiene un estimado suavizado de la distribución de hidrofacies y un estimado del error de interpolación.
- V. Simulación estocástica. El modelo tridimensional es el conjunto de todos los puntos con mayor probabilidad de esa hidrofacies del área de estudio, mediante 1000 realizaciones equiprobables conseguidas por simulación secuencial indicador (Sisim) implementada en el paquete GSLIB (Deutsch y Journel, 1998).
- VI. Estimación de parámetros hidrogeológicos de las hidrofacies mediante la inversión de pruebas de bombeo obtenidas en la zona de estudio. Se construyó un modelo computacional de flujo de agua subterránea y utilizando el modelo 3D de hidrofacies obtenido en el inciso 5. Para simular el flujo se utilizó el código MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988) y el problema inverso se resolvió acoplado el modelo de flujo con PEST (Doherty, 1994). Puesto que únicamente se cuenta con 3 pruebas de bombeo, se adopta el supuesto de que cada hidrofacies es homogénea. Para determinar una distribución heterogénea de propiedades hidráulicas en cada hidrofacies sería necesario contar con un mayor número de mediciones de carga hidráulica con una distribución 3D en la zona de estudio (ver por ejemplo Vesselinov *et al.* 2001a, 2001b; Morales-Casique *et al.* 2010).

CAPITULO 2.-Marco geológico e hidrogeológico

En este capítulo se presenta una breve revisión de la geología de la Cuenca de México y posteriormente una revisión de los estudios previos relacionados con la hidrogeología regional y local.

2.1.-Geología Regional

Estratigrafía Regional de la Ciudad de México

Vázquez-Sánchez y Jaimes–Palomera (1989) realizaron una extensa recopilación de la geología de la Ciudad de México y sus alrededores. A continuación se describen brevemente las unidades estratigráficas que ellos identifican y su distribución espacial se muestra en las figuras II.1 y II.2:

Formación Xochicalco (Kx)

Esta formación fue descrita por Fries (1960), del Aptiano, de un ambiente de depósito de cuenca relativamente profunda, está constituida por una secuencia de calizas con contenido de carbón variable y presenta laminación, vetillas y nódulos de pedernal. Su espesor mínimo es de 500 m y sobreyace discordantemente a la Formación Morelos.

Formación Morelos (Km)

Aflora al sur de la Sierra de Chichinautizin, su edad es variable dependiendo de la localidad y la presencia de erosión y superficie irregular donde se depositó (Fries, 1960). La presencia de *Dicyclina schlumbergeri* y *Nummoloculina heimi* la posicionan en el Albiano medio – Cenomaniano. La litología está compuesta por calizas y dolomías en una secuencia interestratificada con presencia de nódulos de pedernal. Su espesor se estima entre 250 a 1000 metros (De Cserna, 1978; Fries 1957, 1960; Benavides-Muñoz, 1978). En la Ciudad de México fue registrada

Modelo geostatístico de hidrofacies y parametrización hidrológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

en los pozos exploratorios Mixhuca-1 y Tulyehualco-1 (Pemex, 1988) a las profundidades de 2060 m con un espesor de 410 m perforados y 2160 m con espesor de 410 m, respectivamente. En estas calizas se identificaron las fósiles reportados por Fries en 1960.

Formación Doctor (Kid)

Esta formación ha sido estudiada por Wilson *et al.* (1955). Es una secuencia carbonatada de unos 200 m de espesor, compuesta de calizas arcillosas, lutitas y lutitas con areniscas y rocas volcánicas de edad Albiano Medio-Cenomaniano Temprano. Las calizas son facies de plataforma y borde de plataforma. (Carrillo-Martínez, 1981) y aflora en el norte de la cuenca en Apaxco y Tula, Hidalgo. Fries (1962) sugiere la presencia de interdigitación de ésta al sur con la Formación Morelos.

Formación Cuautla (Kc)

Aflora al sur de la Sierra de Tepoztlán y al norte de Zumpango. Fries (1960) identifica tres facies principales: a) una sucesión de calizas gruesas con estratificación de mediana a gruesa, la que es muy similar con la Formación Morelos b) sucesión delgada de calizas laminadas de estratificación delgada a mediana y c) sucesión muy delgada de calizas clásticas de laminación delgada. El espesor es variable, desde algunos metros hasta de 750 m dependiendo de la localidad Fries (1960). Su distribución es amplia en el norte de Morelos, continúa en la Cuenca de México debajo de los depósitos terciarios y vuelve a aflorar en el Estado de Hidalgo con facies de banco. En la ciudad de México fue registrada en los pozos Mixhuca-1 y Tulyehualco-1 (Pemex, 1988) a profundidades de 1575 m y 2100 m respectivamente. Tiene un contacto concordante con la Formación Mezcala y contacto discordante por el Grupo Balsas y rocas del Terciario y Cuaternario.

Formación Mezcala (Kmx)

De edad Coniaciano-Maastrichtiano (Fries, 1958,1960; Aléncaster, 1980; Aguilera-Franco, 2000; Guerrero-Suástegui, 2004, Zamudio-Ángeles, 2005), es una secuencia de areniscas, limolita y lutitas calcáreas interestratificadas, con pocos lentes de caliza clástica y con variaciones laterales y verticales de la litología. En su capa basal es caliza arcillosa o limolita calcárea, con espesor de hasta 30 m. En las capas superiores hay interestratos de arenisca o subgrauvaca, y aparecen capas de conglomerado de grano fino. En la secuencia superior decrecen los carbonatos y aparecen intercalaciones lenticulares de conglomerado calizo con cuarzo y otros minerales de origen volcánico (Fries, 1958,1960). En el pozo Mixhuca-1, a profundidades de 1720 m a 1850 m, se identificaron calizas arcillosas con material fósil que se relaciona con esta unidad (PEMEX, 1988).

Grupo Balsas (Teob)

Es un grupo de rocas de diferentes litologías y de espesor variable, entre las que se encuentran yeso, limolita tobácea, tobas volcánicas, brechas, calizas lacustres, conglomerados calcáreos, brechas y derrames volcánicos (Fries, 1960). Son las rocas más antiguas del Terciario (Eoceno Tardío – Oligoceno Temprano) depositadas sobre sucesiones Cretácicas y pre Cretácicas deformadas y erosionadas. El espesor del Grupo Balsas es variable dependiendo del lugar ya que el espesor original no está conservado. En el pozo Texcoco-1 Schlaepfer, (1968) describe conglomerados calcáreos cubiertos por limolitas calcáreas con depósitos evaporíticos, mientras que en el pozo Roma-1 se registraron tobas cubiertas de derrames lávicos con brechas calcáreas a la profundidad de 2680 m (PEMEX, 1988). De Cserna et al. (1988) sugieren que este Grupo se depositó al mismo tiempo que ocurría un fallamiento lateral derecho y volcanismo fisural.

Rocas volcánicas del Oligoceno Tardío – Mioceno Temprano (Tomv)

Es una serie de rocas volcánicas que varía en composición de andesita a riodacita. Se diferencian del Grupo Balsas y las rocas de Mioceno Medio – Tardío por características litológicas, edad y relaciones estratigráficas. Son secuencias de tobas líticas, cristalinas y vítreas, brechas tobáceas y aglomerados con derrames intercalados con espesores de capas aluviales de 6 m. En los pozos Copilco-1, Mixhuca-1 y Roma-1 se describen como derrames lávicos basálticos. Estas rocas sobreyacen de forma discordante al Grupo Balsas y a las rocas Cretácicas. En el pozo San Lorenzo Tezonco (Arce *et al.* 2013a,2013b) se reportan como secuencias de flujos de lava andesítica, gris oscuro con cristales de plagioclasas, ortopiroxenos y cuarzo en una matriz vítrea en un intervalo de 1470 a 1510 m, con secuencias de flujos de lava andesíticas y andesíticas basálticas y basálticas del intervalo de profundidad de 1510 al 2008 m.

Rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío (Tmv)

Los afloramientos se presentan en áreas restringidas dado que están cubiertas por depósitos recientes volcánicos y se localizan en los cerros El Judío, Los Remedios, El Peñón de los Baños y la base de la Sierra de las Cruces, El Elefante, la base de la Sierra de Guadalupe, entre otros lugares. Es una sucesión de tobas, brechas volcánicas e intercalaciones de derrames de composición andesítica de lamprobolita o de augita, dacitas y andesitas de hiperstena. En el pozo Texcoco-1 se registro con un espesor de 116 m (814m -920 m), en el Copilco-1 un espesor de 400 m (1180m -1580 m), en el Tuyehualco-1 un espesor de 810 m (930m -1740 m), en el Mixhuca-1 un espesor de 210 m (880m -1190 m) y en el Roma-1 un espesor de 573 m (633 m -60 m). De acuerdo a estudios previos a la unidad la edad asignada es del Mioceno Medio al Mioceno Tardío. En el pozo San Lorenzo Tezonco (Arce *et al.* 2013a,2013b) se reportan secuencias de lava con depósitos de piroclásticos andesíticos y una secuencia de

flujos de lava porfíricas de color oscuro en un intervalo de profundidad de 875 m a 1470 m.

Depósitos volcánicos del Plioceno Temprano (Tpv)

De acuerdo con Segerstrom (1961) y Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989) es un segundo ciclo magmático que aflora localmente en los flancos de las Sierras de Guadalupe y Zempoala y en la cima de las Sierra de Guadalupe y Tepetzotlán. Esta unidad se interdigita con los depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno (**Tppc**). Su composición varía de andesítica a dacítica y se le asigna una edad tentativa del Plioceno Temprano. En los pozos profundos Roma-1 y Coplico-1 se encontró a profundidades de 315 m a 648 m y de 550 m a 1150 m, respectivamente. En el pozo San Lorenzo Tezonco (Arce *et al.* 2013a,2013b) se reportan ignimbritas de color rosado poco consolidados en una profundidad de 700 a 760 m.

Formación Otomí (Tpo)

Son depósitos piroclásticos de flujos lobulados que son secuencias de surges de cristales y depósitos piroclásticos de ceniza (cristalina o vítrea). Esta unidad aflora en las regiones altas de la Sierra de Monte Alto y presenta intercalaciones de brecha y derrames lávicos. Su espesor estimado es de 1300 m y cubre discordantemente a las rocas volcánicas del Plioceno Temprano. Se le asigna una edad del Plioceno Tardío Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989).

Formación Las Cruces (Tpc)

Es una sucesión de rocas volcánicas y sucesiones piroclásticas que forma a las sierras de Las Cruces y Monte Alto. Son tres estratovolcanes que presentan un lineamiento al NNW al SSE y separan la Cuenca de México con la del Río Lerma. Los derrames son de composición de andesita de pigeonita o lamprobolita con intercalaciones de brechas líticas de andesita porfídica. Los depósitos piroclásticos

Modelo geostatístico de hidrofacies y parametrización hidrológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

consisten en depósitos de corrientes piroclásticas (surges) vítreas con pómez ocasionalmente y cubiertas con flujos piroclásticos no soldados de cenizas cristalinas, vítreas de composición heterogénea. Los espesores de esta unidad son variables pero en el cerro de San Miguel registró 990 m. En el pozo Copilco-1 se le encontró a la profundidad de 25 y 510 m (PEMEX, 1988).

Formación Zempoala (Tpz)

Es un conjunto de productos volcánicos (andesitas y depósitos piroclásticos, flujos de ceniza y brechas volcánicas) provenientes de dos centros eruptivos alineados de N-S al sur de la Sierra de las Cruces (Schlaepfer, 1968). Su espesor máximo es de 1000 m en el cerro de Zempoala y su edad es Plioceno Tardío. Esta formación cubre discordantemente a los depósitos volcánicos del Plioceno y a las rocas extrusivas del Mioceno Medio al Mioceno Tardío.

Depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno (Tppc)

Estos depósitos fueron reconocidos por Segerstrom (1961). Alcanzan un espesor de 750 m y están constituidos por gravas, arcillas, arenas, y limos de origen ígneo. Su edad es del Plioceno y su espesor disminuye hacia los márgenes y se interdigita con unidades volcánicas del Plioceno.

Formación Llano Grande (Qllg)

Son secuencias eruptivas de lapilli pumítico y lítico de caída, surges laminares y sand wave, flujos de ceniza vítreas y brechas soldadas de flujos, con derrames lávicos que cubren a esta secuencia. Se les asigna una edad por fechamiento isotópico de 0.9 Ma (Mooser, 1974) que corresponde al Pleistoceno Temprano.

Formación El Pino (Qpp)

Se le asigna a las rocas máficas que conforman los campos volcánicos de Tezontepec-Otumba y de los cerros de La Estrella, El Pino, Chimalhuacán y

Gordo. Estos se expresan morfológicamente como conos cineríticos, volcanes escudo y coladas de lava en bloques y alcanzan espesores de 750 m que disminuyen hacia las márgenes. Esta unidad cubre en forma discordante a rocas antiguas y su edad se estima de 0.9 y 0.7 Ma (Mosser, 1974).

Formación Tláloc (Qt)

Son las coladas de lava de la Sierra de Río Frio con intercalaciones de tefra y flujos piroclásticos lobulados de composición andesítica, latítica y dacítica, con varias secuencias de pómez, surges, flujos de cenizas cristalinas, vítreas y de pómez con intercalaciones por derrames lávicos. Esta formación cubre discordantemente rocas volcánicas del Mioceno Medio-Tardío y del Plioceno Temprano y a las formaciones El Pino y el Llano Grande. Mosser (1974) propone una edad Pleistoceno entre los 0.6 y 0.7 Ma.

Formación Iztaccihuatl (Qi)

Esta formación es un conjunto de rocas volcánicas del Llano Grande y Nexpayantla (Schlaepfer, 1968) con espesores aproximados de 2500 m. Está constituida principalmente por secuencias de derrames de composición variable de andesita basáltica a dacítica. Esta secuencia descansa en forma discordante encima de las formaciones Llano Grande y Tláloc. Mooser (1974) considera un periodo eruptivo entre 0.6 a 0.08 Ma.

Formación Popocatepetl (Qp)

Carrasco (1985) define cuatro principales secuencias eruptivas: a) surges planares, bloques lávicos con imbricación y con capas laminares, con un espesor de 8 m; b) episodio efusivo de andesitas ricas en olivino, andesitas y dacitas; c) efusiones de andesitas con episodios explosivos ricos en pómez, ceniza y productos piroclásticos y d) etapas efusivas y explosivas que construyen el cono

Modelo geostatístico de hidrofacies y parametrización hidrológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

terminal con contenido de derrames lávicos intercalados. Presenta un espesor máximo de 3500 m y descansa en forma discordante a la Formación Iztaccihuatl. Se interdigita con la Formación Chichinautzin y se le asigna una edad del Pleistoceno Tardío – Holoceno (Mosser, 1974).

Formación Chichinautzin (Qc)

Definida por Fries (1960) como el volcanismo monogenético estramboliano en la región de la Cuenca de México y alrededores. Son lavas de composición andesítica- basáltica y andesítica, vesiculares y masivas. El espesor máximo que se les ha asignado es de 1800 m. Mosser (1974) le asigna una edad de 38590 ± 3210 años y 8440 ± 70 años, del Pleistoceno Tardío y el Holoceno. Descansa discordantemente en las unidades cretácicas y algunas recientes y se interdigita con depósitos lacustres y aluviales.

Depósitos aluviales (Qal)

Estos depósitos alcanzan espesores máximos de 500 m que disminuyen a las márgenes. Es material poco consolidado compuesto de fragmentos de tamaño de grava, arena, limos y arcillas (Fries, 1962) y se muestra gran heterogeneidad de la granulometría de los mismos. Presentan una discordancia con los depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno y se interdigita con las formaciones volcánicas de forma concordante. Debido a esto se les asigna una edad de Pleistoceno Tardío. Estos depósitos fueron registrados en el Roma-1 a profundidades de 74 m a 330 m, de 167 m a 520 m en el Mixhuca-1 y de 300 m a 550 m en el Tulyehualco-1.

Depósitos lacustres (Qla)

Son depósitos clásticos y productos piroclásticos derivados de los volcanes Popocatepetl y de la Sierra de Chichinautzin depositados en un lago. La extensión de este lago va desde Zumpango a Chalco y desde Texcoco a Cerro de

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Chapultepec con una altitud de 2200m promedio. Los espesores reportados son de 30 a 300m en el depocentro del lago y disminuye hacia las orillas de la planicie de la Cuenca de la Ciudad de México. El pozo Mixhuca-1 tiene un espesor de 167 m, el pozo Tuyehualco-1 un espesor de 300 m y Roma-1 un espesor de 74 m. Los depósitos que se encuentran al borde de las Sierras de Chichinautzin y Santa Catarina se interdigitan la Formación Chichinautzin con los depósitos aluviales. El origen de los depósitos lacustres son producto de la actividad de la Sierra de Chichinautzin y convertir a esta cuenca en una cuenca endorreica durante el Pleistoceno Tardío al Holoceno (Vázquez-Palomera, 1989).

Modelo geostatístico de hidrofacies y parametrización hidrológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

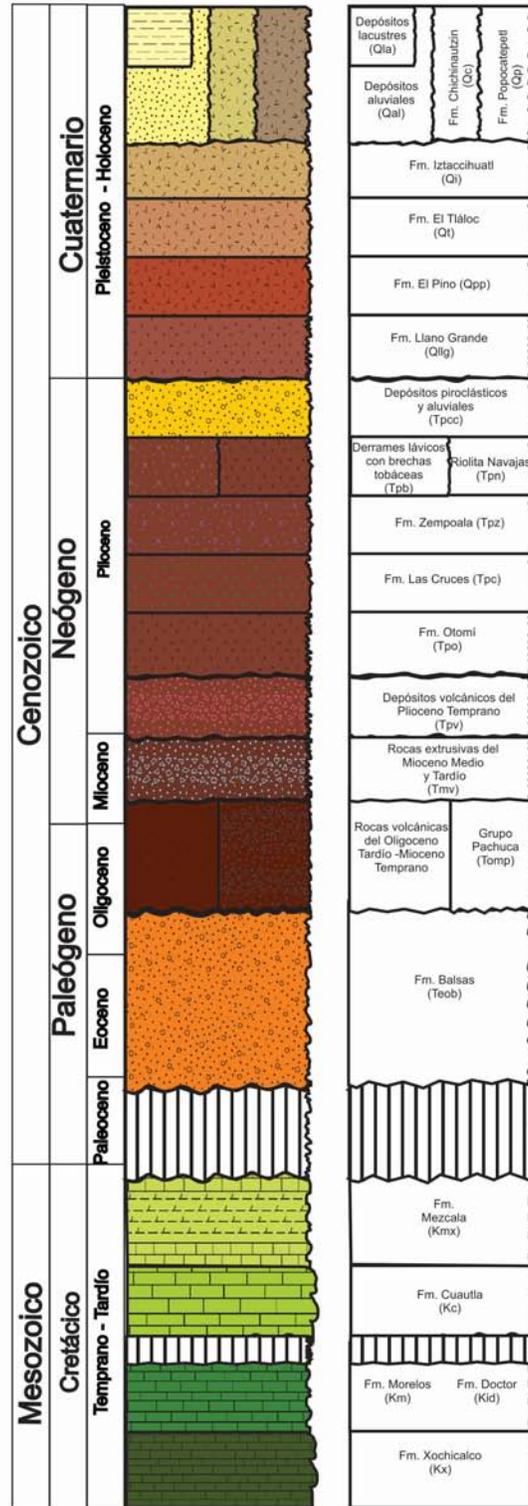


Figura II.1. Columna geológica basada en Vázquez - Sánchez E. y Jaimes-Palomera, 1989.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

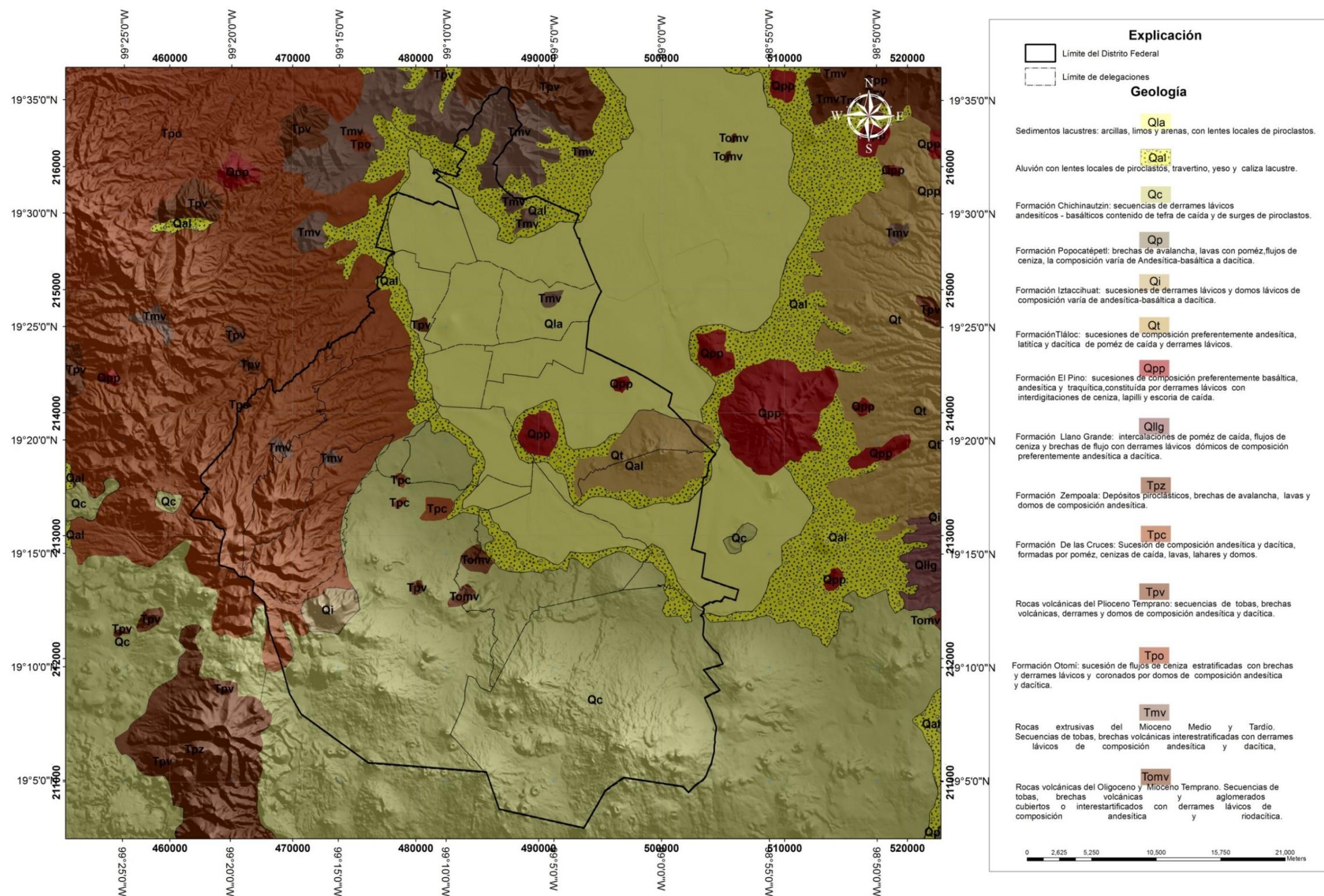


Figura II.2. Mapa geológico de la Cuenca de México y sus alrededores (Modificado de Vázquez - Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989).

2.2.- Estudios Previos

Los estudios que se han realizado en la cuenca de la Ciudad de México son de gran variedad pero principalmente son estudios: geológicos, hidrogeológicos, geofísicos, hidrogeoquímicos y geotécnicos, los siguientes son los más importantes y/o recientes de la zona:

En el año 1969, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México se realizó un estudio de mecánica de suelos denominado **“El subsuelo de la Ciudad de México”** elaborado por Raúl Marsal y Marcos Mazari. Con base en muestras tomadas de varios sondeos en zonas de lago, transición y roca, reportan propiedades mecánicas tales como límites líquido y plástico, consistencia relativa, variación del contenido de agua, relación de vacíos y densidad de sólidos. Adicionalmente identifican cinco formaciones en el subsuelo: a) Manto superficial, compuesto por rellenos heterogéneos de capas de arena, limos arenosos, arcillas limosas, con un grado de saturación menor al 100%, b) Formación Arcillosa Superior, compuesta por depósitos lacustres de ceniza volcánica con un espesor de 10 a 25 m con un grado de saturación de 100%, c) Capa dura, compuesta por arena limosa y arcillas arenosas cementadas y de un espesor de 1 a 10 m, d) Formación Arcillosa Inferior, compuesta por ceniza volcánica depositada en un ambiente lacustre con un espesor de 5 a 15 m y e) los depósitos profundos, que son capas de arena, arenas-gravas, arenas-limosas, limos y arcillas compactas.

En su tesis de maestría, Pérez Cruz (1988) propone un modelo geológico del subsuelo de la ciudad de México con base en la interpretación y análisis de un extenso estudio de sismica de reflexión conducido por PEMEX después del sismo de 1985. La interpretación de la sismica fue apoyada en la litología y los registros geofísicos de los pozos Roma-1, Tulyehualco-1, Copilco-1, Mixhuca-1 y Texcoco-1. El modelo geológico propuesto por Pérez Cruz (1988) consiste de siete horizontes denominados secuencias: (a) la secuencia I está asociada con

conglomerados volcánicos, arenas y arcillas, tobas con intercalaciones de basaltos y/o andesitas; (b) la secuencia II consiste de depósitos de conglomerados, arenas y arcillas con tobas y basaltos de 40 m a 50 m de espesor; (c) la secuencia III son conglomerados tobáceos y tobas con basaltos y brechas; (d) la secuencia IV son cuerpos de arena con 100 m de espesor con intercalaciones de basalto con tobas; (e) la secuencia V son tobas y brechas de un espesor de 200 y 136 m; (f) la secuencia VI son rocas que están presentes en todos los pozos profundos y son capas de basalto del Mioceno-Oligoceno entre 1 a 165 m de espesor; y finalmente (g) la secuencia VII es asociada a las Calizas del cretácico las cuales son el basamento de las rocas volcánicas en los pozos. La secuencia VII fue alcanzada en las profundidades de 1575 m y 2100 m en los pozos Mixhuca -1 y Tulyehualco-1, respectivamente, y es caracterizada como una secuencia de mudstone y wackestone recristalizados del Albiano - Santoniano.

Adicionalmente, Pérez Cruz (1988) identifica tres tipos de fallas en el subsuelo de la Ciudad de México: 1) las fallas que afectan a la parte inferior de la columna, 2) fallas que cortan a la parte superior de la columna y 3) fallas que afectan a toda la columna litológica. Las primeras afectan a los horizontes profundos IV, V, VI y VII y son tres fallas: (a) la Falla Mixhuca afecta el horizonte VII y tiene una dirección de NW-SE y presenta un salto de 1,650 m a 2,050 m, (b) el Graben Copilco afecta al horizonte VI con una orientación N-S y un salto de 130 m y (c) Fallas de corta longitud con un salto de 30 m y que cortan los horizontes IV, V y VI. El segundo tipo de fallas afectan a los horizontes I y II y son producto de los desplazamientos en zonas inestables como son los flancos de algunos altos definidos en el estudio.

En este grupo reporta cuatro fallas: (a) Con un salto de 20 m al oriente y orientación N-S al sur del aeropuerto en la Calzada Ignacio Zaragoza, (b) dos fallas que forman un graben Aeropuerto y afectan al horizonte I, (c) por el Peñón del Márquez con una orientación N-S se localizan dos fallas que forman un graben y solo afectan al horizonte I y horizonte II con un salto de 30 m y (d) El Graben de Tenochtitlán que tienen un salto de 40 m a 90 m.

Finalmente, las fallas que afectan a toda la columna son las que se encuentran alrededor del Cerro de la Estrella y el Peñón de los Baños y tuvieron su origen por desplazamientos verticales y el emplazamiento de material volcánico.

La Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal elaboró un informe técnico **“Hidrología subterránea en el valle de México”** (DGCOH, 1992) en el que dividen el sistema hidrogeológico de la Ciudad de México en tres subsistemas: (a) la zona Metropolitana, (b) el Valle de Chalco y (c) el ex- Lago de Texcoco. En este trabajo reportan valores de pruebas de bombeo que fueron realizadas por DGCOH e interpretadas por métodos de Thies y Jacob y obtienen valores de transmisividad de 0.1 a $460 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Adicionalmente, los coeficientes de almacenamiento obtenidos van de $2 \cdot 10^{-6}$ a $1.7 \cdot 10^{-2}$. Estos resultados evidencian la alta heterogeneidad de los materiales geológicos que componen el sistema acuífero de la Ciudad de México.

En 1994, el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México realizó un estudio para el Departamento del Distrito Federal denominado **“Diagnóstico del estado presente de las aguas subterráneas de la Ciudad de México y determinación de sus condiciones futuras”** (Instituto de Geofísica, 1994). Es un trabajo extenso acerca del comportamiento hidráulico del acuífero y de la calidad del agua del mismo. En este informe reinterpretaron 55 pruebas de bombeo alrededor de la ciudad de México mediante un modelo numérico de flujo radial (Rathod y Rushton, 1991). Los resultados de la interpretación fueron agrupados de acuerdo a criterios geológicos tales como litología y edad (Instituto de Geofísica, 1994) y se resumen en la Tabla 1. Estos resultados una vez más ponen en evidencia la alta heterogeneidad de los materiales del subsuelo. En el Anexo Pruebas de bombeo Instituto de Geofísica se presenta el análisis estadístico que conduce a los resultados de la Tabla II.1.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Tabla II.1. Parámetros hidráulicos reportados por el Instituto de Geofísica, 1994.

Unidad geológica	Conductividad hidráulica	Ss Sy	Número de pruebas	Media	Varianza
Arcillas lacustres del cuaternario	$k_v : 1.5e^{-9} - 5.0e^{-9}$ m/s	$S_s : 0.01 - 0.06$ m ⁻¹	13	$K_v(m/s):1.23E-8$	$K_v: 6.942E-16$
Depósitos aluviales del cuaternario	$kh : 4.1e^{-6} - 3.5e^{-4}$ m/s	$S_s : 4.6e^{-6} - 3.5e^{-5}$ m ⁻¹ $S_y: 0.12 - 0.2$	29	$Kh(m/s):2.25E-4$ $K_v(m/s):2.25E-5$ $S:2.90E-3$ $S_y:1.72E-1$ $S_s(1/m):3.5E-5$	$Kh:4.30E-7$ $K_v:4.3E-8$ $S:3.532E-6$ $S_y:9.95E-4$ $S_s:4.679E-9$
Rocas basálticas del cuaternario	$kh : 1.7e^{-5} - 2.9e^{-2}$ m/s	$S_y: 0.07 - 0.1$ $S_s : 1.1e^{-5} - 4.1e^{-5}$ m ⁻¹	8	$Kh(m/s):4.50E-3$ $K_v(m/s):8.32E-4$ $S:4.14E-3$ $S_y:1E-1$ $S_s(1/m):3.90E-5$	$Kh:9.84E-5$ $K_v:1.24E-6$ $S:1.44E-6$ $S_y:7.6E-4$ $S_s:1.005E-11$
Formación Tarango	$kh : 4.0e^{-6} - 9.3e^{-5}$ m/s	$S_y: 0.04 - 0.1$ $S_s : 6.3e^{-6} - 1.4e^{-5}$ m ⁻¹	16	$Kh(m/s):2.88E-5$ $K_v(m/s):2.10e-6$ $S:2.5E-3$ $S_y:7E-2$ $S_s(1/m):3.31E-5$	$Kh:8.57E-10$ $K_v:6.4087E-12$ $S:3.66E-6$ $S_y:3.05E-4$ $S_s:2.001E-9$
Rocas volcánicas basálticas y andesíticas del Plioceno superior	$kh : 1.3e^{-5} - 6.9e^{-3}$ m/s	$S_s: 4.1e^{-6}$ $S_y: 0.08 - 0.2$	7	$Kh(m/s):1.72E-3$ $K_v(m/s):1.72E-4$ $S:8E-4$ $S_y:1.23E-1$ $S_s(1/m):4.12E-6$	$Kh:6.83E-6$ $K_v:6.83E-8$ $S:**$ $S_y:0.0037$ $S_s:**$
Rocas volcánicas del andesíticas del Plioceno inferior	$kh : 2.7e^{-6} - 8.1e^{-5}$ m/s	$S_s: 2.3e^{-6} - 2.9e^{-5}$ $S_y: 0.05$	4	$Kh(m/s):2.3E-5$ $K_v(m/s):2.30E-6$ $S:6.67E-4$ $S_y:5.E-2$ $S_s(1/m):1.72E-5$	$Kh:1.49E-9$ $K_v:1.49E-11$ $S:1.23E-7$ $S_y:**$ $S_s:1.89E-10$

En el 2000 la compañía Lesser y Asociados S.A. de C.V., elaboró el informe técnico “**Estudio de mediciones en la red de pozos piloto para la parte sur de la cuenca del Valle de México y actualización de balance hidrogeológico, año 2000 SINOPSIS DE LA PIEZOMETRÍA DEL VALLE DE MÉXICO AÑO 2000**”. Para el Gobierno de la ciudad de México (Lesser, 2000). Reportan una evaluación de algunos parámetros hidráulicos asociados a las litologías presentes en el acuífero de la Ciudad de México (Tabla II.2).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Tabla II.2. Parámetros hidráulicos reportados por Lesser y Asociados (2000)

Unidades litoestratigráficas	Unidades hidrogeológicas	Conductividad hidráulica	Ss Sy
Arcillas lacustres del cuaternario	Acuitardo Superior	kv : 10^{-9} - 10^{-7} m/s	Ss : 5×10^{-2} m ⁻¹
Depósitos aluviales del cuaternario	Acuífero principal	kh : 5.86×10^{-9} - 5.2×10^{-3} m/s	Ss : 3.1×10^{-7} - 9.4×10^{-5} m ⁻¹ Sy: 0.01 – 0.18
Rocas volcánicas basálticas del cuaternario	Acuífero principal	kh : 1.7×10^{-5} - 2.3×10^{-2} m/s	Sy: 0.1 – 0.27
Formación Tarango	Acuífero principal	kh : 2×10^{-6} - 1×10^{-4} m/s	Sy: 0.014 – 0.11
Rocas volcánicas basálticas y andesíticas	Acuífero principal	kh : 1.4×10^{-5} - 5.8×10^{-3} m/s	Sy: 0.03 – 0.12
Secuencia estratificada del Plioceno inferior	Acuífero Inferior	kh : 1.2×10^{-6} - 3.6×10^{-4} m/s	Ss: 1.2×10^{-7} – 1.7×10^{-4} m ⁻¹
Rocas volcánicas del Plioceno inferior	Acuífero Inferior	kh : 4.4×10^{-6} - 1.0×10^{-4} m/s	Ss: 4.4×10^{-6} – 1.4×10^{-4} m ⁻¹ Sy: 0.03

Juárez-Camarena (2001) aplicó geoestadística para describir el contenido de agua, la resistencia al corte, el espesor y la profundidad de la que denominan Formación Arcillosa Superior (sedimentos lacustres) en varios sondeos localizados en la Ciudad de México. El contenido de agua y la resistencia al corte fueron analizados en cuatro sondeos ubicados en las esquinas Bolívar y Tacuba, Corregidora y Pino Suárez, Centro urbano P. Juárez y Velódromo Olímpico. La Formación Arcillosa Superior tiene una profundidad mínima de 5 m y una profundidad máxima de 40 m en los sondeos. Reportan parámetros estadísticos del contenido de agua y de la resistencia al corte de los sondeos, graficas de variabilidad espacial vertical de los mismos parámetros para cada sondeo y realizan un krigeado para estos sondeos. Posteriormente, con trece sondeos adicionales se aplicó geoestadística a la profundidad de la capa dura y el espesor de la formación arcillosa superior en la zona centro de la Ciudad de México que van de la calle de Pino Suárez hasta Balderas y de República de El Salvador hasta avenida Hidalgo. Analizan la tendencia, estiman el coeficiente de autocorrelación, distancia de influencias, análisis de anisotropía y una estimación puntual, y concluyen que el krigeado da como resultado el valor medio esperado

en cada punto y por ello esta técnica suaviza la estimación. Las conclusiones que llegan son las siguientes: Las distancias de correlación horizontal son del orden de cientos de metros y en la vertical es del orden de un metro para los diferentes parámetros analizados. La calidad del estudio depende de la cantidad y representatividad de los datos y estos estudios permiten definir las bases de estudios de análisis de confiabilidad y riesgo en Geotecnia.

Ángeles Serrano (2001) analizó la expresión de sistemas de flujo de agua subterránea en Iztapalapa. En su análisis incluye la interpretación de 8 pruebas de bombeo y la recolección de datos físico-químicos. Las conductividades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas calculadas por el método de Rushton son de 5.49×10^{-10} a 5.39×10^{-3} m/s, un rango de 7 órdenes de magnitud.

Valencia-Guzmán (2002) elaboró siete secciones geológicas basándose en 23 cortes litológicos obtenidos de la DGCOH del gobierno del Distrito Federal. Con las secciones se hizo una interpretación litoestratigráfica de las zonas: Agrícola Oriental, Peñón de los baños, Santa María Aztahuacán-Santa Cruz Meyehualco, Santa Catarina, Cerro de la Estrella, La Viga-Taxqueña y Col. Educación – Universidad. De los análisis desarrollados concluyó que hay cinco ambientes sedimentarios presentes en la zona: fluvial, lacustre, abanico aluvial, pie de monte y vulcanoclástico. Los materiales analizados son una mezcla de arena, grava y rocas ígneas (andesitas, basaltos) con profundidades de 50 a 300 m.

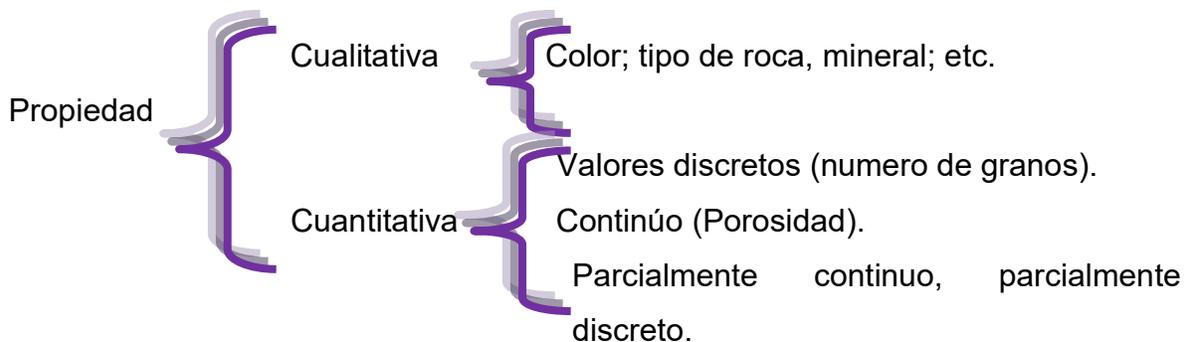
CAPITULO 3.-Marco Teórico: Conceptos básicos de Estadística, Geoestadística y estimación de parámetros

En este trabajo se utilizan técnicas geoestadísticas indicador para describir la correlación espacial de variables categóricas (hidrofacies), validación cruzada para la parametrización del variograma, técnicas de simulación indicador para obtener una estimación 3D de las hidrofacies, y se estiman parámetros hidrogeológicos para las hidrofacies a partir de la inversión de pruebas de bombeo. Los fundamentos básicos de las técnicas utilizadas se describen en este capítulo.

3.1 Conceptos básicos de estadística

A la estadística le concierne principalmente la descripción y análisis de la variabilidad de datos reunidos de una gran colección llamado universo o población (Marsal, 1987).

La distribución se refiere a un universo como un todo o una muestra. Se clasifica de acuerdo a una propiedad, ya sea cuantitativa o cualitativa.



Los datos son separados en clases distintas y el número de elementos en una clase dada es la **frecuencia absoluta** y esta dividida por el número total de elementos es la **frecuencia relativa**. Al conjunto de todas las frecuencias con sus

correspondientes clases denomina la **distribución de frecuencias absoluta o relativa**.

Medidas de tendencia central

Media: Una de las características de la variabilidad de los datos es la media y se pueden obtener diferentes dependiendo del objetivo del trabajo.

Media geométrica:

$$X_G = n\sqrt{x_1 * x_2 * x_3 \dots \dots x_n}$$

Media armónica

$$X_A = \frac{n}{\sum_{i=1}^n x_i} = \frac{n}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots \frac{1}{x_n}}$$

Media aritmética

$$\hat{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_n = \frac{x_1 * x_2 * x_3 \dots \dots x_n}{n}$$

Mediana. Es el valor medio de un conjunto de datos que son ordenados de menor a mayor.

Moda. Es el valor más típico del conjunto de datos.

Medidas de dispersión

Estas medidas nos describen dispersión a partir de las siguientes medidas: rango, rango intercuartil, desviación estándar y la varianza.

Rango. Es la variabilidad que indicada por la diferencia entre el valor más pequeño y el valor más grande.

$$L = X_{Max} - X_{Min}$$

Cuartiles: Son los valores que divide a la curva de distribución en cuatro partes $Q_1=25\%$ $Q_2=50\%$ $Q_3=75\%$.

Rango intercuartil. El rango intercuartil es la diferencia del Q_1 y el Q_3

$$IQR = Q_3 - Q_1$$

Varianza. La varianza es el segundo momento alrededor de la media y nos indica la desviación media cuadrática de todas las observaciones a partir de la media muestral (Webster, 2000).

$$S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \hat{X})^2$$

Desviación estándar. Esta nos indica que tan estrechamente agrupados se encuentran nuestros datos alrededor de la media (Davis, 1986).

$$S = \sqrt{S^2}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \hat{X})^2}$$

Coefficiente de variación. Es una medida en la cual se puede observar con claridad que tan disperso son los datos; dado que este se calcula a partir de la desviación estándar y la media muestral.

$$CV = 100\% \left(\frac{S}{\hat{X}} \right)$$

Coefficiente de simetría

Este mide la asimetría de las observaciones y es el tercer momento alrededor de la media (Webster, 2000).

$$m_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \hat{X})^3$$

El coeficiente de asimetría es entonces

$$g_1 = \frac{m_3}{m_2\sqrt{m_2}} = \frac{m_3}{S^3}$$

Donde m_2 es la varianza. Las distribuciones simétricas tienen $g_1=0$. El coeficiente de simetría describe comúnmente la desviación de la normalidad en medidas ambientales.

Curtosis

La curtosis expresa el achatamiento de la distribución y es obtenida del cuarto momento alrededor de la media

$$m_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \hat{X})^4$$

El coeficiente de curtosis es definido por

$$g_2 = \frac{m_4}{m_2^2} - 3 = \frac{m_4}{(S^2)^2} - 3$$

El significado se relaciona principalmente con la distribución normal, para que $g_2 = 0$. Las distribuciones que se achatan más de lo normal tienen $g_2 > 0$; los aplanadas tienen $g_2 < 0$.

3.2 Geoestadística

La geoestadística la define Matheron en 1962 como "la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos

naturales”. Con el objetivo de hacer una estimación y/o predicción con un mínimo error y sin sesgo con ayuda de datos a partir de la correlación espacial (Webster, 2000). La revisión de conceptos en este capítulo se basa en su mayor parte en el libro de Samper y Carrera (1990).

Funciones aleatorias espacialmente correlacionadas

Una función aleatoria $Z(x)$ es una función que depende de la ubicación del punto x , pero que su “valor” no es un número sino una variable aleatoria (Samper y Carrera, 1990). Esto se ilustra en la figura III.1. Consideremos el caso en que el logaritmo natural de la conductividad hidráulica K ($\ln K$) es una función aleatoria espacialmente correlacionada. Como ilustra la figura III.1, en cada ubicación en el espacio existirá un rango de valores posibles definido por una distribución de densidad de probabilidad (*fdp*).

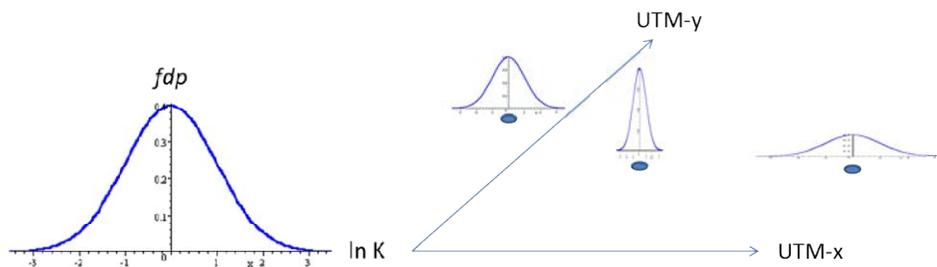


Figura III.1. $\ln K$ como función aleatoria (izquierda) y como función aleatoria espacialmente correlacionada (derecha); en cada punto del plano existirá una infinidad posible de valores de $\ln K$ donde la probabilidad de cada uno estará definida por la función de densidad de probabilidad.

Una función aleatoria espacialmente correlacionada puede ser definida mediante su distribución de probabilidad o mediante todos sus momentos estadísticos. El momento de primer orden es la esperanza matemática definida como

$$E[Z(x)] = m(x)$$

Los tres momentos de segundo orden son:

- i. La varianza o momento de segundo orden de $Z(x)$ respecto a $m(x)$

$$\sigma^2 = \text{Var}[Z(x)] = E\{[Z(x) - m(x)]^2\}$$

- ii. La covarianza de dos variables aleatorias $Z(x_i)$ y $Z(x_j)$, $C(x_i, x_j)$, es definida

$$C(x_i, x_j) = E\{[Z(x_i) - m(x_i)][Z(x_j) - m(x_j)]\}$$

- iii. El semivariograma $\gamma(x_i, x_j)$ que se define como

$$\gamma(x_i, x_j) = \frac{1}{2} E\{[Z(x_i) - Z(x_j)]^2\}$$

Funciones aleatorias estacionarias

Se dice que una función aleatoria es estrictamente estacionaria, si su función de distribución es invariante respecto a cualquier traslación de vector \mathbf{h} . La distribución de vector aleatorio $[Z(\mathbf{x}_1), Z(\mathbf{x}_2), \dots, Z(\mathbf{x}_k)]$ es idéntica a la del vector $[Z(\mathbf{x}_{1+h}), Z(\mathbf{x}_{2+h}), \dots, Z(\mathbf{x}_{k+h})]$. Estacionariedad estricta implica que todos los momentos de la variable aleatoria son invariantes respecto a una traslación. Una hipótesis menos estricta requiere de estacionariedad en los primeros dos momentos de la función aleatoria $Z(\mathbf{x})$.

- I. $E[Z(\mathbf{x})]$ existe y no depende de \mathbf{x}

$$E[Z(x)] = m \quad \text{para todo } x$$

- II. Para todo par de variables aleatorias $\{Z(\mathbf{x}+\mathbf{h}), Z(\mathbf{x})\}$ su covarianza existe y solo depende del vector de separación \mathbf{h}

$$C(x + \mathbf{h}, x) = E[Z(x_{i+h})Z(x)] - m^2 = C(\mathbf{h})$$

Con la hipótesis de estacionariedad el semivariograma resulta ser igual a la varianza menos la covarianza, por lo que la equivalencia es total.

$$\gamma(\mathbf{h}) = \text{Var}(Z) - C(\mathbf{h})$$

Funciones aleatorias intrínsecas

Son aquellas cuyos incrementos $\{Z(\mathbf{x}+\mathbf{h}) - Z(\mathbf{x})\}$ tienen una esperanza matemática y varianzas definidas e independientes de \mathbf{x} para todo vector \mathbf{h} es decir:

$$E[Z(x + \mathbf{h}) - Z(x)] = m(\mathbf{h})$$

$$\text{Var}[Z(x + h) - Z(x)] = g(h)$$

La función $\mathbf{m}(\mathbf{h})$ es la función de la deriva que es necesariamente lineal en \mathbf{h} .

Funciones aleatorias no intrínsecas

Las funciones aleatorias no intrínsecas son aquellas que presentan una deriva, cuando su esperanza matemática no es constante y además sus incrementos $\{Z(\mathbf{x}+\mathbf{h}) - Z(\mathbf{x})\}$ tampoco son estacionarios.

Concepto de ergodicidad

El concepto de ergodicidad es una hipótesis que postuló Papoulis (1965), en la que menciona que un proceso es ergódico si se pueden determinar todos sus estadísticos a partir de una sola de sus realizaciones.

Variograma

El variograma es una medida de variabilidad espacial y mide el promedio del grado de disimilitud entre dos puntos. (Deutsh y Journal, 1998).

El variograma se define como:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2} E[\{Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})\}^2]$$

En la práctica, la expresión anterior es aproximada mediante el variograma experimental, el cual se estima con base a datos medidos y a la estructura del fenómeno. El variograma experimental se calcula de la siguiente manera (Samper-Carrera, 1990):

$$\check{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x) - z(x+h)]^2$$

Donde:

$\check{\gamma}(h)$: Variograma experimental

$z(x)$ y $z(x+h)$: son los valores de Z separados por h .

h : separación entre los valores.

$N(h)$: Numero de pares que se encuentran a esa separación (h).

Para cada conjunto de datos $z(x_i)$, $i=1,2,3$,

Semivariogramas teóricos

Los semivariogramas teóricos son funciones con una expresión sencilla que ayudan a representar los semivariogramas reales. Existen condiciones que los modelos de semivariogramas teóricos deben cumplir (Samper-Carrera, 1990):

- a) De la definición del semivariograma que $\gamma(h)$ ha de ser idénticamente nulo en el origen.
- b) $\gamma(h)$ es una función “condicionalmente negativa definida” o $-\gamma(h)$ es “condicionalmente positiva definida”.
- c) El semivariograma debe tener un ritmo de crecimiento inferior h^2 .

A continuación se describen los modelos teóricos del semivariograma que se usan comúnmente.

Efecto pepita puro (nugget)

El modelo indicativo de un fenómeno sin ninguna correlación espacial y considerados en parte a un error de medición (Samper-Carrera, 1990). Su expresión analítica es la siguiente (figura III.2):

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ S & h > 0 \end{cases}$$

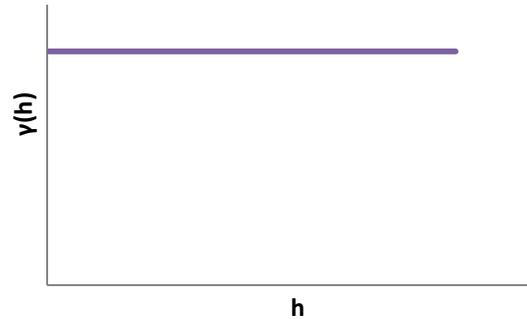


Figura III.2. Modelo de semivariograma teórico de efecto de pepita puro.

Modelo esférico

Este modelo representa fenómenos continuos pero no diferenciables y tiene un comportamiento lineal al origen (Samper-Carrera, 1990), su expresión analítica es la siguiente:

$$\gamma(h) = \begin{cases} \frac{S}{2} \left[3 \left(\frac{h}{a} \right) - \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & h \leq a \\ S & h > a \end{cases}$$

Donde:

a = alcance

S = meseta

La pendiente al origen es a 1.5 S y la distancia integral λ está dada por:

$$\lambda = \frac{1}{S} \int_0^a S \left[1 - \frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] dh = \frac{5}{12} a$$

Presenta la meseta a un distancia finita $h=a$, fenómenos continuos o numerables discontinuidades (figura III.3).

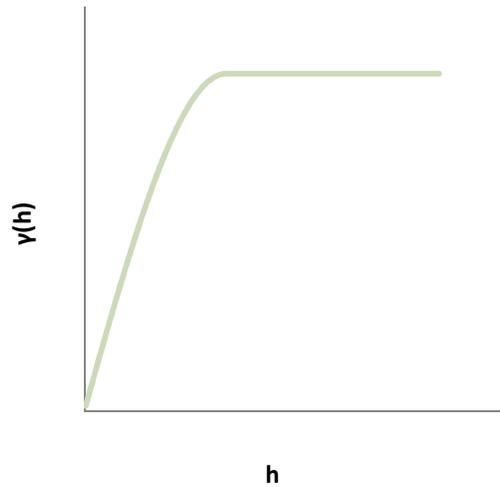


Figura III.3. Modelo de semivariograma teórico esférico.

Modelo exponencial

Este modelo tiene un comportamiento lineal en el origen y representa fenómenos continuos pero no diferenciables (Samper-Carrera, 1990), su expresión analítica es la siguiente:

$$\gamma(h) = S \left(1 - e^{-\frac{h}{a}} \right)$$

Donde

a' = alcance efectivo la distancia a la cual $\gamma(h) = 0.95 S$, que es igual a

$$a' = 3a$$

Y su meseta asintóticamente

$$\text{Meseta} = \lim_{h \rightarrow \infty} S \left(1 - e^{-\frac{h}{a}} \right) = S$$

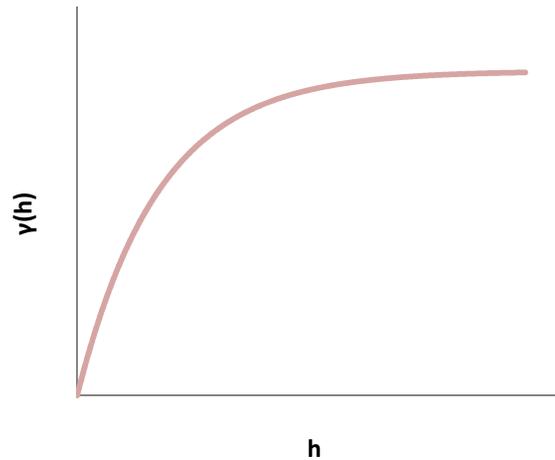


Figura III.4. Modelo de semivariograma teórico exponencial.

Modelo potencial

Estos modelos teóricos tienen un comportamiento determinado por el valor al factor de escala α que no $0 \leq \alpha < 2$ y representa a fenómenos no estacionarios (Samper-Carrera, 1990), su expresión analítica es la siguiente:

$$\gamma(h) = h^\alpha$$

$$0 < \alpha < 2$$

Donde:

α : factor de escala

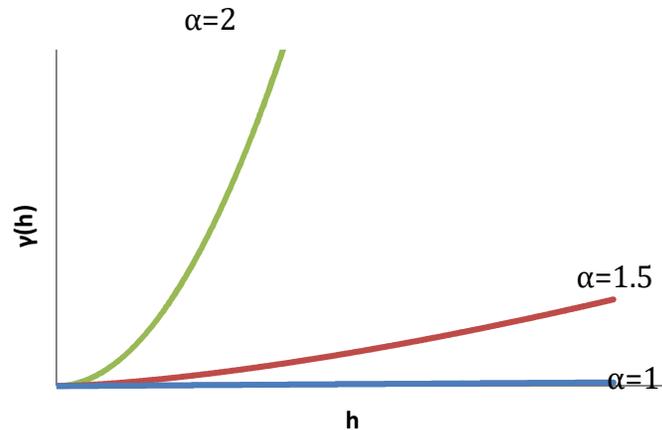


Figura III.5. Modelos de semivariogramas teóricos con un $\alpha=1, 1.5$ y 2 .

Modelo Gaussiano

Este modelo teórico representa fenómenos continuos infinitamente diferenciables, su comportamiento al origen es de tipo parabólico con pendiente nula que es de gran regularidad (Samper-Carrera, 1990), su expresión analítica es la siguiente:

$$\gamma(h) = S \left(1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right)$$

Y su meseta asintóticamente

$$\text{Meseta} = \lim_{h \rightarrow \infty} \gamma(h) = S$$

a' = alcance efectivo la distancia a la cual $\gamma(h) = 0.95 S$, que es igual a

$$a' = \sqrt{3}a$$

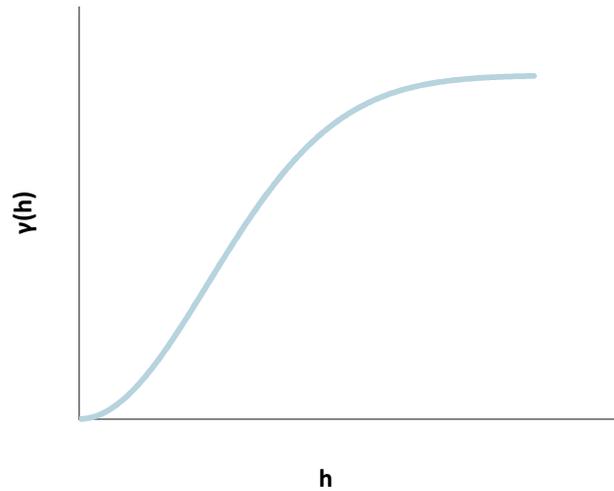


Figura III.6. Modelo de semivariograma teórico Gaussiano.

Modelo Logarítmico

Este modelo se utiliza cuando el semivariograma experimental se comporta linealmente si se usa una escala logarítmica para las distancias (Samper-Carrera, 1990), su expresión analítica es la siguiente:

$$\gamma(h) = C_1 \log(h)$$

Donde

C_1 es una constante

Y su meseta no está definida por

$$\text{Meseta} = \lim_{h \rightarrow \infty} \gamma(h) = \infty$$

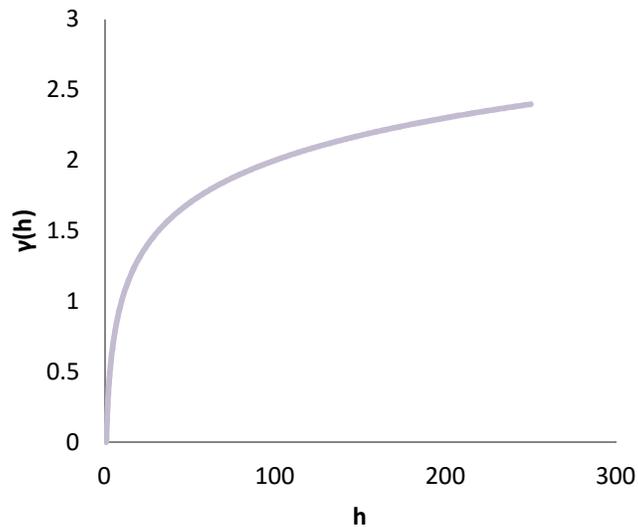


Figura III.7. Modelo de semivariograma teórico logarítmico.

Existe otro modelo teórico **el de efecto agujero**, el cual es indicativo de fenómenos con componentes periódicos o cuasi periódicos; sin embargo, si no se tienen datos suficientes de la existencia de esta periodicidad, las ondulaciones del semivariograma experimental pueden ser debidas a una variedad de muchas causas.

Anisotropía

Es una propiedad que se puede evaluar si nuestro semivariograma es isotrópico a partir de los semivariogramas direccionales, y sí son marcadamente distintos hay presencia de anisotropía (Samper y Carrera, 1990).

Las variables geológicas generalmente presentar anisotropía como las fracturas, litología, permeabilidad, nivel piezométrico, etc.

Anisotropía geométrica

Corresponde a un fenómeno con diferentes rangos de correlación en distintas direcciones (Gringarten y Deutsch, 2001). Esta se puede tratar una transformación lineal de coordenadas que se presenta a continuación (Samper y Carrera, 1990):

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

Anisotropía zonal

Se caracteriza en los semivariogramas direccionales con diferentes mesetas (Gringarten y Deutsch, 2001).

3.3 Estimación del variograma mediante validación cruzada (minimización de los errores de estimación)

El método de validación cruzada es utilizado para evaluar el grado de bondad de un modelo de semivariograma (Delhomme, 1978; Candy y Mao, 1981 y Baafi et al., 1982).

Sea $Z(x)$ una función aleatoria estacionaria de segundo orden con semivariograma $\gamma(h)$ y función de covarianza $C(h)$. Sean $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, \dots, Z_n$ los valores de medida en n puntos. La validación cruzada consiste en suprimir el i -ésimo valor medido Z_i y estimarlo a partir del resto de los datos. El valor estimado Z_i^* se calcula por krigado ordinario mediante la expresión

$$Z_i^* = \sum_{m \in N_i} \lambda_{im} Z_m$$

Donde N_i es el conjunto de puntos utilizados para estimar Z_i (Los coeficientes de krigado λ_{im} representan el peso que se da al dato Z_m en la estimación de Z_i . Las ecuaciones del krigado establecen que

$$\sum_{m \in N_i} \lambda_{im} C_{mn} - u_i = C_{in} \quad \forall n \in N_i$$

$$\sum_{m \in N_i} \lambda_{im} = 1$$

Donde C_{mn} es la covarianza entre los puntos x_m y x_n y u_i es el multiplicador de Lagrange correspondiente al punto i . La varianza V_{ij} entre dos errores $e_i = (Z_i^* - Z_i)$ y $e_j = (Z_j^* - Z_j)$ viene dada por Neuman (1984)

$$V_{ij} = C_{ij} + \sum_{m \in N_i} \sum_{n \in N_j} \lambda_{im} \lambda_{jn} C_{mn} - \sum_{m \in N_i} \lambda_{im} C_{mj} - \sum_{n \in N_j} \lambda_{jn} C_{ni}$$

La varianza del i -ésimo error, σ_i^2 , se obtiene haciendo $i=j$

$$\sigma_i^2 = \sigma^2 - \sum_{m \in N_i} \lambda_{im} C_{mi} + u_i$$

Repitiendo este proceso de estimación en M puntos, se obtienen los M errores de validación

$$e_i = Z_i^* - Z_i \quad i=1,2,3,4,\dots,M$$

Los N datos disponibles se seleccionan M ($M \leq N$) en los que se lleva a cabo la validación cruzada. En la validación cruzada de prueba y error se van probando diferentes valores de los parámetros del semivariograma hasta los errores de validación y sus varianzas cumplan los siguientes criterios estadísticos:

- La media de los errores sea próxima a cero.
- Mínimo error cuadrático medio.
- Error cuadrático medio adimensional (ECMA) próximo a uno:

$$ECMA = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left[\frac{e_i}{\sigma_i} \right]^2} \approx 1$$

Donde M es el número de puntos en los que se realiza la validación. La σ_i^2 es la varianza de e_i , el valor esperado de $ECMA^2$ es igual a uno.

- d) Mínimo valor medio de las varianzas de krigeado (σ_i^2)
- e) Valor medio de las varianzas de krigeado igual a la varianza muestral de los errores de validación.
- f) Ausencia de correlación entre los errores y los valores $(Z_i^* - \underline{Z}_i)$, donde \underline{Z}_i es el valor medio de $Z(x)$ en el entorno del punto i .
- g) Coeficiente de correlación entre los valores krigeados y los medidos próximo a uno. El valor de este coeficiente de correlación depende del número y de la calidad de los datos disponibles.
- h) Los errores normalizados e_i/σ_i deben situarse lo largo de una recta de probabilidad normal. La distribución deben seguir una distribución Gauss con media nula y varianza unidad.

Una alternativa que evita los inconvenientes de la validación por prueba y error es el método de máxima verosimilitud desarrollado por Bastin y Gever (1985) y Samper (1986) y consiste en estimar los parámetros de semivariograma de forma que se maximice la verosimilitud de los errores de la validación.

3.4 Función indicador y krigeado indicador

El formalismo de funciones indicador y krigeado indicador ha sido utilizada ampliamente en la reconstrucción geoestadística de ambientes geológicos aluviales (Johnson y Shirley, 1989; Johnson, 1995; Ritzi, 2000; Favilene, Cabrera y Sáez, 2007; Favilene *et al*, 2007; Donoso, 2010; Dell'Arciprete *et al*, 2012), sedimentos glacio-fluviales (Marsily *et al*, 1998) y sedimentos turbidíticos (Favilene *et al* 2006) que muestran una gran complejidad y heterogeneidad en su distribución espacial de los sedimentos. Esta técnica ayuda a la reconstrucción de cuerpos sedimentarios asignando una función indicador a cada una de las facies identificadas. A continuación se revisan los fundamentos básicos de esta técnica.

Sea $I(\mathbf{x}, z_l)$ una función indicadora asociada con el valor de Z en un punto \mathbf{x} y con el valor umbral z_l y definida por:

$$I(\mathbf{x}, z_l) = \begin{cases} 1, & \text{si } Z(\mathbf{x}) \leq z_l \\ 0, & \text{si } Z(\mathbf{x}) > z_l \end{cases}$$

La distribución espacial de los valores $Z(\mathbf{x})$ dentro del dominio D se representa así:

$$\psi(D, Z_l) = \frac{1}{\{D\}} \int_{\mathbf{x} \in D} I(\mathbf{x}, z_l) d\mathbf{x}$$

Donde $\{D\}$ es la medida del dominio D y es la proporción de valores de $Z(\mathbf{x})$ que no superan el umbral z_l . El valor esperado puede calcularse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} E[\psi(D, Z_l)] &= \frac{1}{\{D\}} \int_{\mathbf{x} \in D} E[I(\mathbf{x}, z_l)] d\mathbf{x} = \\ &= \frac{1}{\{D\}} \int Pr[Z(\mathbf{x}) \leq z_l] d\mathbf{x} = Pr[Z(\mathbf{x}) \leq z_l] = F(z_l) \end{aligned}$$

$\psi(D, Z_l)$ es una función aleatoria cuyo valor esperado coincide con la función de distribución acumulada univariable $F(z_l)$.

Algunas propiedades de la función indicador son:

- a) Si $Z(\mathbf{x})$ es estacionaria se cumple con

$$Pr [I(\mathbf{x}, z_l) = 1] = Pr[Z(\mathbf{x}) \leq z_l] = F(z_l)$$

$$Pr [I(\mathbf{x}, z_l) = 0] = Pr[Z(\mathbf{x}) \geq z_l] = 1 - F(z_l)$$

- b) El valor esperado de $I(\mathbf{x}, z_l)$ es

$$E[I(\mathbf{x}, z_l)] = F(z_l)$$

- c) La varianza de $C_I(\mathbf{0}, z_l)$ tiene la siguiente expresión

$$C_I(\mathbf{0}, z_l) = F(z_l) - [F(z_l)]^2 = F(z_l)[1 - F(z_l)]$$

- d) El semivariograma $\gamma_I(\mathbf{h}, z_l)$ se obtiene a partir de

$$\gamma_I(\mathbf{h}, z_l) = C_I(\mathbf{0}, z_l) - C_I(\mathbf{h}, z_l) = F(z_l) - K_I(\mathbf{h}, z_l)$$

- e) El indicador tiene siempre varianza finita
- f) Los semivariogramas de los indicadores son totalmente insensibles respecto a los valores extremos.

Ecuaciones del krigado Indicador

El krigado indicador es la estimación de la función de distribución espacial $\psi(D, Z_l)$ utilizando para ello los valores del indicador en los puntos de medida $I(x_i, z_l)$. El estimador $\psi^*(D, Z_l)$ se define

$$\psi^*(D, Z_l) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(z_l) I(x_i, z_l)$$

Donde los coeficientes λ_i son funciones del valor límite z_l y se calculan para cada z_l y el estimador debe tener y satisfacer las siguientes propiedades

$$0 \leq \psi^*(D, Z_l) \leq 1$$

$$\psi^*(D, Z_l) \leq \psi^*(D, z'_l) \text{ si } z_l \leq z'_l$$

Una condición suficiente para que se verifiquen estas propiedades es

$$\lambda_i(z_l) = \lambda_i \text{ con } 0 \leq \lambda_i \leq 1, \forall i, \forall z_l$$

La primera condición se satisface cuando se cumple que

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i(z_l) = 1$$

La varianza de estimación alcanza el mínimo cuando se verifican las siguientes ecuaciones

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i(z_l) \gamma_I(x_i - x_j, z_l) + \mu(z_l) = \gamma_I(x_j, D, z_l) \quad j = 1, 2, \dots, N$$

Donde $\gamma_I(x_j, D, z_l)$ es el valor medio de $\gamma_I(x_i - u, z_l)$ cuando u recorre todo el dominio D ,

$$\gamma_I(x_i - x_j, z_l) = \frac{1}{\{D\}} \int_D \gamma_I(x_j - u, z_l) du$$

La varianza de estimación $\sigma_{KI}^2(\mathbf{D}, \mathbf{z}_l)$ viene dada por:

$$\sigma_{KI}^2(\mathbf{D}, \mathbf{z}_l) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(\mathbf{z}_l) \gamma_I(x_i, \mathbf{D}, \mathbf{z}_l) - \gamma_I(\mathbf{D}, \mathbf{D}, \mathbf{z}_l)$$

Donde

$$\gamma_I(\mathbf{D}, \mathbf{D}, \mathbf{z}_l) = \frac{1}{\{\mathbf{D}\}^2} \int_{\mathbf{D}} \int_{\mathbf{D}} \gamma_I(\mathbf{u} - \mathbf{v}, \mathbf{z}_l) d\mathbf{u} d\mathbf{v}$$

Las ecuaciones del krigado se deben resolver para cada valor \mathbf{z}_l y se considera un número finito de valores $\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_n$ para los cuales se desea estimar $\psi(\mathbf{D}, \mathbf{Z}_l)$.

3.5 Simulación de variables categóricas

La siguiente revisión se basa en Deutsch y Journel (1998). Se considera la distribución espacial de K de categorías mutuamente exclusivas S_k , $k=1, \dots, K$. La función indicador $\mathbf{i}(\mathbf{u}, S_k)$ de la clase S_k , ajustado a 1 si $\mathbf{u} \in S_k$ y 0 en caso contrario. La exclusión mutua y exhaustiva implica las siguientes relaciones:

$$\mathbf{i}(\mathbf{u}; s_k) * \mathbf{i}(\mathbf{u}; s_{k'}) = \mathbf{0}, \quad \forall k \neq k'$$

$$\sum_{k=1}^K \mathbf{i}(\mathbf{u}; s_k) = \mathbf{1}$$

El krigado directo de una variable indicador $\mathbf{i}(\mathbf{u}; s_k)$ proporciona un estimado para la probabilidad de S_k que prevalece en la ubicación \mathbf{u} . Al usar krigado indicador simple se tiene

$$\mathbf{Prob}^*\{I(\mathbf{u}; s_k) = \mathbf{1} | (n)\} = \mathbf{p}_k + \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} [I(\mathbf{u}_{\alpha}; s_k) - \mathbf{p}_k]$$

Donde $\mathbf{p}_k = \mathbf{E}\{\mathbf{i}(\mathbf{u}; s_k)\} \in [0, 1]$ la frecuencia marginal de la categoría S_k inferida, de la proporción desagrupada de los datos de tipo S_k . Los pesos λ_{α} son dados por un sistema de krigado simple usando la covarianza indicador de la categoría

S_k . Si una categoría S_{k_0} es predominante, su probabilidad de ocurrencia puede deducirse como el complemento a 1 de los $(K-1)$ de las otras probabilidades:

$$Prob^*\{I(\mathbf{u}; s_k) = 1 | (\mathbf{n})\} = 1 - \sum_{k \neq k_0} Prob^*\{I(\mathbf{u}; s_k) | (\mathbf{n})\}$$

Simulación secuencial indicador

Cada nodo \mathbf{u} a lo largo de una trayectoria aleatoria, el krigeado indicador sigue la relación de orden de corrección que proporciona las probabilidades estimadas de K $p_k^*(\mathbf{u} | (\cdot))$, $k=1, \dots, K$.

La información condicionante (\cdot) consiste de los datos originales y los valores de simulación indicador previos para las categorías S_k . Se define cualquier orden de las categorías K , como $1, 2, \dots, K$, con este orden se define la función de distribución acumulada ajustada a un intervalo de probabilidad $[0, 1]$ con K intervalos:

$$[0, p_1^*(\cdot)], p_1^*(\cdot), p_2^*(\cdot) + p_1^*(\cdot), \dots, (1 - \sum_{k=1}^{K-1} p_k^*(\cdot), 1]$$

Se extrae un número p uniformemente distribuido en $[0, 1]$, este intervalo en donde p cae determina a categoría simulada en la localización \mathbf{u} , a actualizar todos datos indicador K con la nueva información simulada y continúa con la nueva ubicación \mathbf{u}' a lo largo de la trayectoria aleatoria.

3.6 Estimación de parámetros con PEST

La estimación de parámetros con PEST se describe brevemente a continuación basada en Watermark Numerical Computing (2010),

Estimación de parámetros para modelos lineales

Se tiene un sistema natural o artificial que se describe con la siguiente ecuación lineal

$$\mathbf{Xb}=\mathbf{c} \quad (\text{III.1})$$

En la ecuación \mathbf{X} es una matriz $m \times n$ que es una matriz con m líneas y n columnas. Los elementos de \mathbf{X} son constantes y, por tanto, independiente de los elementos de \mathbf{b} , un vector de orden n que mantiene los parámetros del sistema. \mathbf{c} es un vector de orden m que contiene los números que describen la respuesta del sistema a un conjunto de excitaciones incorporados en la matriz \mathbf{X} , y para la cual podemos obtener mediciones de campo o de laboratorio correspondientes por los que pueda inferir los parámetros del sistema que comprenden \mathbf{b} .

Las "observaciones" son los elementos del vector \mathbf{c} a pesar de que \mathbf{c} es generado por el modelo. Debido a que los modelos generan una gran cantidad de datos para que podamos tener sólo un puñado de mediciones de campo correspondientes en los que basar nuestras estimaciones de las propiedades del sistema. El vector \mathbf{c} sólo son los resultados de los modelos y no son mediciones de laboratorio o de campo complementarias y se llaman como las "observaciones generadas por modelos".

El conjunto complementario de campo o laboratorio de datos se conoce como "medidas" o "observaciones experimentales".

La función objetivo es un parámetro de optimización que se establece la suma de las desviaciones al cuadrado entre las observaciones generadas por modelos y observaciones experimentales. Por lo tanto, si el valor de la función objetivo se minimiza, el conjunto de parámetros determinado sobre la base de estas observaciones medidas será la correcta. La ecuación matemática que se desea minimizar Φ , donde Φ se define por la ecuación

$$\Phi = (\mathbf{c} - \mathbf{Xb})^t(\mathbf{c} - \mathbf{Xb}) \quad (\text{III.2})$$

Y \mathbf{c} contiene el conjunto de medidas de laboratorio o de campo; el superíndice "t" indica la operación de transposición de la matriz. Se puede demostrar que el vector \mathbf{b} que minimiza Φ de la ecuación anterior está dada por

$$\mathbf{b} = (X^t X)^{-1} X^t \mathbf{c} \quad (\text{III.3})$$

La condición de que el número de observaciones m es igual o mayor al número de parámetros n , la ecuación anterior provee una solución única al problema de estimación de parámetros. Además, como la matriz $(X^t X)$ es definida positiva en estas condiciones, la solución es relativamente fácil de obtener numéricamente.

El vector \mathbf{b} expresado en la primera ecuación III.1 difiere de \mathbf{b} de la última ecuación III.3, en que la primera son valores de \mathbf{c} son números de estimación de los modelos y la segunda contiene los datos medidos.

La última ecuación III.3 es el mejor estimador lineal no sesgado que la primera ecuación III.1.

Como un estimador, es este una realización particular del vector aleatorio \mathbf{b} calculado de n -dimensiones. A través de la ecuación III.3, el vector aleatorio \mathbf{c} de m -dimensiones son las observaciones experimentales, de las cuales las observaciones actuales son pero una particular realización. Si σ^2 representa la varianza de cada uno de los elementos de \mathbf{c} (los elementos de \mathbf{c} suponen que son independientes el uno del otro), entonces σ^2 puede estimarse como:

$$\sigma^2 = \Phi / (m - n) \quad (\text{III.4})$$

Donde $(m - n)$, es la diferencia entre el número de observaciones y el número de parámetros a estimar, representa el número de "grados de libertad" del problema de la estimación de los parámetros.

En la ecuación III.4 se muestra σ^2 que es directamente proporcional a la función objetivo y por lo tanto varía inversamente con la bondad de ajuste entre los datos experimentales y las observaciones generadas por modelos calculados.

Asignación de pesos a cada observación

Se asume que todas las observaciones tienen igual peso en el proceso de estimación de parámetros, esto no siempre será el caso como algunas mediciones pueden ser más propensas a cometer un error experimental que otros.

El problema se deriva donde las observaciones son de más de un tipo y las magnitudes diferentes. En el proceso de estimar la función objetivo se define por la ecuación III.2 y si los parámetros estimados son representados por los números más grandes tendrá preferencia indebida en el proceso de estimación de la función objetivo, mientras que los números más pequeños esto será especialmente desafortunado si las cantidades que representada por los números más pequeños es, de hecho, mide con mayor fiabilidad que la representada por los números más grandes.

Este problema puede ser superado si un peso se suministra con cada observación; cuanto mayor sea el peso correspondiente a una observación particular mayor es la contribución que la observación hace a la función objetivo. El cálculo de la función objetivo es modificado de la siguiente manera:

$$\Phi = (c - Xb)^t Q (c - Xb) \quad (\text{III.5})$$

o, para decirlo de otra manera,

$$\Phi = \sum_{i=1}^m (w_i r_i)^2 \quad (\text{III.6})$$

Donde r_i (el residual enésimo) que expresa la diferencia entre el resultado de modelo y el valor real o medida de laboratorio para la observación enésima. Si el peso de la observación se asignan correctamente la ecuación III.6 es equivalente a

$$\Phi = (c - Xb)^t P^{-1} (c - Xb) \quad (\text{III.7})$$

Donde

$$P (= Q^{-1}) = C(c) / \sigma^2 \quad (\text{III.8})$$

C (c) representa la matriz de covarianza del vector aleatorio **c** de m-dimensión de los cuales nuestro vector de medición es una realización particular. Debido a que

\mathbf{Q} es una matriz diagonal, también lo es \mathbf{P} , sus elementos son los recíprocos de los elementos correspondientes de \mathbf{Q} . El supuesto de independencia de las observaciones se mantiene a través insistiendo en que \mathbf{Q} (y por tanto \mathbf{P}) tienen elementos diagonales únicos, los elementos de \mathbf{Q} siendo los cuadrados de los pesos de observación.

Con la inclusión de los pesos en las observaciones, el vector de parámetros del sistema es estimado por:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^t \mathbf{Q} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^t \mathbf{Q} \mathbf{c} \quad (\text{III.9})$$

Y la matriz de covarianzas de los parámetros se convierte:

$$\mathbf{C}(\mathbf{b}) = \sigma^2 (\mathbf{X}^t \mathbf{Q} \mathbf{X})^{-1} \quad (\text{III.10})$$

El uso de información previa en el proceso de estimación de parámetros

A menudo sucede que tenemos alguna información sobre los parámetros que se desean optimizar, y que obtuvo esta información de forma independiente de la experiencia actual. Es de utilidad esta información en el proceso de estimación de parámetros ya que esta información puede dar estabilidad al proceso.

Existe la posibilidad de que los parámetros estén altamente correlacionadas y esto puede conducir a las estimaciones de los parámetros no sean únicas y pueden afectar a la inestabilidad numérica y el fracaso del proceso de estimación.

La inclusión de información previa, es matemáticamente equivalente a mediciones adicionales, puede alterar el predominio numérico de los parámetros más observaciones y así dotar al sistema de la capacidad de suministrar un conjunto único de parámetros estimados.

Estimación de Parámetros no lineal

La mayoría de los modelos son no lineales, las relaciones entre los parámetros y las observaciones no son del tipo expresado por las ecuaciones III.1 y III.2. Los

modelos no lineales deben ser "linealizados" con el fin de que la teoría anterior se pueda utilizar en la estimación de sus parámetros.

Deje que las relaciones entre los parámetros y observaciones generadas por modelos de un modelo en particular pueden representar mediante la función M que asigna espacio de parámetros n -dimensión en m -dimensión en el espacio de observación.

Esta función es continuamente diferenciable con respecto a todos los parámetros del modelo para los que se solicitan las estimaciones. Supongamos que, para el conjunto de parámetros que comprenden el vector \mathbf{b}_0 el correspondiente conjunto de observaciones calculado del modelo (generada utilizando M) es \mathbf{c}_0 , es decir;

$$\mathbf{c}_0 = M(\mathbf{b}_0) \quad (\text{III.11})$$

Ahora para generar un conjunto de observaciones \mathbf{c} que corresponde a un vector de parámetros \mathbf{b} que difiere ligeramente de \mathbf{b}_0 , el teorema de Taylor nos dice que la siguiente relación es aproximadamente correcta, la aproximación mejora con la proximidad de \mathbf{b} a \mathbf{b}_0 :

$$\mathbf{c} = \mathbf{c}_0 + J(\mathbf{b} - \mathbf{b}_0) \quad (\text{III.12})$$

Donde, \mathbf{J} es la matriz Jacobiana la matriz compuesta de m filas (una para cada observación), los n elementos de cada fila siendo los derivados de una observación particular con respecto a cada uno de los n parámetros. En otras palabras \mathbf{J}_{ij} es la derivada de la i -ésima observación con respecto parámetro j i -ésimo. La ecuación III.12 es la linearización de la ecuación III.11.

Ahora especificamos que nos gustaría obtener un conjunto de parámetros del modelo para que las observaciones generadas por modelos sean lo más cercano posible a nuestro conjunto de observaciones experimentales. Es decir, se desea determinar un conjunto de parámetros para los que la función objetivo Φ definido por:

$$\Phi = (c - c_0 - J(b - b_0))^t Q (c - c_0 - J(b - b_0)) \quad (\text{III.13})$$

Es un mínimo, donde \mathbf{c} en la ecuación III.13 representa ahora nuestro vector observación experimental. Comparando la ecuación III.13 con la ecuación III.7, es evidente que serían equivalentes si \mathbf{c} de la ecuación III.7 es reemplazado por $(c - c_0)$ de la ecuación III.13 y \mathbf{b} de la ecuación III.7 por $(b - b_0)$ de la ecuación III.13.

Así, la teoría para la estimación de parámetros lineal se adapta para calcular el vector de actualización de parámetros $(b - b_0)$ sobre la base del vector $(c - c_0)$ que define la discrepancia entre las observaciones del modelo calculado c_0 y sus contrapartes experimentales c . Denotando \mathbf{u} como el vector de actualización de parámetros, la ecuación III.9 se convierte en:

$$\mathbf{u} = (J^t Q J)^{-1} J^t Q (c - c_0) \quad (\text{III.14})$$

Y la ecuación de covarianza se convierte

$$C(\mathbf{b}) = \sigma^2 (J^t Q J)^{-1} \quad (\text{III.15})$$

El proceso de convergencia iterativo hacia el mínimo de la función objetivo está representado esquemáticamente por un problema de dos parámetros en la figura III.8

En problemas reales los modelos no son lineales y localizar el mínimo global en la función objetivo puede ser difícil de encontrar. Una elección adecuada para el conjunto de parámetros inicial también puede reducir el número de iteraciones necesarias para minimizar la función objetivo; para los modelos grandes esto puede significar un ahorro considerable de tiempo en la computadora.

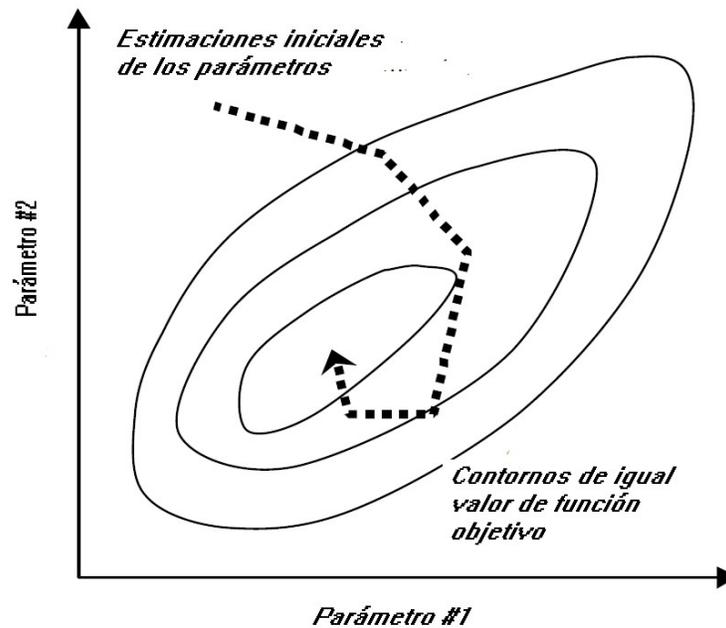


Figura III.8. Mejora iterativa de valores de los parámetros iniciales hacia el mínimo de la función objetivo global.

El parámetro Marquardt

La ecuación III.14 es la base de ponderada menos parámetro cuadrados estimación no lineal. Se puede reescribirse como

$$u = (J^t Q J)^{-1} J^t Q(r) \quad (\text{III.16})$$

Donde u es un vector de actualización y r es el vector de residuos del conjunto actual de parámetros.

El gradiente de la función objetivo Φ en el espacio de parámetros se denota por el vector g . El i -ésimo elemento de g se define como:

$$g_i = \frac{\partial \Phi}{\partial b_i} \quad (\text{III.17})$$

Es decir, es la derivada parcial de la función objetivo con respecto al i -ésimo parámetro.

Sin embargo, a pesar del hecho de que $-g$ se define la dirección de descenso más pronunciado de Φ , se puede demostrar que u es normalmente un mejor parámetro de dirección que $-g$, especialmente en situaciones donde los parámetros están altamente correlacionados. En tales situaciones, la iteración sigue la dirección de la pendiente más empinada que conduce al fenómeno de la "hemstitching", donde el conjunto de parámetros salta de un lado a otro de un valle en Φ como los parámetros se actualizan en iteraciones sucesivas; la convergencia hacia el mínimo Φ global es entonces extremadamente lenta (figura III.9).

El "parámetro Marquardt" que benéfica en la mayoría de los problemas de estimación que se expresa matemáticamente

$$u = (J^t Q J + \alpha I)^{-1} J^t Q(r) \quad (\text{III.18})$$

Donde α es el parámetro de Marquardt e I es una matriz identidad $n \times n$. Y el gradiente del vector g puede ser expresado como:

$$g = -2J^t Q r \quad (\text{III.19})$$

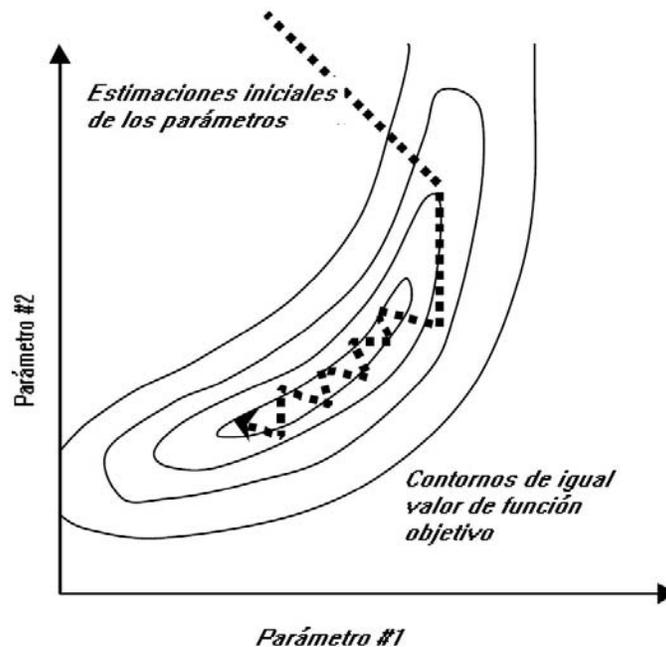


Figura III.9. Fenómeno de bordado o "hemstitching".

3.7. Análisis de los intervalos de confianza y coeficiente de variación.

Además de los parámetros estimados β^* , PEST proporciona la matriz de covarianza de los errores de estimación. La varianza de estimación de los parámetros permite estimar un intervalo h dentro del cual, a un cierto valor de probabilidad, se encontrará el valor real, pero desconocido, del parámetro β . Este intervalo $(\beta-h, \beta+h)$ se denomina intervalo de confianza (Samper, 1992). Si el intervalo h es igual a dos veces la desviación estándar del error de estimación, y si los errores de estimación siguen una distribución normal, entonces el valor real desconocido de β estará contenido en (β^*-h, β^*+h) con una probabilidad aproximada de 95%.

Los intervalos de confianza permiten representar la incertidumbre asociada al valor del parámetro estimado. Si la varianza de estimación es grande, entonces el valor del parámetro estimado es incierto y los intervalos de confianza serán muy amplios.

El porcentaje del coeficiente de variación estimado es para representar la incertidumbre de la estimación se calculo a partir de la siguiente expresión.

$$CV = 100 * (\sigma^2 / X)$$

σ^2 =varianza de estimación

X = valor estimado

CAPITULO 4. Análisis Geoestadístico

4.1.-Localización de los cortes litológicos

Geología local del área de estudio

La geología superficial que se encuentra en la zona estudio consiste de (a) depósitos lacustres (**Qla**), (b) depósitos aluviales (**Qal**), los cuales son materiales poco consolidados y su granulometría comprende desde grava, arena, limos y arcillas (Fries, 1962) y (c) la Formación el Pino (Vázquez-Jaimes, 1989), que son intercalaciones de rocas volcánicas de composición andesíticas y basáltica con ceniza, lapilli y escoria de caída.

Geología del subsuelo

Registros litológicos de pozos

Como resultado de la recopilación de información se obtuvieron 111 registros litológicos de pozos. Las fuentes de esta información fueron los Sistemas de Aguas de la Ciudad de México, la base de datos del proyecto “Nivel de Riesgo en la Cd. De México en función de las características hidrogeológicas de la ZMVM y fuentes potenciales y activas de contaminación por hidrocarburos” (Hernández - Espriú, 2013) y los registros litológicos de reportados por Valencia Guzmán (2002).

Los registros fueron sometidos al siguiente procesamiento de control de calidad basado principalmente en la localización de los mismos. Los registros obtenidos sin localización (10 registros) no fueron utilizados en la elaboración de este trabajo, los registros consultados con el mismo nombre pero diferentes posiciones e identificación de reposición se consideraron registros separados. Los datos de posición de la cota de elevación fueron obtenidas con las coordenadas otorgados y el Google Earth.

En los registros se reconocieron once categorías litológicas:

- i. Arcilla,
- ii. Arcilla-arena
- iii. Arena
- iv. Arena-arcilla
- v. Arena-grava
- vi. Basalto
- vii. Basalto-escoria
- viii. Escoria
- ix. Conglomerado
- x. Grava
- xi. Toba

De las cuales se agruparon en nueve categorías litológicas porque el basalto y la escoria en la mayoría de los registros obtenidos se encuentran reportados como basalto-escoria, quedando las nueve categorías siguientes:

- i. Arcilla
- ii. Arcilla-arena
- iii. Arena
- iv. Arena-arcilla
- v. Arena-grava
- vi. Basalto-escoria
- vii. Conglomerado
- viii. Grava
- ix. Toba

En la tabla IV.1 se encuentran las coordenadas y fuentes de los 111 cortes litológicos usados en este trabajo y en las figuras IV.1 y IV.2 se observa la distribución y localización de los 111 pozos con registro litológico. La profundidad de los pozos es variada, de los 100 m a más de 1000 m de profundidad, y esto depende de la zona en que se encuentren localizados. Los pozos localizados en la porción NW de la zona de estudio tienen una profundidad promedio de 200 m a 300 m y presentan intercalaciones de sedimentos de diferentes granulometrías que van de arcilla hasta gravas principalmente. El espesor de la capa de arcilla lacustre en esta zona varía de 11 a 65 m siendo el mínimo en las zonas

alrededor de las sierras. En los pozos localizados en la porción central al NE de la zona de estudio, la capa lacustre tiene un espesor promedio de 40 m; en estos pozos se registra la mayor proporción de rocas volcánicas, tobas y lapillis, con intercalaciones de sedimentos variados como arcillas y conglomerados. Finalmente, los pozos que están al S, SE y SW del Cerro de la Estrella presentan un espesor de la arcilla lacustre de 13 a 37 m, seguida por una secuencia volcánica de basaltos con un espesor promedio de 33 m. Las profundidades de estos pozos no superan los 150 m.

Los registros litológicos de los pozos son información cualitativa que seguramente contiene errores de interpretación que dependen de los criterios de clasificación y la experiencia del personal de campo que hizo las descripciones. Adicionalmente, las profundidades reportadas para cada litología son inciertas debido a que la descripción de campo se hace a partir de los recortes recuperados durante la perforación. En ocasiones el registro litológico es ajustado con base en la interpretación del registro geofísico de pozo, lo que reduce la incertidumbre y los errores, aunque no los elimina. Aún cuando existen, en este trabajo supondré que esos errores son despreciables.

Secciones Geológicas

Se realizaron tres secciones geológicas de la zona de estudio (figura IV.1) con ayuda de los cortes litológicos y se describen brevemente a continuación:

Sección A-A'

La sección A-A' (figura IV.2 y IV.3) atraviesa longitudinalmente a las delegaciones Coyoacán e Iztapalapa con una longitud aproximadamente 17 km con una dirección W-E. Cruza los pozos Universidad, Rey Moctezuma, Educación N°1 y 2, Paseos de Taxqueña, Auxiliar Xotepingo 7C y 9C, Luis Rodríguez, Santa Cruz Meyehualco, Santa María Aztahuacán y Purísima N°4 (Sitio viejo). Esta sección

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

presenta tres tipos de unidades descritas por Vázquez-Jaimes, (1989): sedimentos lacustres (Qla), sedimentos aluviales (Qal) y rocas volcánicas cuaternarias. Los sedimentos lacustres se presentan en la mayoría de los cortes litológicos pero el espesor varía de algunos metros a 40 m y se acuñan alrededor del Cerro de la estrella. Los sedimentos aluviales son los que predominan en el subsuelo y se intercalan con derrames de basalto en la porción W y E. Es evidente que el acuífero en explotación corresponde a los sedimentos aluviales y las rocas volcánicas.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Clave	Fuente	NOMBRE	X	Y	Z
RL1	1	24 de Abril	487691.00	2146918.00	2229.70
RL2	1	Agrícola Oriental N° 1 (Sitio Nuevo)	491105.000	2134890.000	2241.000
RL3	1 y 2	Agrícola Oriental N° 2	490283.000	2143340.000	2226.000
RL4	1 y 2	Agrícola Oriental N° 4	491087.000	2142769.000	2231.000
RL5	2	Agrícola Oriental N°1(Sitio Viejo)	493193.958	2143557.274	2238.000
RL6	1 y 2	Agrícola Oriental N°5	491460.000	2143073.000	2231.000
RL7	1 y 2	Agrícola Oriental N°6	492005.000	2143268.000	2233.000
RL8	3	Agrícola Oriental N°6 *	492444.110	2143659.222	2240.000
RL9	1 y 2	Agrícola Oriental N°7	492480.000	2143391.000	2234.000
RL10	1	Álamos Jardín N°1	485048.000	2144858.000	2233.000
RL11	1	Álamos Jardín N°2	485137.000	2145220.000	2228.000
RL12	1	Albert y Berlín	485266.000	2141810.000	2245.000
RL13	1	Antonio M. Anza	483290.000	2146237.000	2229.000
RL14	1	Auxiliar de Xotepingo 2A	485506.000	2137170.000	2236.000
RL15	1	Auxiliar de Xotepingo 4B	486034.000	2137043.000	2241.000
RL16	1	Auxiliar de Xotepingo 5C	486497.000	2137022.000	2226.000
RL17	1	Auxiliar de Xotepingo 7A	486292.000	2136538.000	2237.000
RL18	1	Auxiliar de Xotepingo 7B	486644.000	2136583.000	2228.000
RL19	1	Auxiliar de Xotepingo 7C	488013.000	2138358.000	2228.000
RL20	1	Auxiliar de Xotepingo 8B	486846.000	2136440.000	2228.000
RL21	1	Auxiliar de Xotepingo 8C	492309.000	2136379.000	2245.000
RL22	1	Auxiliar de Xotepingo 9A	486374.000	2136408.000	2234.000
RL23	1	Auxiliar de Xotepingo 9B	486750.000	2136551.000	2228.000
RL24	1	Auxiliar de Xotepingo 9C	493176.000	2137549.000	2245.000
RL25	2	Balbuena N°1	488371.460	2146382.300	2233.000
RL26	2	Balbuena N°2	489475.490	2146220.150	2240.000

RL27	3	Cerro de la Estrella N°2	491796.193	2139088.738	2252.000
RL28	2	Ciudad Deportiva N°1	488390.580	2146033.970	2237.000
RL29	1 y 2	Ciudad Deportiva N°2	490398.000	2145310.000	2225.000
RL30	1 y 3	Colonia del Carmen	483107.000	2140054.000	2246.000
RL31	1	Country Club	485129.000	2139839.000	2241.000
RL32	2	Coyuya	487437.280	2145636.130	2233.000
RL33	3	Deportivo San Sebastián	499277.611	2141764.071	2237.776
RL34	1 y 3	Educación N°1	485286.000	2138246.000	2240.000
RL35	1	Educación N°2	486189.000	2137922.000	2235.000
RL36	1	Fraccionamiento Banjidal	485622.000	2140823.000	2233.000
RL37	1	Granjas Estrella N°1	490082.000	2136963.000	2248.000
RL38	3	Granjas Estrella N°2	491193.549	2136393.580	2248.000
RL39	2	Granjas San Antonio	488710.370	2141140.360	2242.000
RL40	1	Issste Coapa N°2	488653.000	2133597.000	2225.000
RL41	1	Issste Coapa N°3	486961.000	2134772.000	2228.000
RL42	1	Iztacalco Sitio Nuevo	487854.000	2143839.000	2230.000
RL43	2	Iztacalco Sitio Viejo	487401.644	2143386.156	2233.000
RL44	1	Iztapalapa N°1	490261.000	2140714.000	2235.000
RL45	1 y 2	Iztapalapa N°2	489438.000	2140219.000	2240.000
RL46	2	Iztapalapa N°4	493072.248	2140963.147	2238.000
RL47	2	Iztapalapa N°6	493743.030	2141012.910	2240.000
RL48	1	La Huerta	482897.000	2142725.000	2246.000
RL49	1	La Moderna	485806.000	2144537.000	2227.000
RL50	1	Los Reyes Iztapalapa	488948.000	2139023.000	2242.000
RL51	1 y 2	Luis Rodríguez (Iztapalapa 8)	495991.000	2139160.000	2230.000
RL52	1	Miguel Alemán	485058.000	2143993.000	2236.000
RL53	1	Miravalle	485128.000	2140818.000	2233.000
RL54	3	Nahuatlacas	484174.156	2136233.442	2270.000

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

RL55	1	Nativitas	485526.000	2142858.000	2230.000
RL56	1	Ortiz Rubio	485040.000	2142278.000	2234.000
RL57	1	Panteón Civil 1	492108.000	2138569.000	2229.000
RL58	2	Panteón Civil Iztapalapa 1	491768.975	2138698.653	2286.000
RL59	2	Panteón Civil Iztapalapa 2	491978.470	2138693.600	2249.000
RL60	1 y 2	Panteón Civil Iztapalapa 3	491725.000	2138700.000	2240.000
RL61	1	Parque los Venados	483733.000	2142046.000	2241.000
RL62	3	Paseos de Taxqueña	487086.866	2139343.312	2235.100
RL63	1	Pedregal San Francisco	482557.000	2138399.000	2247.000
RL64	3 y 2	Peñón N° 2	496992.000	2143214.590	2235.000
RL65	1	Peñón N° 3	497467.000	2142890.000	2223.000
RL66	3 y 2	Peñón N° 4	496818.400	2141176.760	2240.000
RL67	3 y 2	Peñón N° 6	497142.570	2142008.280	2244.000
RL68	1	Peñón N°7	496720.000	2141774.000	2231.000
RL69	1	Periférico N°1	485465.000	2136252.000	2239.000
RL70	1	Periférico N°12	488283.000	2133245.000	2227.000
RL71	3	Periférico N°16	489411.520	2134084.980	2243.000
RL72	1	Periférico N°2	486471.000	2134565.000	2237.000
RL73	1	Portales	484601.000	2141067.000	2234.000
RL74	1	Purísima Iztapalapa	498850.000	2139680.000	2254.000
RL75	2	Purísima Iztapalapa N° 1	492379.340	2140148.520	2248.000
RL76	2	Purísima Iztapalapa N° 2	492412.660	2140251.300	2247.000
RL77	2	Purísima Iztapalapa N° 3	492419.780	2140271.070	2246.000
RL78	1	Purísima Iztapalapa N° 4 Sitio Nuevo	498127.000	2139077.000	2247.000
RL79	2	Purísima Iztapalapa N° 4 Sitio Viejo	492423.700	2140298.800	2246.000
RL80	2	Purísima Iztapalapa N°5	492441.850	2140424.520	2243.000
RL81	1	Purísima Iztapalapa N°7	492535.000	2140798.000	2229.000

RL82	1	Radio Mil	484235.000	2143687.000	2229.000
RL83	1 y 2	Reforma Iztaccihuatl	486265.000	2143552.000	2228.000
RL84	1	Rey Moctezuma	483565.000	2137233.000	2260.000
RL85	1	Ruiz Cortines	484678.000	2136210.000	2249.000
RL86	1 y 2	San Juanico Iztapalapa	487683.000	2142140.000	2235.000
RL87	1 y 2	Santa Anita	486997.000	2145264.000	2225.000
RL88	1	Santa Catarina 11	492491.000	2134892.000	2235.000
RL89	1	Santa Catarina Coyoacán	482217.000	2139414.000	2256.000
RL90	3	Santa Cruz Meyehualco N° 2	496908.590	2138413.760	2253.000
RL91	3	Santa María Aztlahuacán	497538.052	2139356.580	2240.390
RL92	1	Santa Úrsula Coapa	483927.000	2134661.000	2250.000
RL93	2	Santa Úrsula Xitla	491412.800	2145817.980	2238.000
RL94	1	Sector Popular N° 2 Sitio Viejo	487515.000	2141057.000	2231.000
RL95	2	Sector Popular N°1	487767.940	2141496.820	2241.000
RL96	2	Sector Popular N°2 Sitio Nuevo	487475.150	2141067.680	2240.000
RL97	1	Sector Popular N°3 Sitio Nuevo	488357.000	2140463.000	2235.000
RL98	2	Sector Popular N°3 Sitio Viejo	488228.310	2140527.420	2243.000
RL99	1 y 2	Sifón	498464.000	2140028.000	2234.000
RL100	2	Tecomilt N° 2	493682.550	2142398.830	2242.000
RL101	1 y 2	Tlacotal	490421.000	2144029.000	2231.000
RL102	1 y 2	Unidad Modelo 1	486972.000	2141522.000	2237.000
RL103	1 y 2	Unidad Modelo 2	486722.000	2140761.000	2231.000
RL104	2	Unidad Modelo 3 Sitio Nuevo	491701.560	2138275.490	2257.000
RL105	1	Unidad Modelo 3 Sitio Viejo	487161.000	2140792.000	2227.000
RL106	3	Universidad	481025.298	2138752.980	2273.000
RL107	1 y 2	Viga 1	487194.000	2140483.000	2227.000
RL108	1 y 2	Viga 2	487135.000	2141202.000	2234.591

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

RL109	2	Viga 3 Sitio Nuevo	487217.920	2142229.350	2233.000
RL110	1	Viga 3 Sitio Viejo	487134.000	2142242.000	2230.000
RL111	2	Viga 4	487146.950	2143178.800	2234.000

Tabla IV.1. Relación de pozos con registro litológico. Fuentes: (1)-Proyecto Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del Distrito Federal "Nivel de Riesgo en la Cd. De México en función de las características hidrogeológicas de la ZMVM y fuentes potenciales y activas de contaminación por hidrocarburos" Clave 121128., (2)-Sistema de Aguas de la Ciudad de México y (3)-Tesis de licenciatura de Nelly Ivonne Valencia Guzmán.

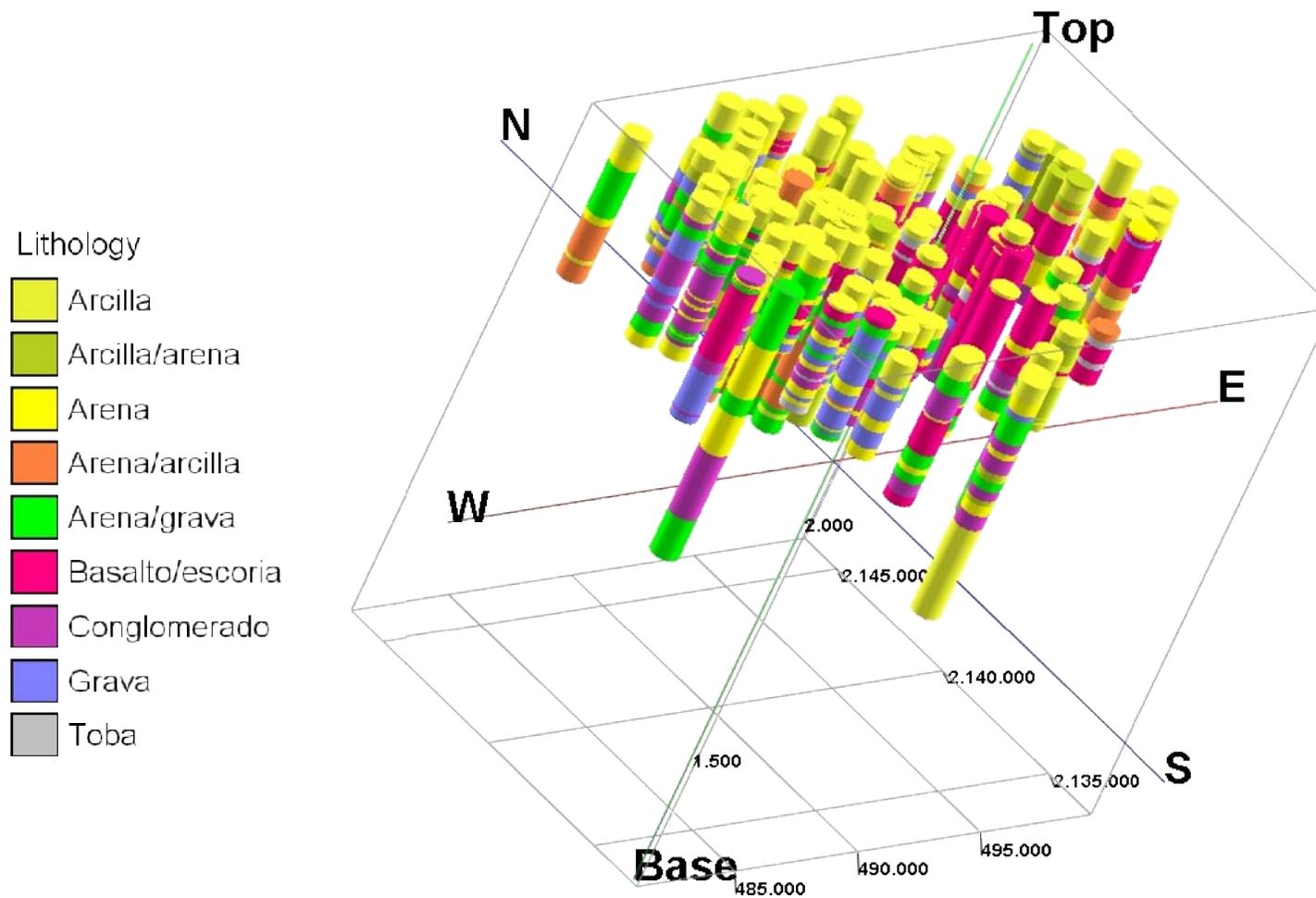


Figura IV.1. Diagrama 3-D de los 111 cortes litológicos y las categorías litológicas identificadas.

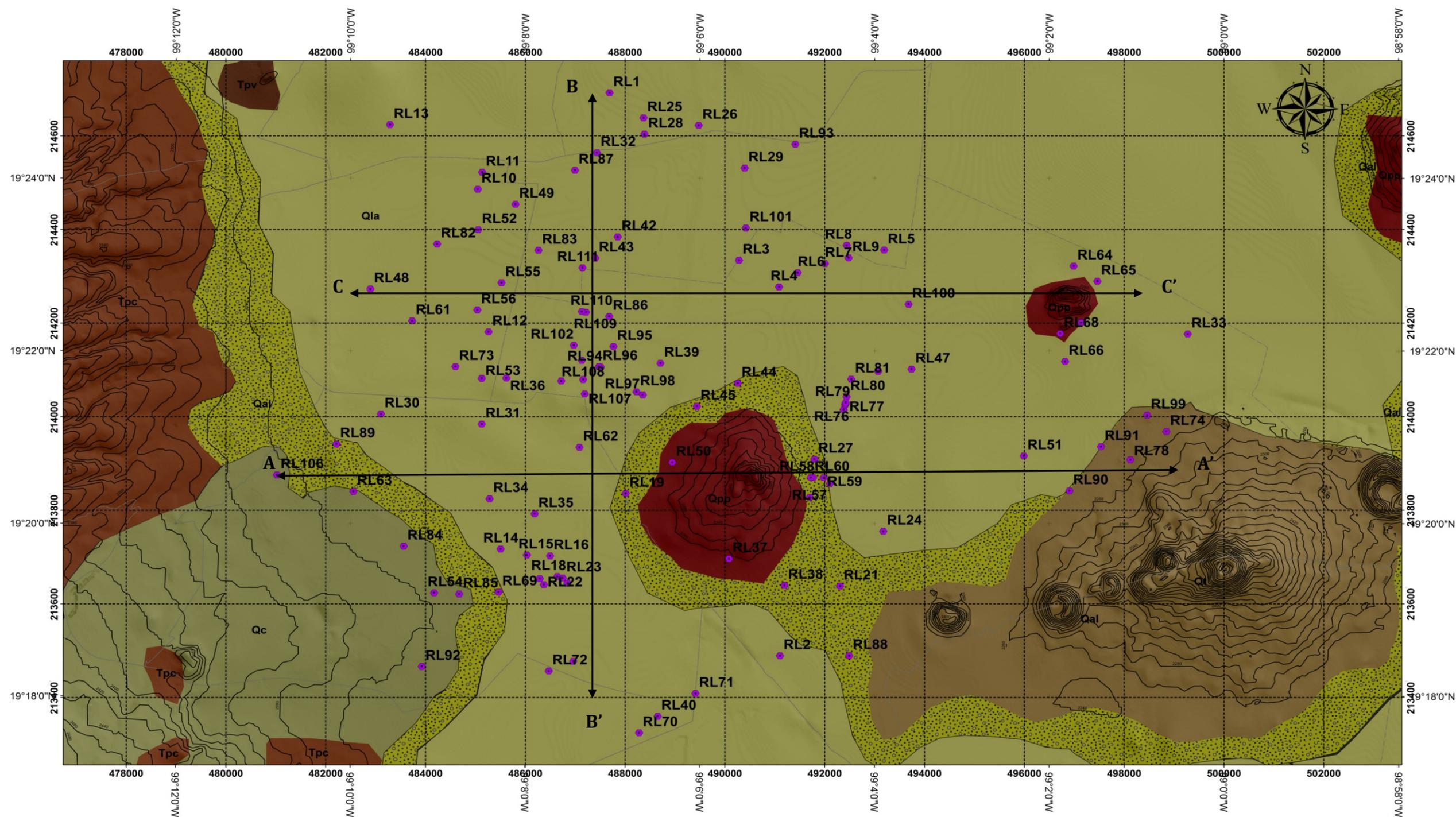


Figura IV.2. Localización y distribución de los pozos con registro litológico y secciones geológicas en las delegaciones Iztapalapa, Coyoacán, Iztacalco y Benito Juárez

Sección B-B'

La sección B-B' (figura IV.2 y IV.4) tiene una longitud aproximada de 12.5 km en dirección Norte a Sur y cruza a las delegaciones Iztacalco, Iztapalapa y Coyoacán. Esta sección está constituida por 24 cortes litológicos que cortan, igual que la sección A-A', a tres unidades litológicas: la unidad lacustre, la aluvial y las rocas volcánicas del cuaternario. La unidad lacustre tiene un espesor que varía de 20 m a 40 m siendo la parte más delgada al pasar muy cerca del Cerro de la estrella. La unidad aluvial es la mezcla de todos los sedimentos. Al igual que en la sección A-A', los pozos no logran cortar el límite entre la unidad aluvial y la Secuencia estratificada (Tppc). La unidad volcánica no aflora en superficie pero se presenta como pequeños derrames aislados y como grandes derrames intercalados en la unidad aluvial.

Sección C-C'

La figura IV.2 y IV.5 muestran la sección geológica C-C' con una longitud aproximada de 14 km y cruza la delegación Benito Juárez, Iztacalco e Iztapalapa. Con ayuda de 17 registros litológicos se logra reconocer las tres unidades anteriormente mencionadas Q(la), Q(al) y Q(b). La secuencia lacustre Q(la) tiene un espesor de 30 m al W y va aumento hacia los pozos Agrícola Oriental donde tiene su máximo espesor y después disminuye al Peñón de los baños. La unidad aluvial en la porción W no presenta derrames volcánicos y estos aparecen aislados a la altura de la Viga hasta ser más continuos a una profundidad 120 m con espesores variables hacia al E.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

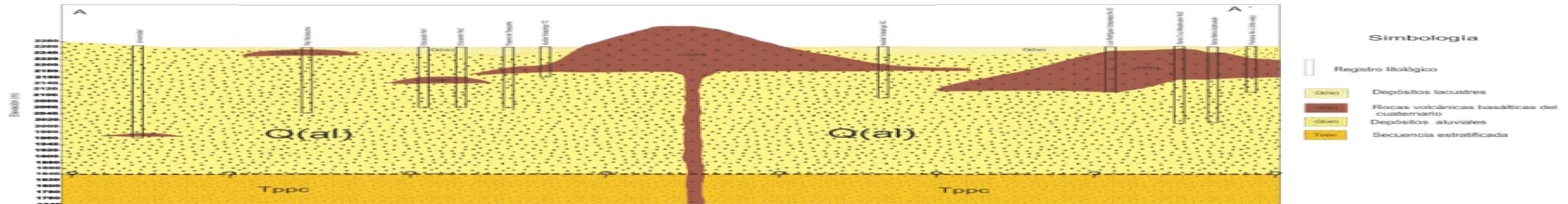


Figura IV.3. Sección geológica A-A' (Basada en el Instituto de Geofísica (1994) y registros litológicos (SACMEX, Hernández-Espriú (2013), Valencia (2002))).

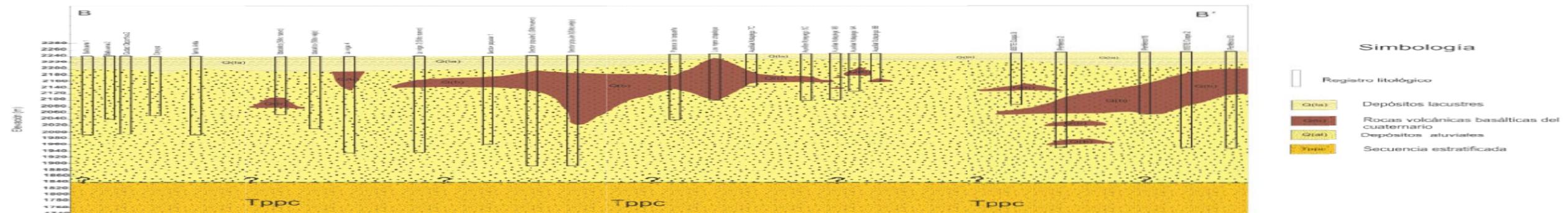


Figura IV.4. Sección geológica B-B' (Basada en el Instituto de Geofísica (1994) y registros litológicos (SACMEX, Hernández-Espriú (2013), Valencia (2002))).

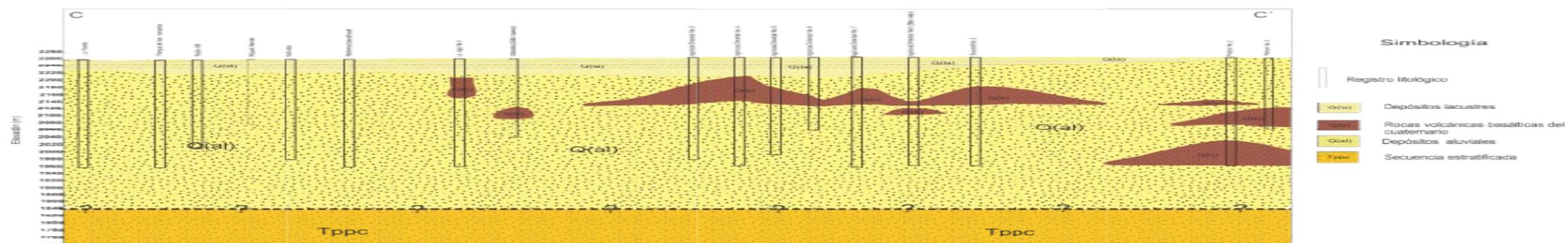


Figura IV.5. Sección geológica C-C' (Basada en el Instituto de Geofísica (1994) y registros litológicos (SACMEX, Hernández-Espriú (2013), Valencia (2002))).

4.2 Definición de las hidrofacies

Una hidrofacies es una o más litofacies con propiedades hidráulicas similares. En este trabajo se definieron cuatro hidrofacies que agrupan a una o más de las categorías litológicas identificadas en los registros litológicos. A cada categoría litológica le fue asignada una hidrofacies de acuerdo a los siguientes criterios: Conductividad hidráulica estimada (de acuerdo a la litología y teórica reportada) y su porosidad primaria o secundaria. Las hidrofacies obtenidas fueron denotadas por letras de A hasta la D. Las hidrofacies A y B son de baja conductividad hidráulica y las hidrofacies C y D son de alta conductividad hidráulica.

Hidrofacies A

Esta hidrofacies se caracteriza por la presencia principal de arcilla lacustre que constituye el acuitardo superior con espesores de 6 m a 70 m. Esta hidrofacies es considerada de baja permeabilidad de acuerdo a las conductividades hidráulicas reportadas (Instituto de Geofísica, 1994; Lesser y Asociados, 2000; Vargas–Cabrera (1995); Rudolph & et al., 1989).

Hidrofacies B

Esta hidrofacies es la combinación de cuatro sedimentos reportados como: arcilla-arena, conglomerado, arena-arcilla y toba. Estos sedimentos son considerados depósitos aluviales de baja permeabilidad. Esta hidrofacies está se encuentra en contacto con la hidrofacies A, hidrofacies D e hidrofacies C en forma de lentes en los intervalos de profundidad de 1900 a 2250 m.

Hidrofacies C

La hidrofacies es contrastante por el origen volcánico de esta roca, las rocas volcánicas se reportan como una fuente principal de agua subterránea en la ciudad de México por su fracturamiento que permite el paso de agua a través de ellas. Esta es una combinación de Basalto, Basalto-escoria y escoria y es

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

considerada de alta conductividad hidráulica. Esta hidrofacies por su origen se encuentra restringida por la zona cercana al Cerro de la estrella teniendo un espesor de 70 m y siendo menor en las zonas del oriente de Iztapalapa.

Hidrofacies D

Esta hidrofacies está constituida por arena, grava y arena-grava y agrupa los depósitos aluviales de alta conductividad. Esta hidrofacies está en contacto con las hidrofacies A, B y C.

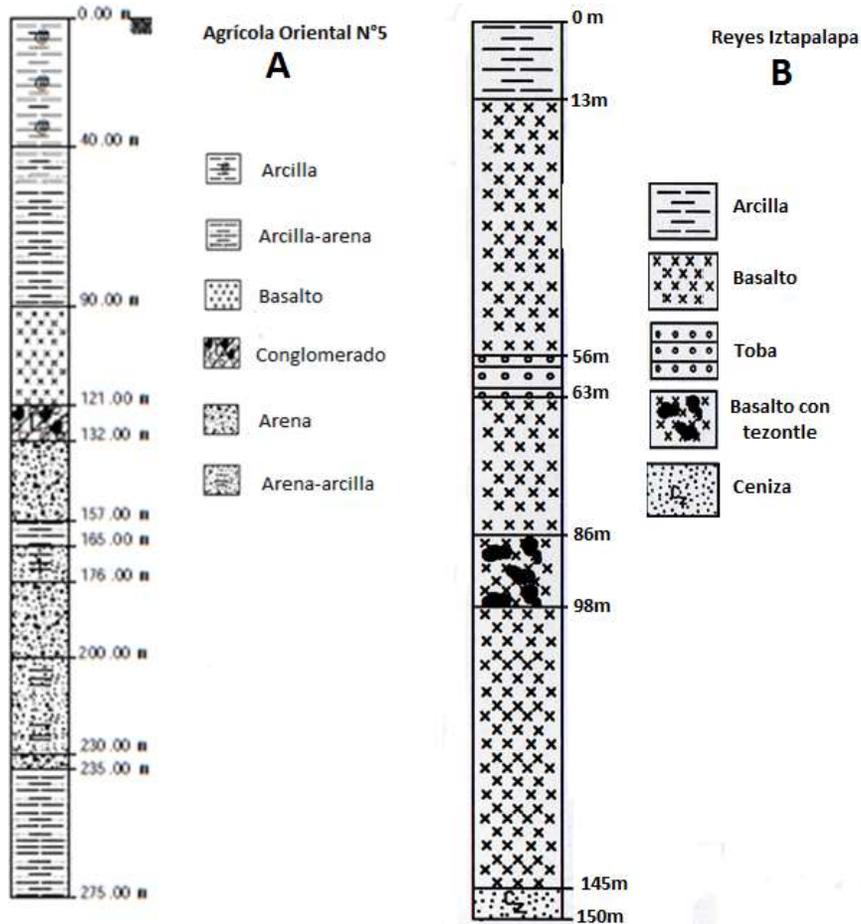


Figura IV.6 Registros litológicos de los pozos: A) Agrícola Oriental N°5 y B) Reyes Iztapalapa (Sistemas de Aguas de la Ciudad de México, 2012).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

4.3.-Identificación de hidrofacies

De los 111 cortes litológicos se identificaron once categorías litológicas las cuales hemos agrupado en cuatro hidrofacies. En la figura IV.6 se muestran los cortes litológicos de los pozos Agrícola Oriental N°5 y Reyes Iztapalapa, y en la Tabla IV.2 se ejemplifica la reclasificación de cada categoría litológica a una de las cuatro hidrofacies para esos dos pozos en la zona de estudio.

En la figura IV.7 se logra visualizar la distribución de las cuatro hidrofacies a profundidad con la nueva agrupación y se observa que la hidrofacies A tiene gran cobertura en la porción superior, las hidrofacies B y D se encuentran ampliamente distribuidas e intercaladas, mientras que la hidrofacies C se encuentra restringida mayormente en la porción SE de la zona de estudio.

Tabla IV.2. Registro litológico de los pozos AG5 (Agrícola Oriental N°5) y Reyes Iztapalapa (RI) ilustrando la reclasificación de categorías litológicas y la asignación de hidrofacies.

Clave	Profundidad superior	Profundidad inferior	Sedimento reportado	Sedimento asignado	Hidrofacies
AG5	0	13	Arcilla	Arcilla	A
AG5	13	56	Basalto	Basalto/escoria	C
AG5	56	63	Toba	Toba	B
AG5	63	88	Basalto	Basalto/escoria	C
AG5	88	96	Basalto/escoria	Basalto/escoria	C
AG5	96	145	Basalto	Basalto/escoria	C
AG5	145	150	Ceniza volcánica	Arena	D
RI	0	40	Arcilla	Arcilla	A
RI	40	90	Arcilla/arena	Arcilla/arena	B
RI	90	121	Basalto	Basalto/escoria	C
RI	121	132	Aglomerado	Basalto/escoria	C
RI	132	157	Arena	Arena	D
RI	157	165	Arcilla/arena	Arcilla/arena	B
RI	165	172	Arena	Arena	D

Modelo geostatístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

RI	172	176	Arena/arcilla	Arena/arcilla	B
RI	176	200	Arena	Arena	D
RI	200	230	Arena/arcilla	Arena/arcilla	B
RI	230	237	Arena	Arena	D
RI	237	275	Arcilla/arena	Arcilla/arena	B

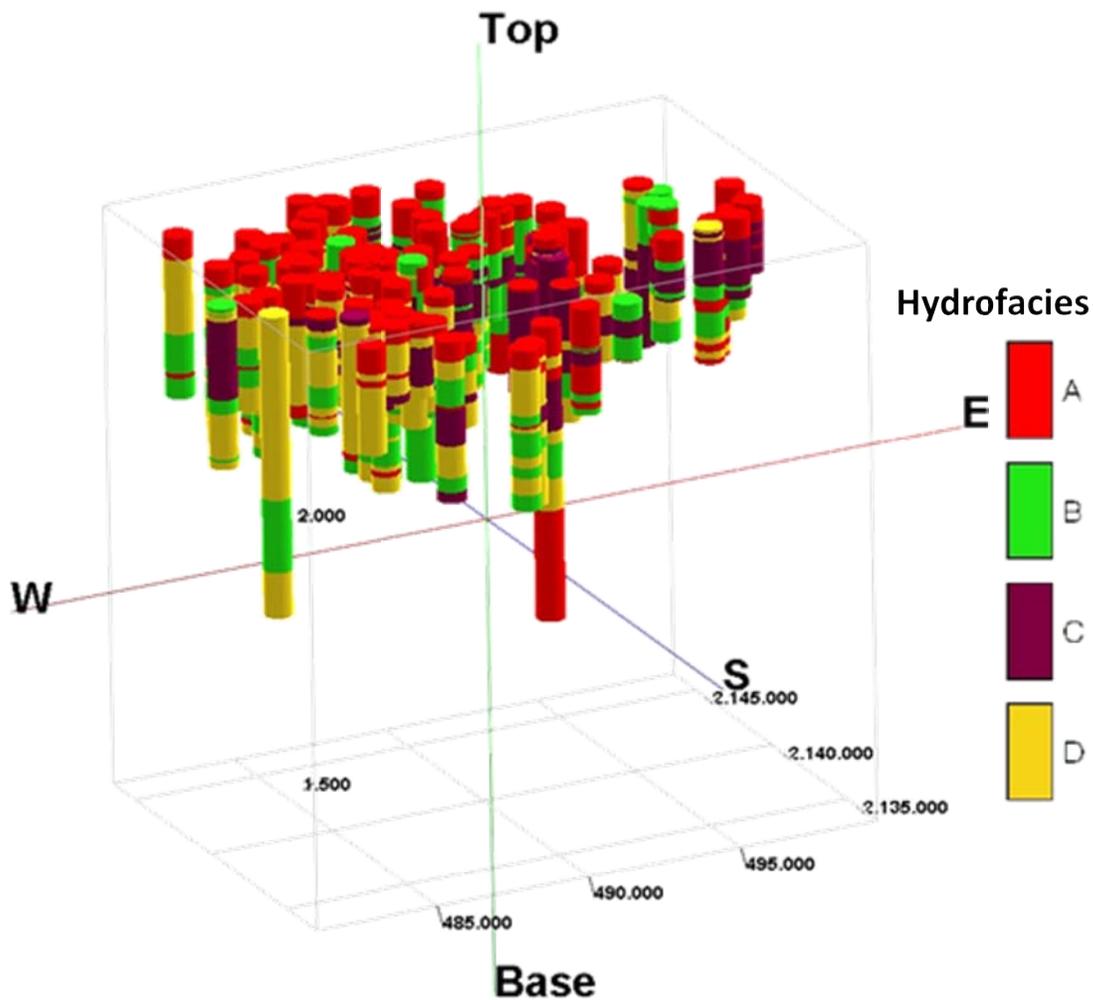


Figura IV.7 Distribución de las hidrofacies a profundidad de la zona de estudio.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

4.4.-Discretización de los datos

Una vez que los registros litológicos fueron reclasificados a hidrofacies, se procedió a su discretización. La profundidad total se dividió en elementos de dos metros de longitud en la vertical y se obtuvieron sus coordenadas, x , y , z (elevación media) y la hidrofacies correspondiente. Cada punto puede pertenecer a una de cuatro hidrofacies, lo que se expresa mediante cuatro funciones indicador, una para cada hidrofacies. La función indicador para la i -ésima hidrofacies se define como:

$$I_i(x, y, z) = \begin{cases} 1 & (x, y, z) \in \text{hidrofacies } i \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}$$

Es decir, el valor de la función indicador es 1 si la hidrofacies i existe en el punto (x, y, z) o 0 si no existe en ese punto. La tabla IV.3 ilustra el resultado para una porción del pozo Auxiliar Xotepingo N°8. Este procedimiento se realizó para los 111 pozos, obteniéndose 13,518 datos.

Tabla IV.3. Extracto de la discretización del pozo Auxiliar Xotepingo N° 8 y su hidrofacies asignada a profundidad.

Clave	X	Y	Z	Hidrofacies A	Hidrofacies B	Hidrofacies C	Hidrofacies D
				I _A	I _B	I _C	I _D
AX8C1	492309	2136379	2245	1	0	0	0
AX8C2	492309	2136379	2243	1	0	0	0
AX8C3	492309	2136379	2241	1	0	0	0
AX8C4	492309	2136379	2239	1	0	0	0
AX8C5	492309	2136379	2237	1	0	0	0
AX8C6	492309	2136379	2235	1	0	0	0
AX8C7	492309	2136379	2233	1	0	0	0
AX8C8	492309	2136379	2231	1	0	0	0
AX8C9	492309	2136379	2229	1	0	0	0
AX8C10	492309	2136379	2227	1	0	0	0
AX8C11	492309	2136379	2225	1	0	0	0

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

AX8C12	492309	2136379	2223	0	0	0	1
AX8C13	492309	2136379	2221	0	0	0	1
AX8C14	492309	2136379	2219	0	0	0	1
AX8C15	492309	2136379	2217	0	0	0	1
AX8C16	492309	2136379	2215	0	0	0	1
AX8C17	492309	2136379	2213	0	0	0	1
AX8C18	492309	2136379	2211	0	0	0	1
AX8C19	492309	2136379	2209	0	0	0	1
AX8C20	492309	2136379	2207	0	0	0	1
AX8C21	492309	2136379	2205	0	0	0	1
AX8C22	492309	2136379	2203	0	0	0	1
AX8C23	492309	2136379	2201	0	0	0	1
AX8C24	492309	2136379	2199	0	0	0	1
AX8C25	492309	2136379	2197	0	0	0	1
AX8C26	492309	2136379	2195	0	0	0	1
AX8C27	492309	2136379	2193	0	0	0	1
AX8C28	492309	2136379	2191	0	0	0	1
AX8C29	492309	2136379	2189	0	0	0	1
AX8C30	492309	2136379	2187	0	0	0	1
AX8C31	492309	2136379	2185	0	0	0	1
AX8C32	492309	2136379	2183	0	0	1	0
AX8C33	492309	2136379	2181	0	0	1	0

4.5.-Análisis de las proporciones con respecto a la profundidad

En este apartado se analiza la variabilidad de las proporciones de las hidrofacies con respecto a la profundidad. La proporción de la i -ésima hidrofacies a la elevación z_l (en msnm), se define como

$$Prop_i(z_l) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{k=1}^{N_{k,j}} I_i(x_j, y_j, z_{l-1} \leq z_k \leq z_{l+1})$$

donde I_i es la función indicador para la i -ésima hidrofacies, N_j es el número de pozos, $N_{k,j}$ es el número de datos del el pozo localizado en (x_j, y_j) que se

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

encuentren entre los límites definidos por $z_{l\pm 1} = z_l \pm tol$, tol es una tolerancia (m) y N es el número total de datos para la elevación z_l . En el caso que $N_{k,j}$ es constante para todos los pozos, $N = N_j N_{k,j}$; sin embargo, cada pozo tiene diferente elevación topográfica y diferente profundidad y por ello $N_{k,j}$ es variable con la profundidad.

Se analizaron los 13,518 datos de las hidrofacies agrupados para poder discriminar y ver la predominancia de la misma a profundidad. Este valor de proporciones a profundidad fue útil para "ajustar" las proporciones de nuestros modelos tridimensionales de la zona de estudio (figura IV.8).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

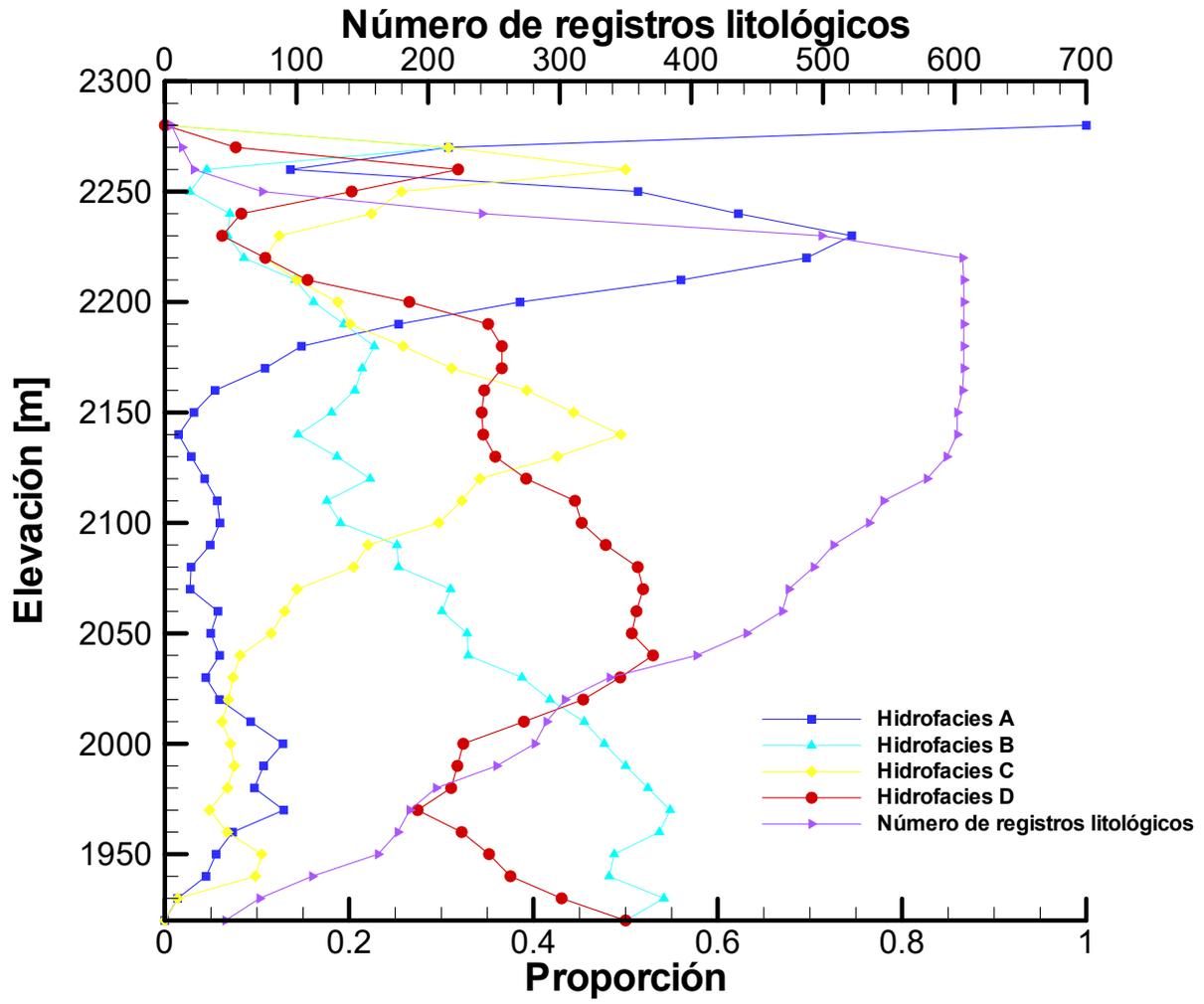


Figura IV.8. Proporciones de las hidrofacies vs elevación en toda la zona de estudio.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

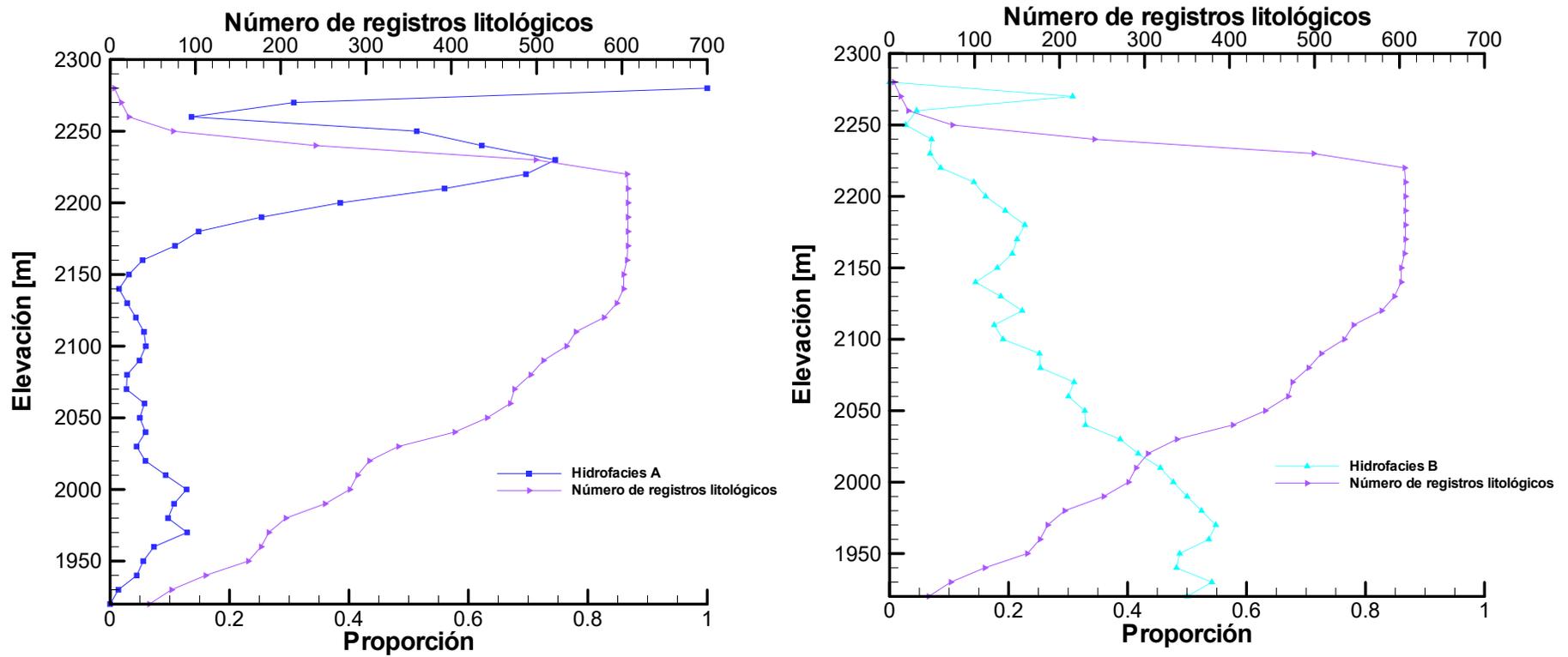


Figura IV.9. Proporciones de las hidrofacies vs elevación en toda la zona de estudio (izquierdo hidrofacies A y derecho hidrofacies B).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

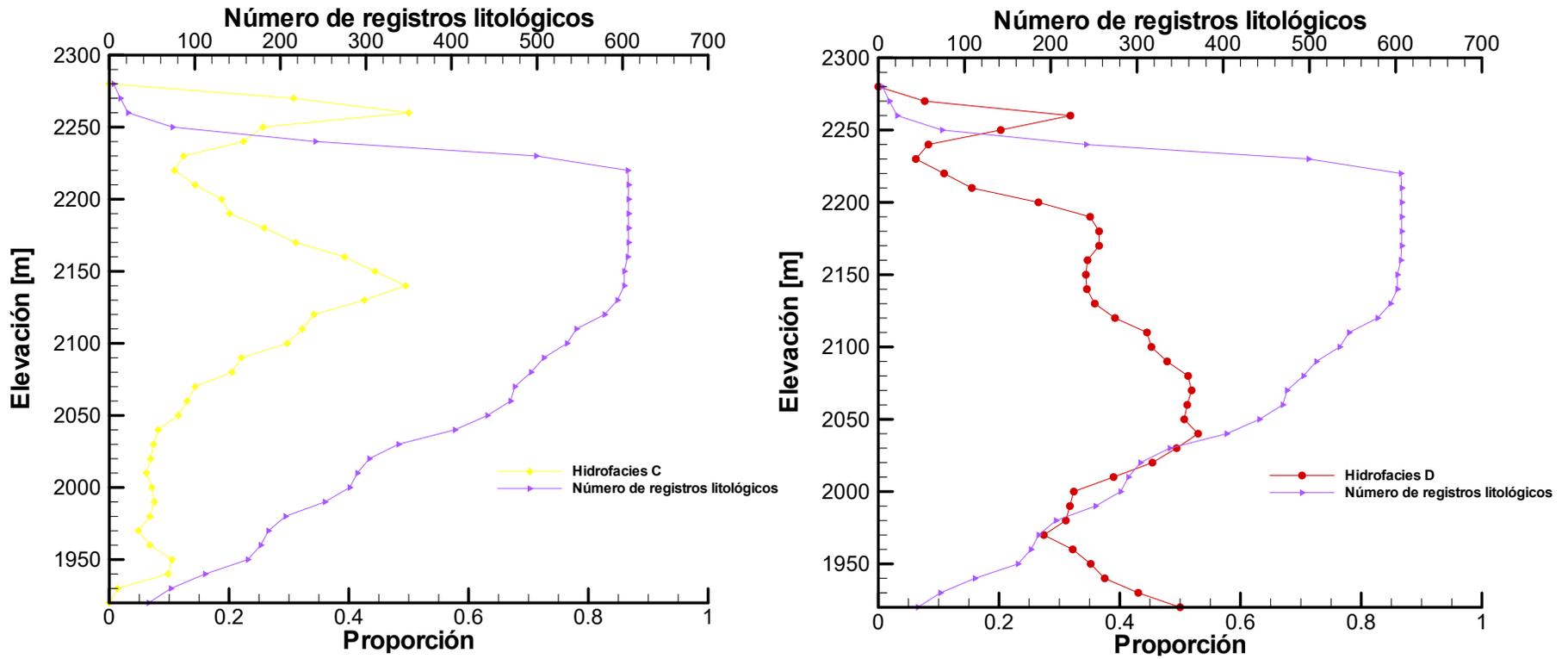


Figura IV.10. Proporciones de las hidrofacies vs elevación en toda la zona de estudio (izquierdo hidrofacies C y derecho hidrofacies D).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

En las figuras IV.8, IV.9 y IV.10 se muestran las proporciones con respecto a la profundidad de las hidrofacies A, B, C y D en la zona de estudio y el número de registros litológicos. Con base en el número de registros, se seleccionó el intervalo entre 1920 m a 2242 m.

Hidrofacies A: *Las proporciones varían de 60% a 80% en los primeros 60 m de nuestro intervalo de estudio (figuras IV.8 y IV.9). Disminuyendo del 80% al 5% a una elevación de 2150 y se mantiene hasta una elevación de 2050m.*

Hidrofacies B. *Esta varía de casi 5% al 50% en el intervalo de 2250 m a 1950m de manera casi lineal. La proporción incrementa cuando las hidrofacies C y D disminuyen a profundidad (figuras IV.8 y IV.9).*

Hidrofacies C. *Esta hidrofacies se encuentra localizada en un intervalo de 2230m a 2050m con una proporción mínima del 15% y una máxima de 50% (2130m) comparte gran parte de su distribución con la hidrofacies D (figuras IV.8 y IV.10).*

Hidrofacies D. *La última hidrofacies se intercala con la hidrofacies B y C en profundidad. Los intervalos de elevación varían de 2250m a 2000m en las proporciones del 10% y su máximo de 50% a una elevación de 2030m (figuras IV.8 y IV.10).*

4.6.-Definición de zonas de modelación

Los datos de los registros litológicos se encuentran distribuidos por las delegaciones Iztapalapa, Iztacalco, Benito Juárez y Coyoacán esencialmente. Las zonas de modelación se seleccionaron con base en la continuidad de las capas de los sedimentos reportados. La Zona I es la que se encuentra en la área lacustre

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

sin elementos geográficos que influyan en el análisis geoestadísticos. El área II se localiza entre dos altos topográficos geográficos el cerro de la Estrella y la Sierra de las Cruces limitando las geometrías de las hidrofacies y la zona III es la zona que se encuentra limitada por el Cerro de la estrella al oeste, el Peñón de los Baños al NE y la Sierra de Santa Catarina. Adicionalmente, con esto se obtuvo un mejor manejo de los recursos computacionales (figura IV.11).

Zona I

La zona I (figura IV.11) se concentra 7,647 de los datos totales y tiene una dimensión de 10.846 km de longitud por 6.864 km de ancho con una profundidad de 421 m. Las coordenadas en donde se encuentran son 493,743.03 m a 482,897 m en X, en Y son 2, 146,918 m a 2, 140,054 m y son un área de 74.447 Km².

Zona II

La zona II (figura IV.11) los datos empiezan a tener decremento debido a la concentración de pozos de agua y se obtiene 2,867 datos. La dimensión de esta zona es de 11.465 km de longitud por 6.809 km de ancho con una profundidad de 348 m. Las coordenadas son 492,491 m a 481,025.3 m en X, en Y son 2,140,054 m a 2,133,245 m y son un área de 78.069 Km².

Zona III

La zona III (figura IV.11) es la más pequeña con un área de 55.259 Km² y los datos que se concentran 3,104 datos. Las coordenadas son 491,193.549 m a 499,277.611 m en X, en Y son 2,136,379 m a 2,143.214.59 m y con una longitud 8.084 km de longitud por 6.835 km de ancho con una profundidad de 351 m.

Las proporciones de las hidrofacies varían dependiendo de la zona y el tipo de hidrofacies. La zona I la hidrofacies A (15.46%), hidrofacies B (43.13%),

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

hidrofacies C (9,98%) y la hidrofacies D (31,43%). La zona II la hidrofacies A (12.80%), hidrofacies B (23.69%), hidrofacies C (14.91%) y la hidrofacies D (48.60%).Y la zona III la hidrofacies A (19.62%), hidrofacies B (23.55%), hidrofacies C (39.52%) y la hidrofacies D (17.31%).

4.7 Análisis geoestadístico de las hidrofacies.

El análisis geoestadístico se realizó con la ayuda del software *Geostatistical Software Library (GSLIB)* (Deutsch y Journel, 1998) y *Model-Independent Parameter Estimation PEST* (Doherty, 2010). Se obtuvieron variogramas experimentales de las hidrofacies a los que se les ajustaron variogramas compuestos de dos estructuras: pepita (nugget) más un modelo exponencial.

Los parámetros de estos variogramas fueron estimados minimizando el error de validación cruzada que es una técnica para probar la validez de un modelo de variograma obtenido por Kriging de cada localización de la muestra con todas las otras muestras en la vecindad de búsqueda, y comparando los estimados con los valores reales de la muestra (Díaz, 2003); los cuales representan el variograma que tiene menor error al representar los datos de las hidrofacies en 3D. Este procedimiento pudiera no ajustar algunos de los variogramas experimentales. Esto se realizó para cada hidrofacies en cada una de las zonas I, II y III. Existen una variedad de métodos de simulación de las facies como la simulación plurigaussiana, simulación Gaussiana truncada, simulación geoestadística de probabilidad de transición, Modelación de puntos de multiples, etc. Para la modelación de facies es ampliamente utilizado la simulación plurigaussiana truncada en la industria del petróleo para definición de las facies en los reservorios del petróleo, yacimientos minerales, hidrofacies en acuíferos (Perulero *et al.* 2012) y las simulaciones secuencial indicador condicionada. En Dell’Arciprete *et al*

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

(2012)., realizaron una comparación de tres diferentes métodos simulaciones secuenciales indicador condicionada(SISIM), simulaciones de probabilidades de transición(T-PROGS) y modelación de puntos múltiples(MPS), obteniendo para cada método las siguientes observaciones: para el SISIM reproduce mejor la longitud de los cuerpos de las hidrofacies, para el T-PROGS reproduce mejor la transición entre las hidrofacies (su conectividad) y para el MPS reproduce la forma de los cuerpos de las hidrofacies.

De acuerdo a los valores mostrados en las tablas IV.4, IV.5 y IV.6 los valores del rango del modelo exponencial indican que la hidrofacies con mayor continuidad es la zona I, mientras que en las zonas II y III se ven reducidas prácticamente a la mitad su valor en todas las hidrofacies.

La hidrofacies A presenta una valor de correlación horizontal de 1.1 km en la zona I, en 800 m en la zona II y 824 m en la zona III. La correlación vertical varía de 22 m a 40 m aproximadamente.

La hidrofacies B, tiene en la zona I un rango de correlación mayor que la hidrofacies A; esto lo demostró el variograma experimental. Los valores varían de 1.34 km a un valor que se reduce en 690 m y 426 m en las zonas II y III, respectivamente. Los valores de correlación vertical varían de 24 m a 32 m.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

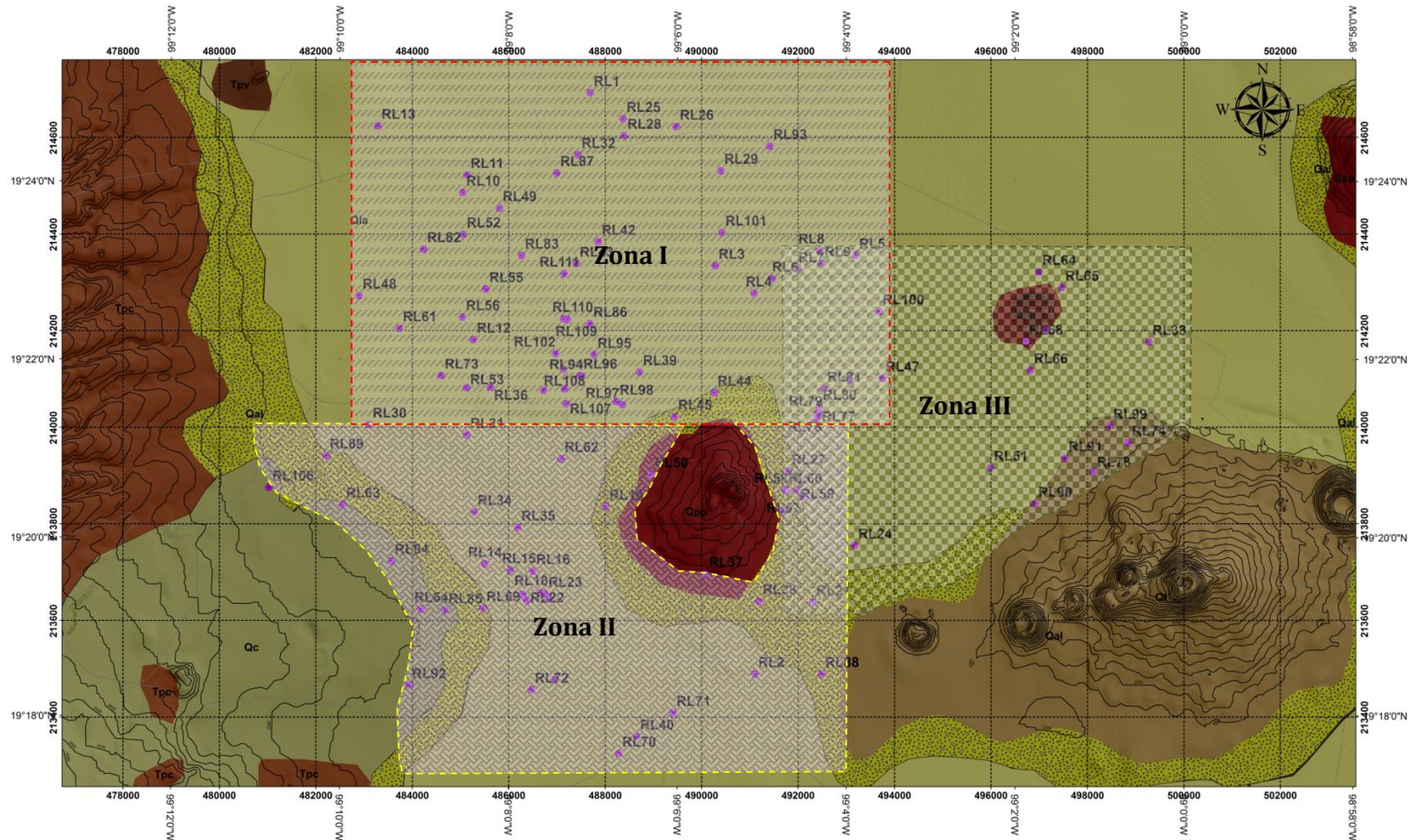


Figura IV.11. Mapa de localización de las zonas I,II y III en el área de estudio del acuífero aluvial de la Ciudad de México.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Las hidrofacies C, son las rocas volcánicas que se concentran en la porción oriente de la zona de estudio, por lo que sus rangos de correlación se constriñen a valores de 700 m a 88 m en la zona III. Mientras que los valores de correlación vertical es la zona III presenta un valor mayor que los demás.

Las hidrofacies D, son los lentes de sedimentos de alta conductividad hidráulica, esto se confirma con ayuda de este análisis. Los valores de correlación varían de 100 m a 440 m de longitud en la horizontal y en la vertical son de 14 m a 25 m.

Las tablas IV.7, IV.8, IV.9 muestran las varianzas de la estimación de los parámetros geoestadísticos obtenidos de la validación cruzada asistida con PEST de la zona I, zona II y zona III, respectivamente. En el anexo Modelación de variogramas de la Zona I se muestran el ajuste por medio de la validación cruzada y el ajuste del variograma experimental.

Las figuras IV.12 a la IV.35 se muestran los variogramas verticales y horizontales experimentales ajustados a un modelo exponencial de todas las hidrofacies y de las zonas.

Hidrofacies	Nugget	Contribución de varianza	Estructura	Rango de la estructura anidada horizontal (m)	Rango de la estructura anidada vertical
A	0.15	0.08	Exponencial	1212.81	40.00
B	1.313E-1	1.118E-1	Exponencial	1341.278	35.702
C	9.000E-2	5.000E-2	Exponencial	700.000	23.519
D	1.347E-1	8.507E-2	Exponencial	439.248	24.6394

Tabla IV.4 Valores ajustados de los parámetros geoestadísticos de los variogramas para cada hidrofacies de la zona I.

Hidrofacies	Nugget	Contribución de varianza	Estructura	Rango de la estructura anidada horizontal (m)	Rango de la estructura anidada vertical
A	2.000E-2	1.000E-1	Exponencial	800.815	44.985
B	1.000E-2	1.400E-1	Exponencial	690.963	32.415
C	0.000	1.518E-1	Exponencial	385.888	29.452
D	0.000	2.503E-1	Exponencial	107.034	14.091

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Tabla IV.5 Valores ajustados de los parámetros geoestadísticos de los variogramas para cada hidrofacies de la zona II.

Hidrofacies	Nugget	Contribución de varianza	Estructura	Rango de la estructura anidada horizontal (m)	Rango de la estructura anidada vertical
A	4.307E-2	1.762E-1	Exponencial	824.39	21.999
B	7.000E-2	9.754E-2	Exponencial	426.305	24.981
C	1.000E-1	1.500E-1	Exponencial	88.040	46.972
D	3.368E-2	1.100E-1	Exponencial	114.977	21.632

Tabla IV.6 Valores ajustados de los parámetros geoestadísticos de los variogramas para cada hidrofacies de la zona III.

Parámetro/Hidrofacies	Varianza de la estimación			
	A	B	C	D
Nugget	0.00808174	1.50622E-05	6.101E-06	3.08025E-07
Rango horizontal	91975.72563	595.116025	1025.056272	702.5415303
Varianza	0.005202953	1.48302E-05	9.21423E-06	2.2679E-07

Tabla IV.7. Varianza de la estimación de los parámetros de la Zona I.

Parámetro/Hidrofacies	Varianza de la estimación			
	A	B	C	D
Nugget	0.02805274	2.0826E-05	1.7741E-06	1.1768E-05
Rango horizontal	248488.292	100649.466	3741.15723	1674.61008
Varianza	0.02025569	0.00326315	0.01037689	0.02186554

Tabla IV.8. Varianza de la estimación de los parámetros de la Zona II.

Parámetro/Hidrofacies	Varianza de la estimación			
	A	B	C	D
Nugget	4.0357E-07	0.0001246	0.00480547	8.2403E-08
Rango horizontal	610182.043	2237.4792	2698.42328	1054.04116
Varianza	3.5928E-05	0.00014551	0.00903697	2.772E-07

Tabla IV.9. Varianza de la estimación de los parámetros de la Zona III.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

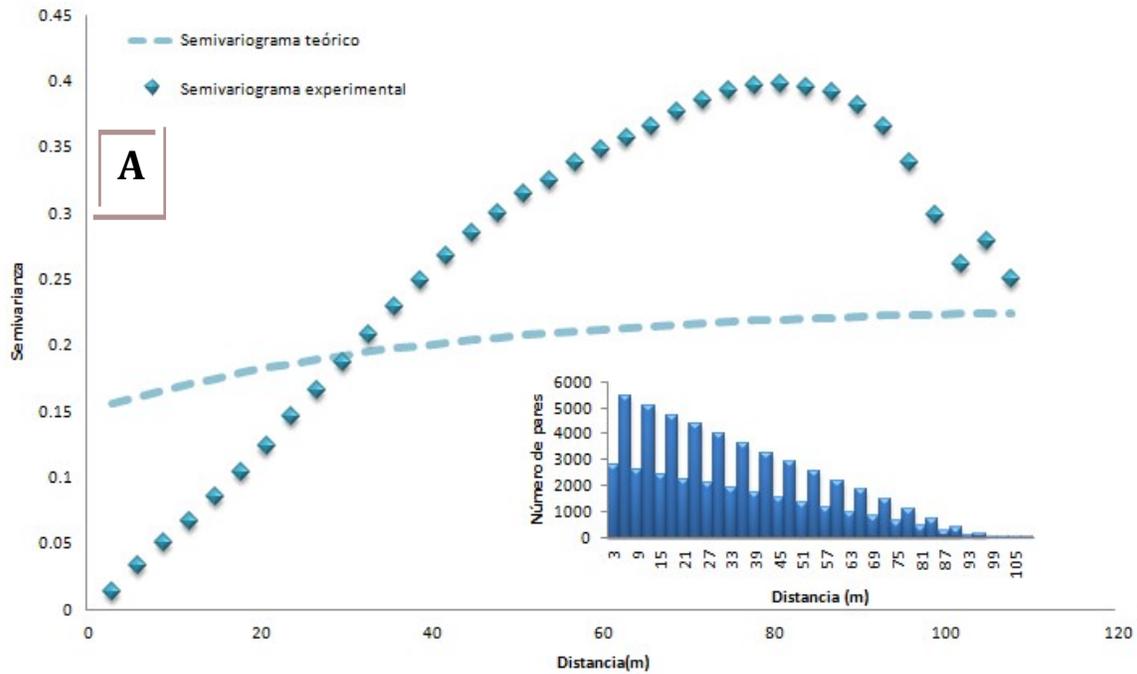


Figura IV.12. Variograma experimental y teórico ajustado vertical para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies A de la zona I.

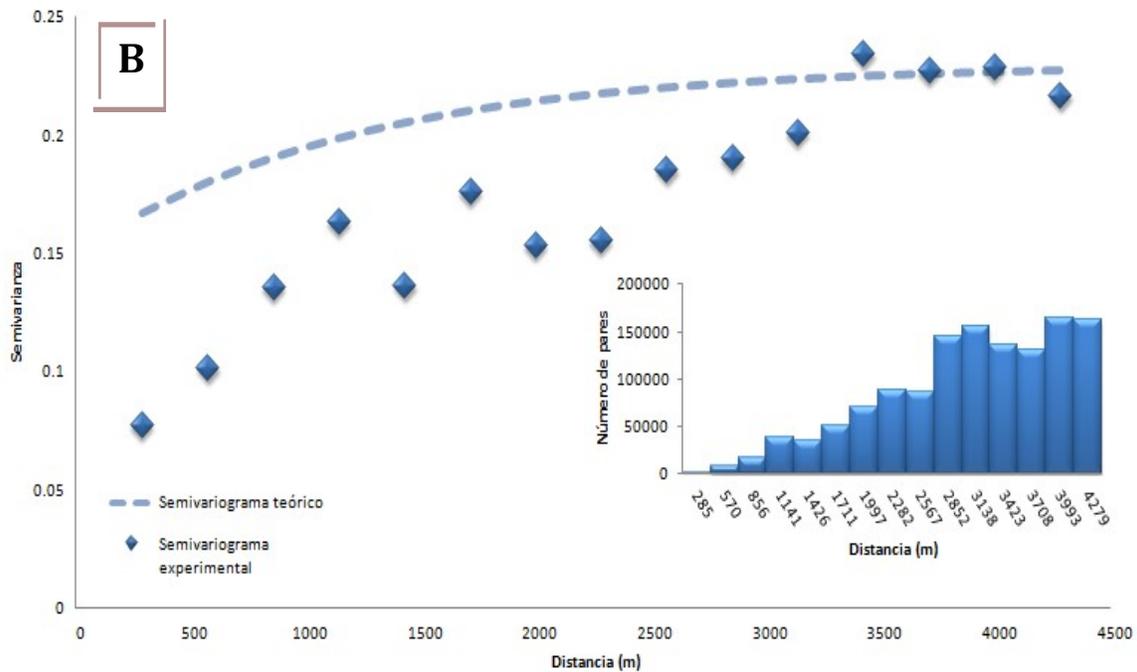


Figura IV.13. Variograma experimental y teórico ajustado horizontal para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies A de la zona I.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

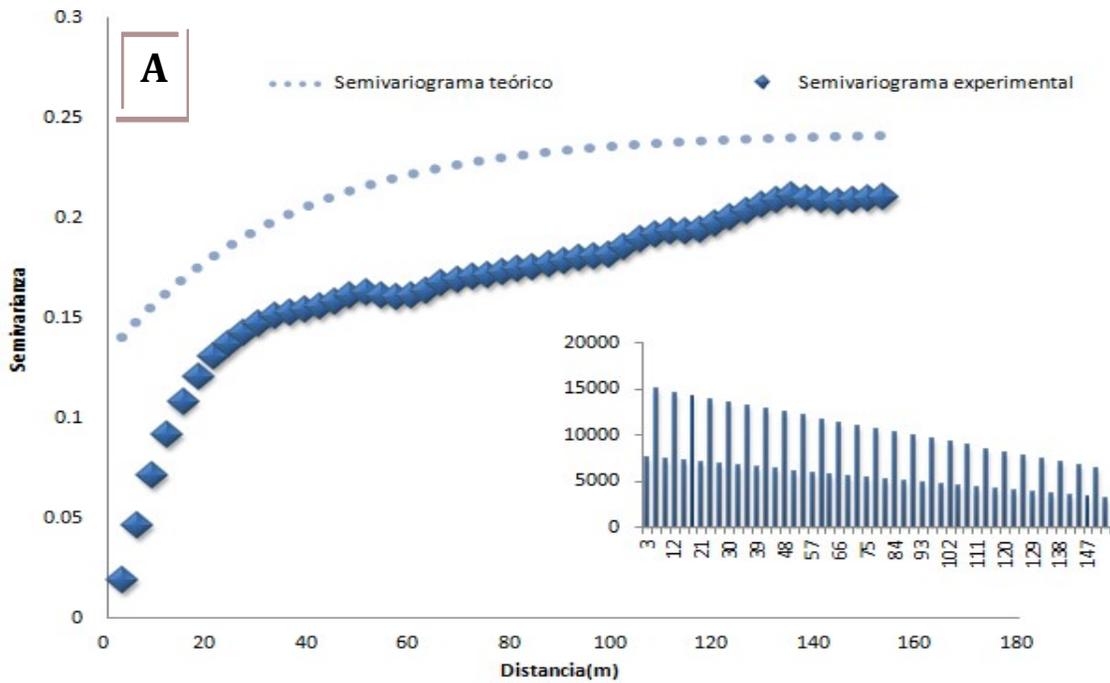


Figura IV.14. Variograma experimental y teórico ajustado vertical para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies B de la zona I.

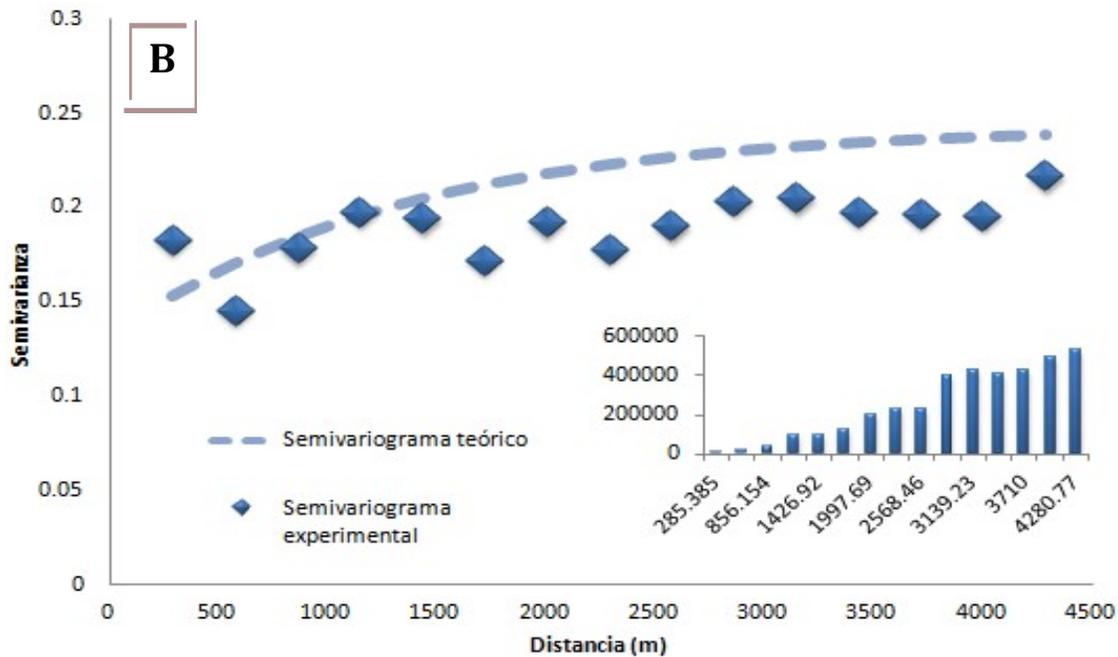


Figura IV.15. Variograma experimental y teórico ajustado horizontal para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies B de la zona I.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

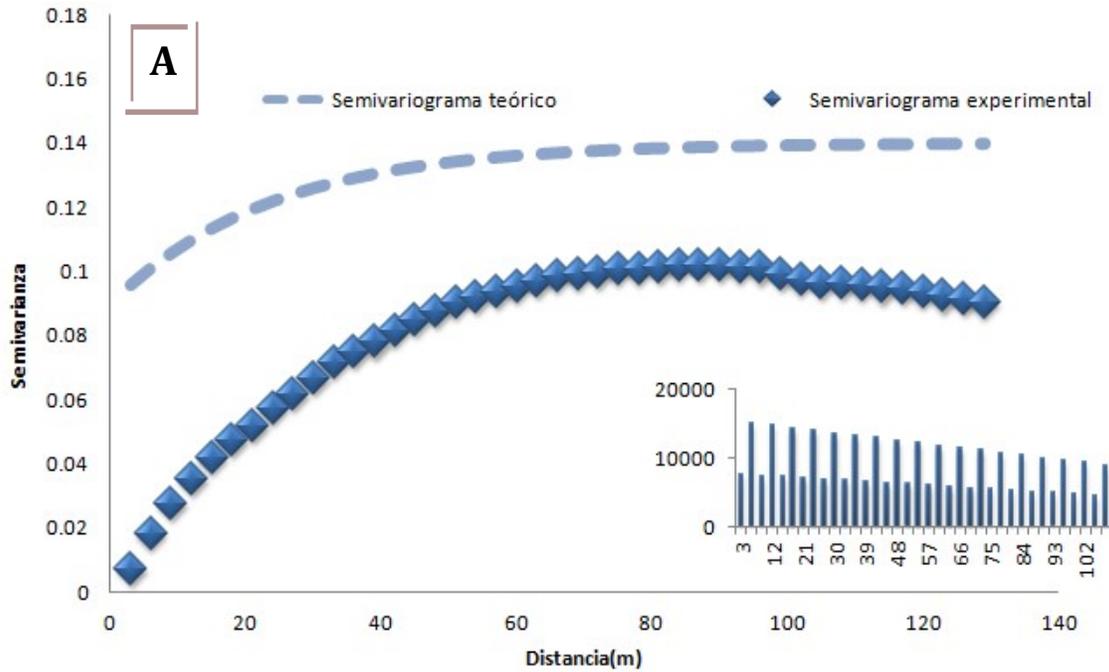


Figura IV.16. Variograma experimental y teórico ajustado vertical para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies C de la zona I.

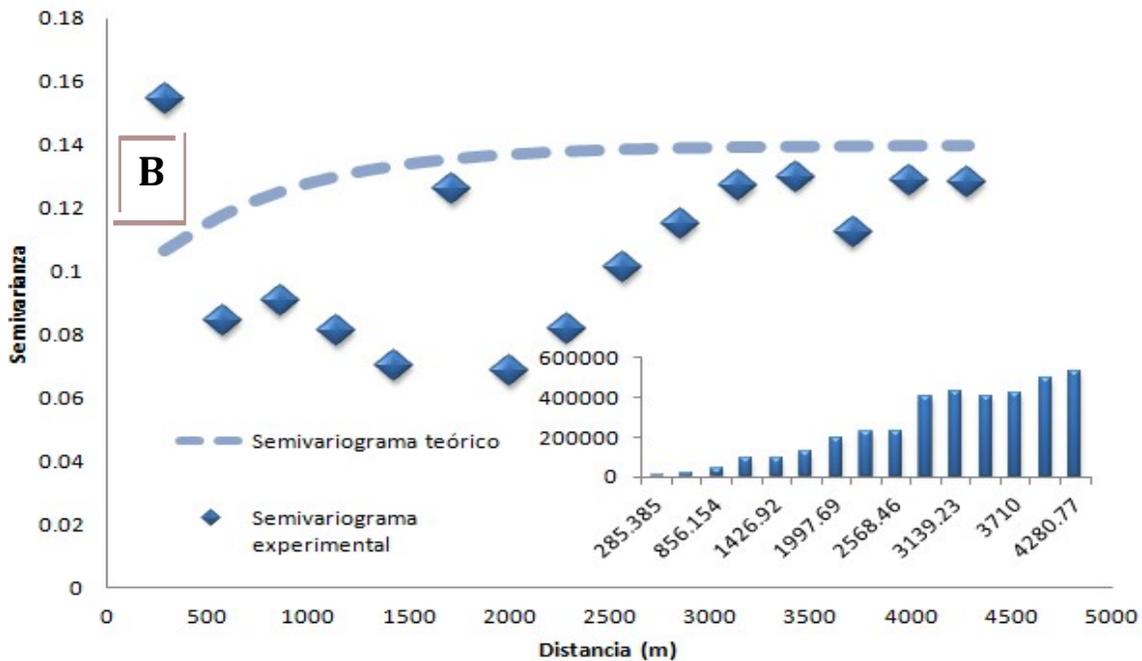


Figura IV.17. Variograma experimental y teórico ajustado horizontal para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies C de la zona I.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

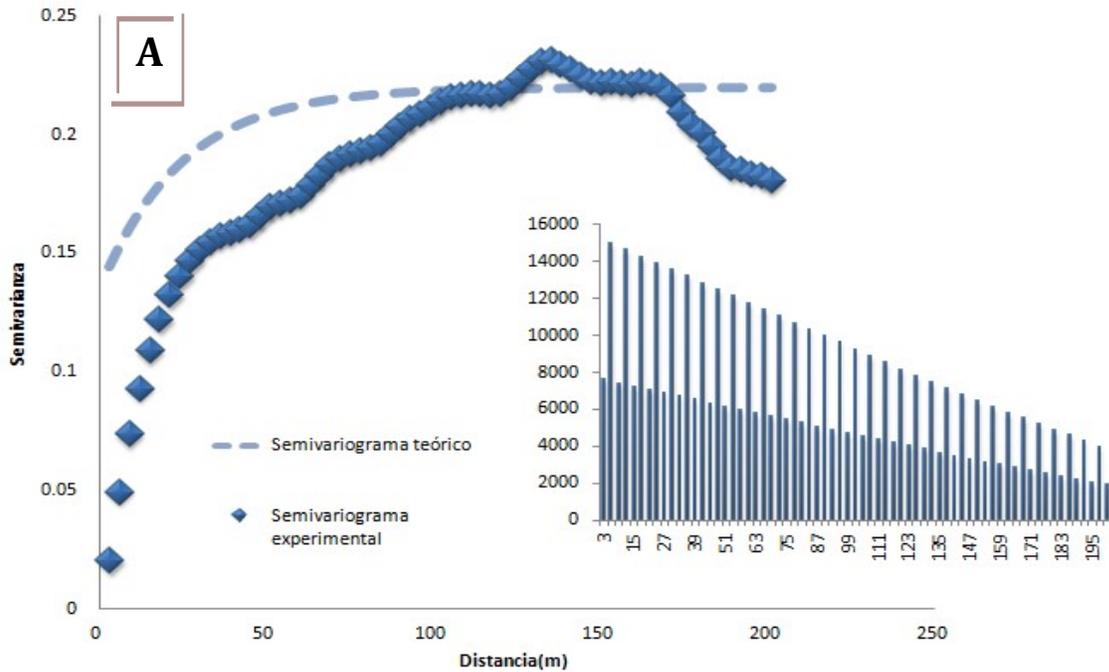


Figura IV.18. Variograma experimental y teórico ajustado vertical para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies D de la zona I.

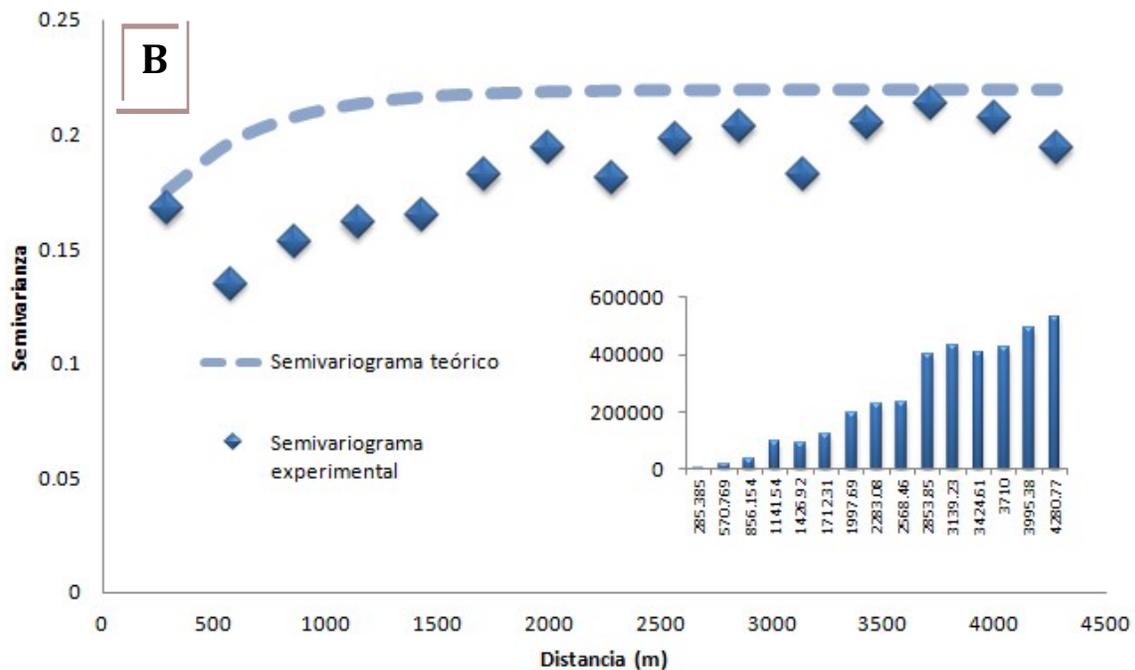


Figura IV.19. Variograma experimental y teórico ajustado horizontal para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies D de la zona I.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

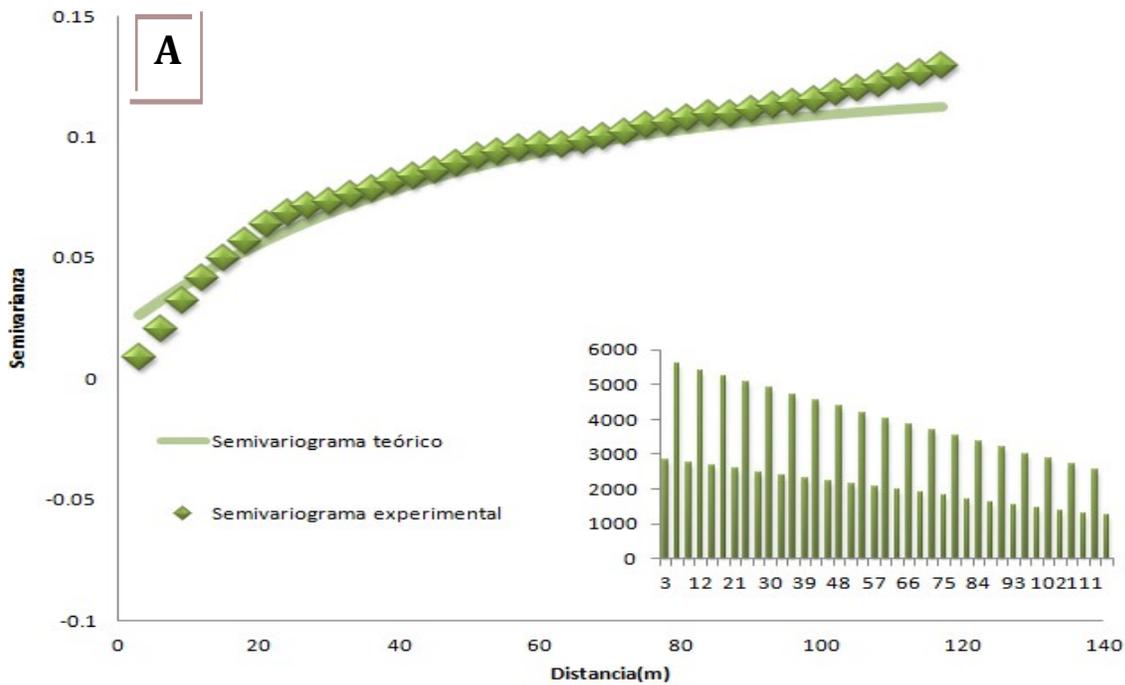


Figura IV .20.Variograma experimental y teórico ajustado vertical para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies A de la zona II.

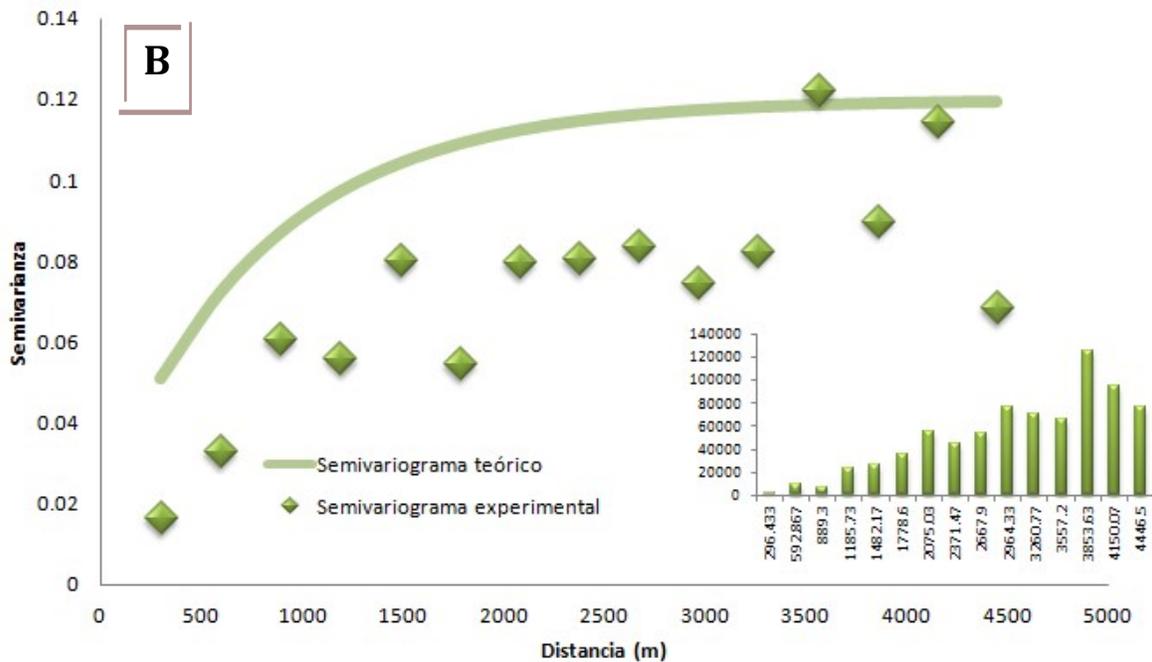


Figura IV.21.Variograma experimental y teórico ajustado horizontal para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies A de la zona II.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

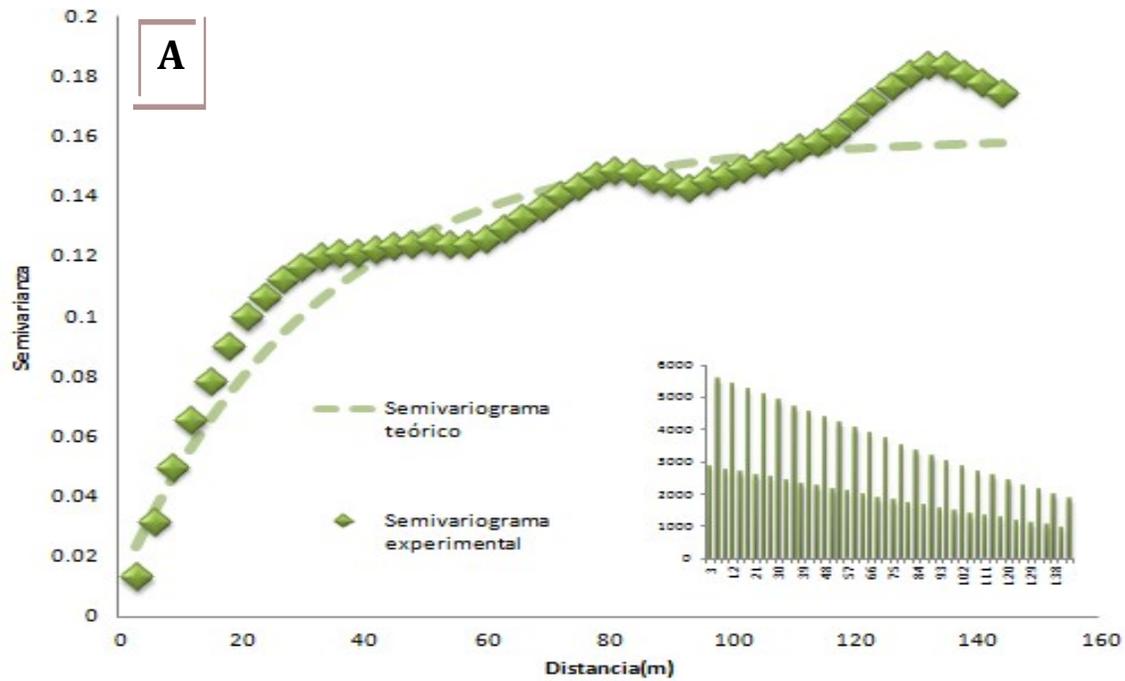


Figura IV.22. Variograma experimental y teórico ajustado vertical para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies B de la zona II.

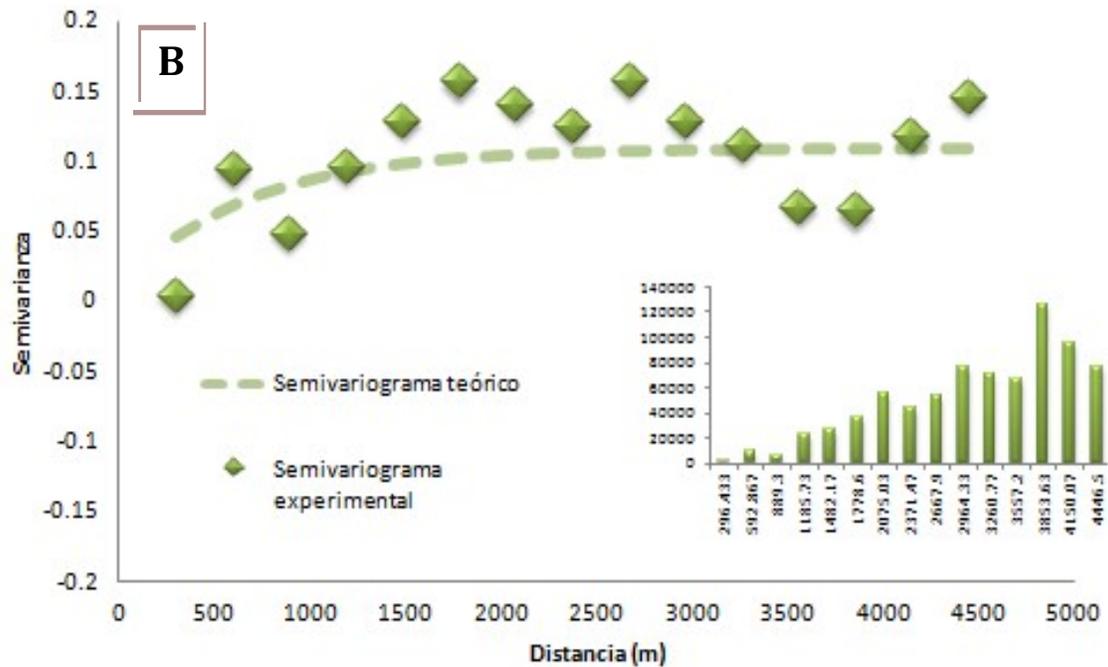


Figura IV.23. Variograma experimental y teórico ajustado horizontal para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies B de la zona II.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

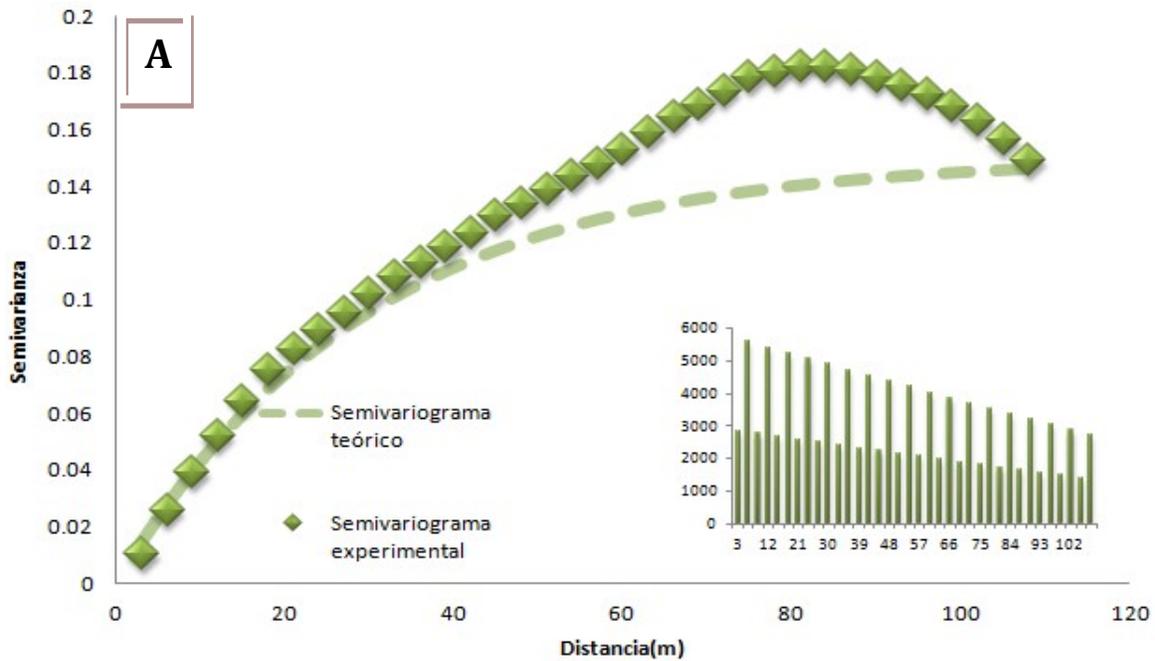


Figura IV.24. Variograma experimental y teórico ajustado vertical para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies C de la zona II.

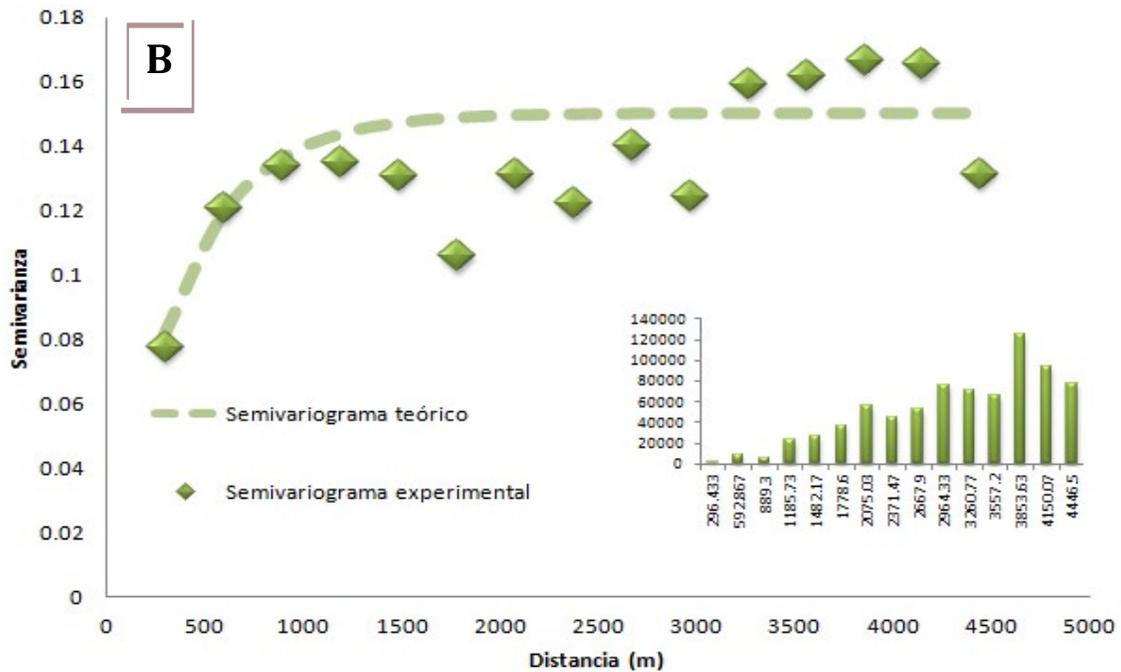


Figura IV.25. Variograma experimental y teórico ajustado horizontal para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies C de la zona II.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

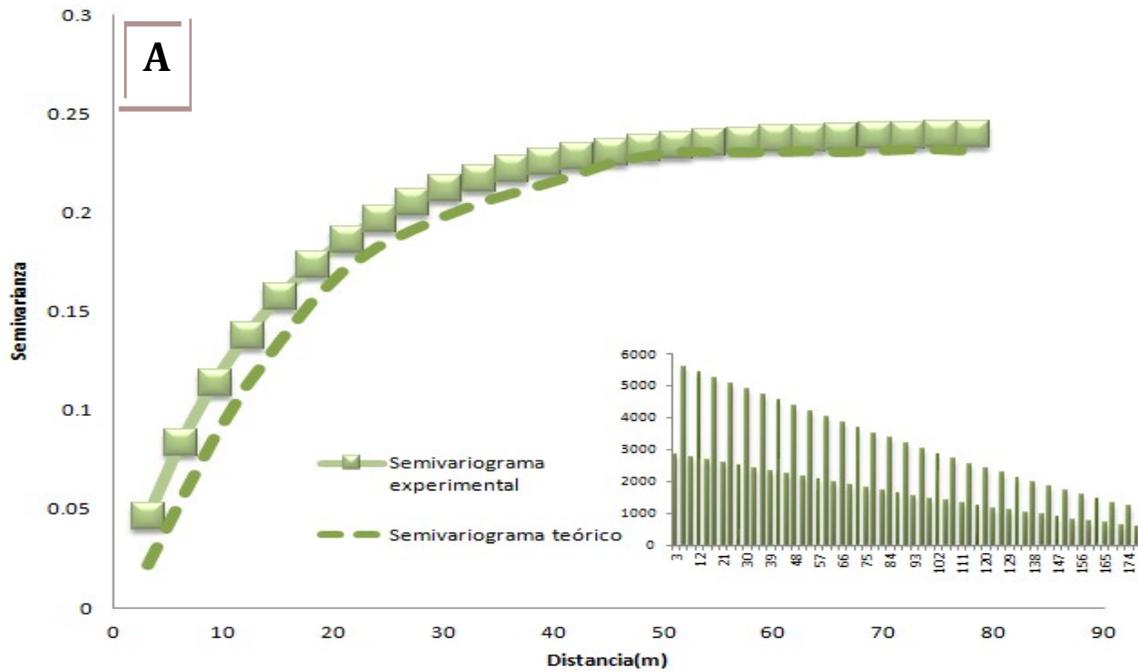


Figura IV.26. Variograma experimental y teórico ajustado vertical para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies D de la zona II.

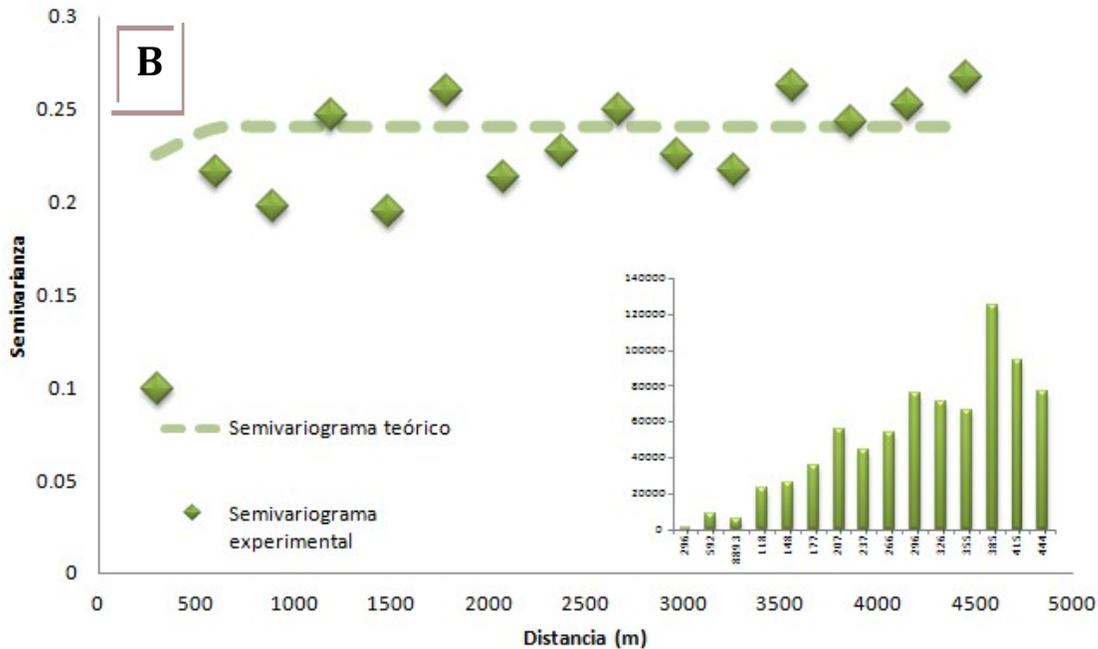


Figura IV.27. Variograma experimental y teórico ajustado horizontal para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies D de la zona II.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

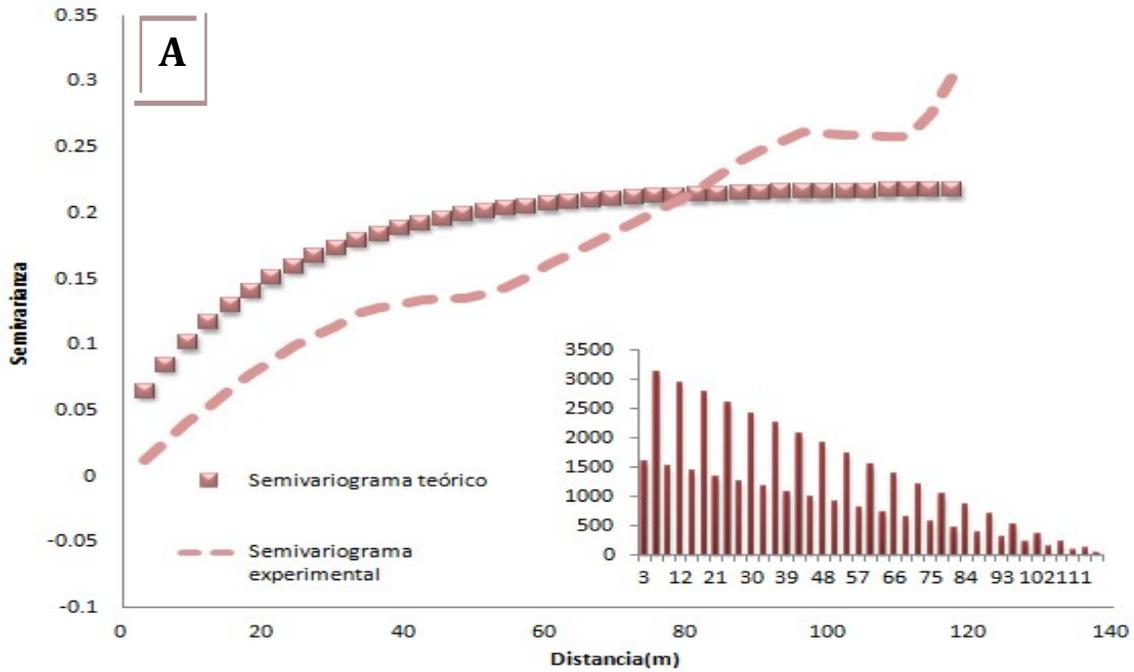


Figura IV.28. Variograma experimental y teórico ajustado vertical para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies A de la zona III.

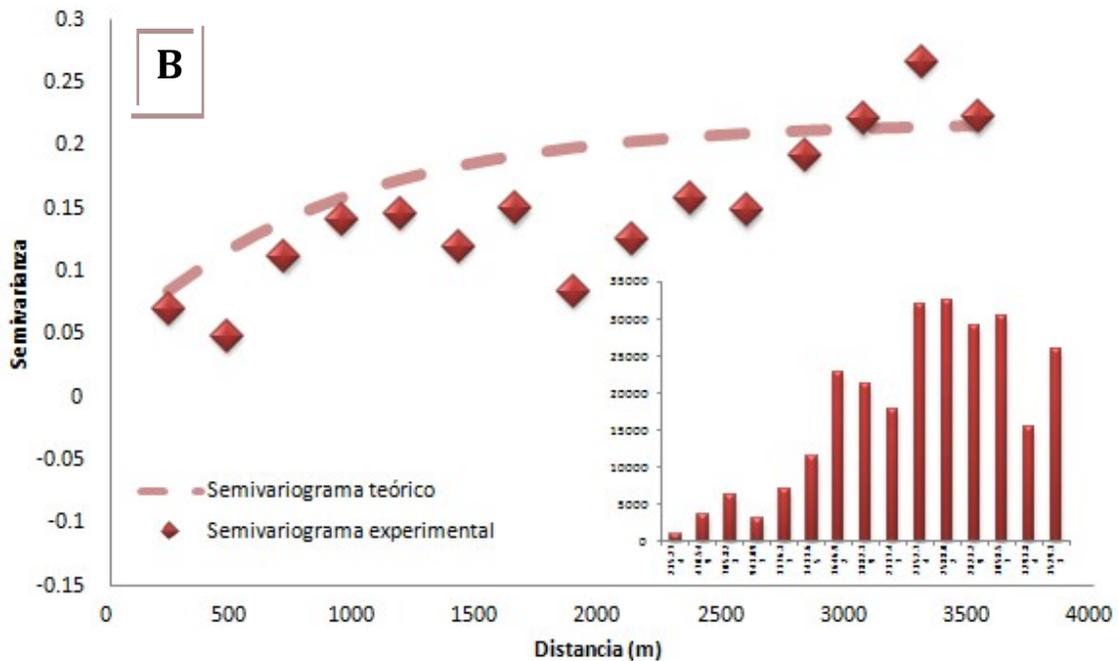


Figura IV.29. Variograma experimental y teórico ajustado horizontal para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies A de la zona III.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

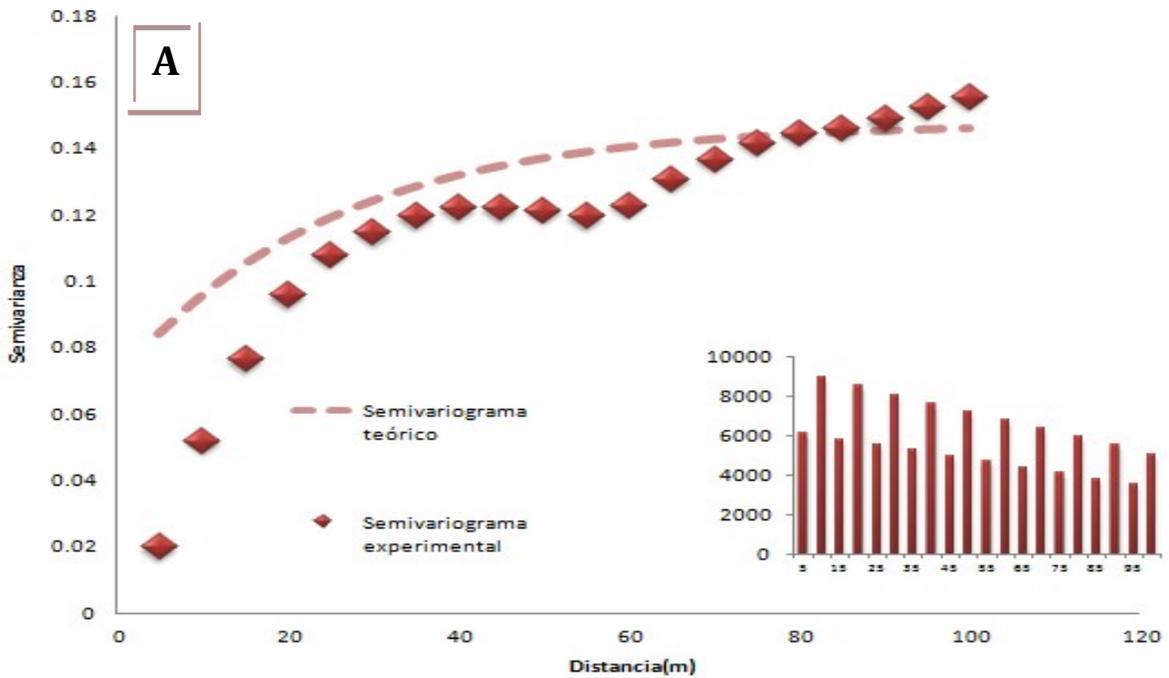


Figura IV.30. Variograma experimental y teórico ajustado vertical para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies B de la zona III.

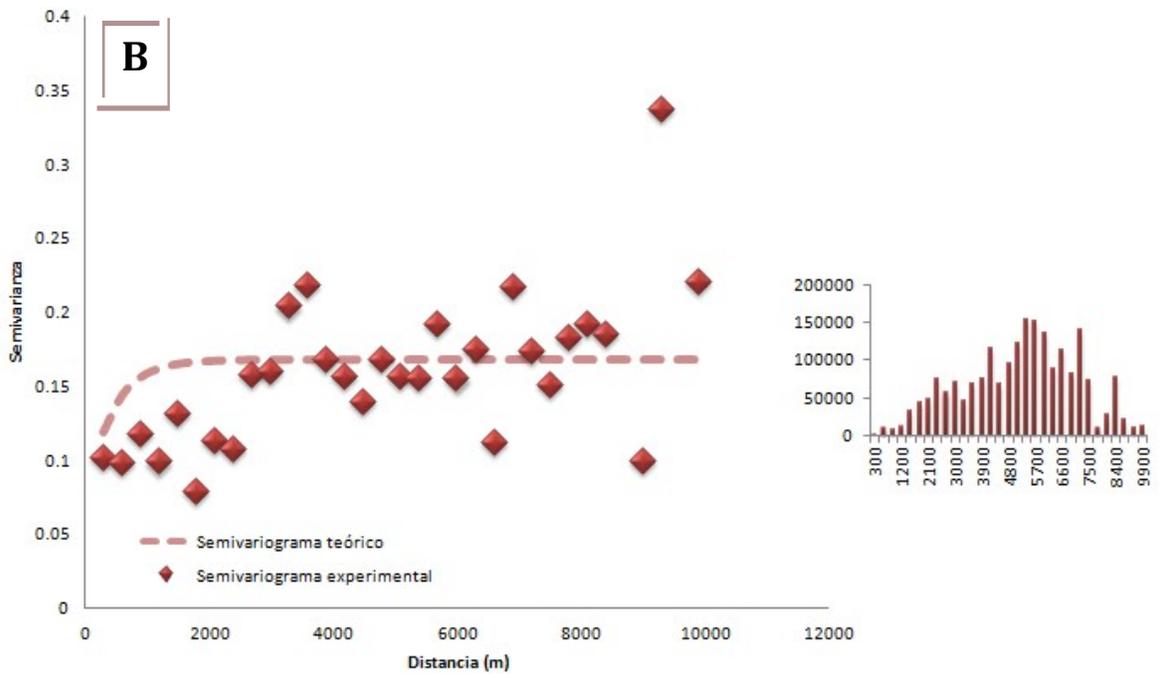


Figura IV.31. Variograma experimental y teórico ajustado horizontal para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies B de la zona III.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

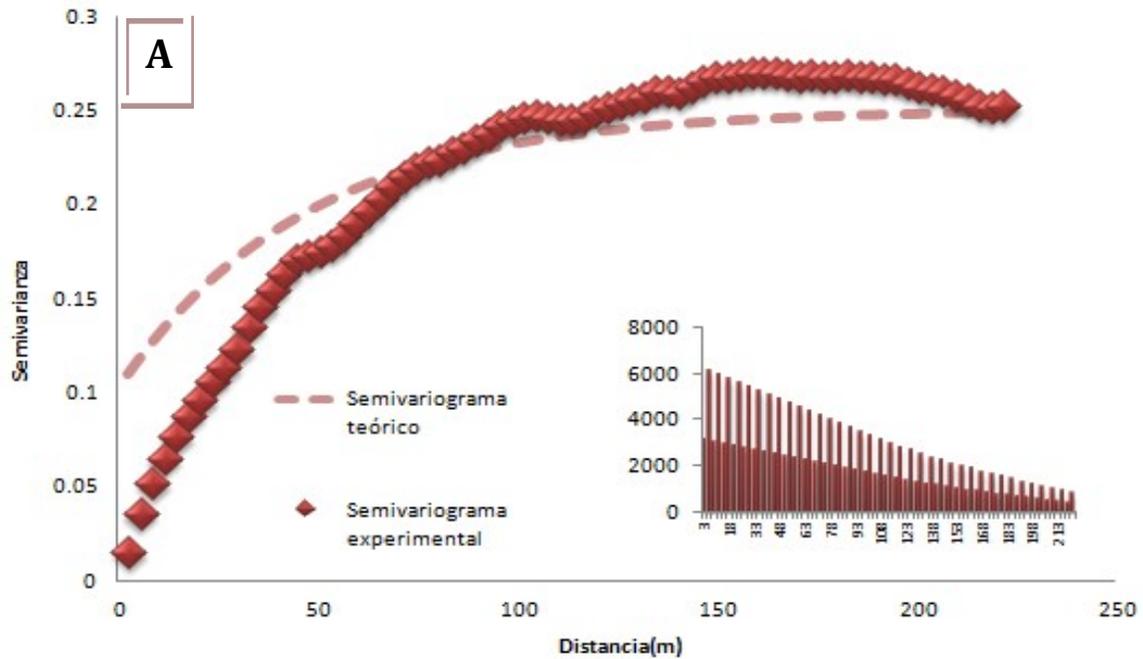


Figura IV.32.Variograma experimental y teórico ajustado vertical para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies C de la zona III.

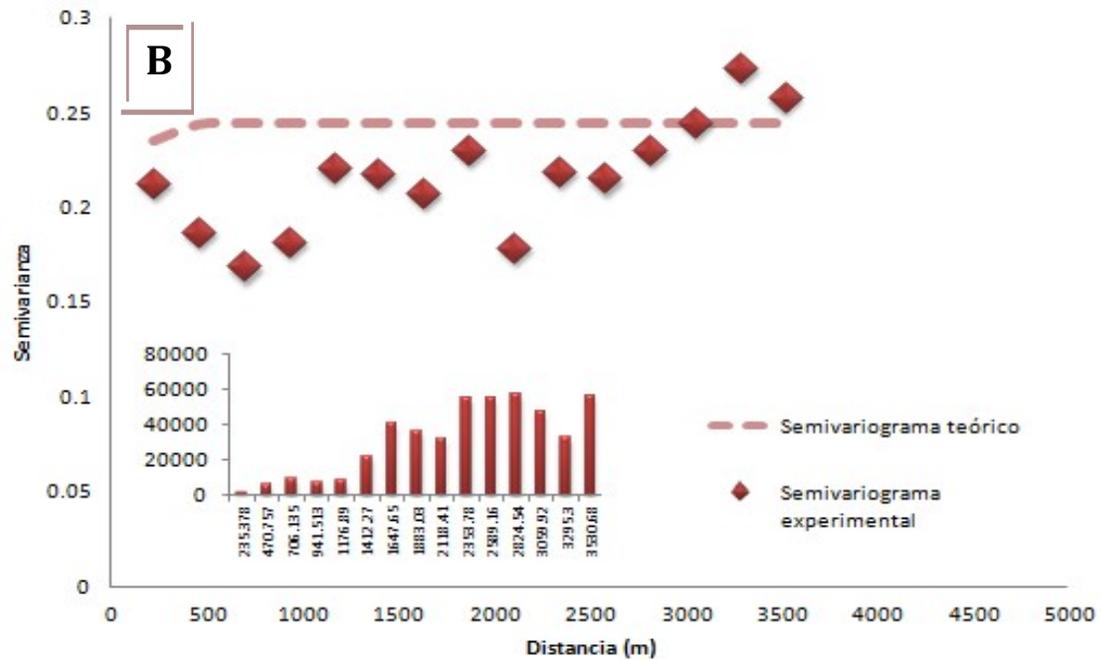


Figura IV.33.Variograma experimental y teórico ajustado horizontal para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies C de la zona III.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

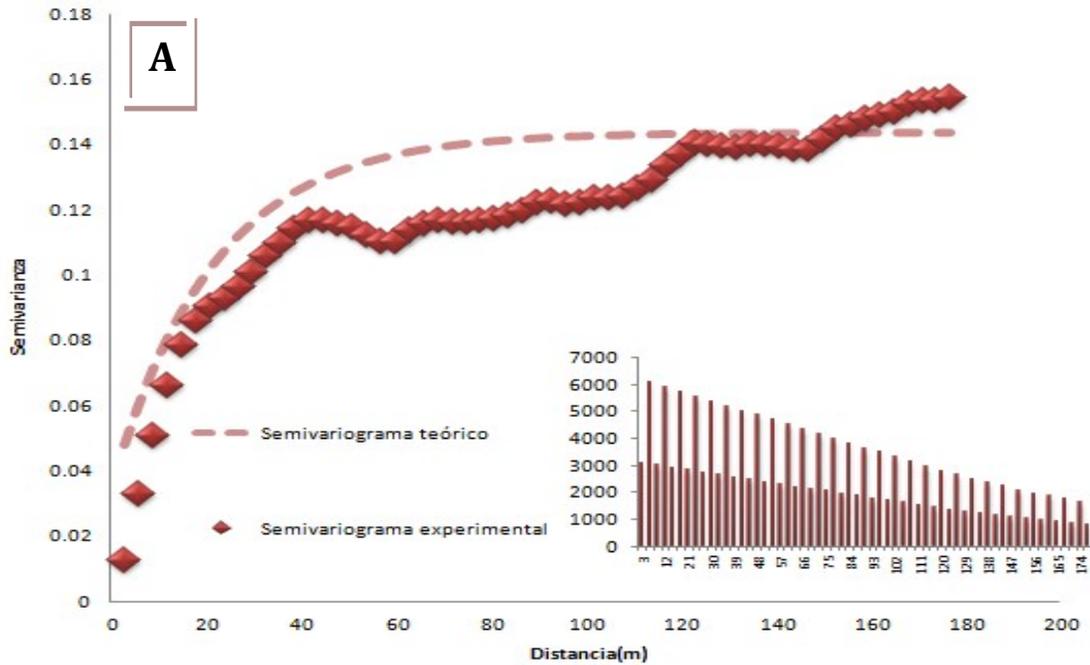


Figura IV.34. Variograma experimental y teórico ajustado vertical para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies D de la zona III.

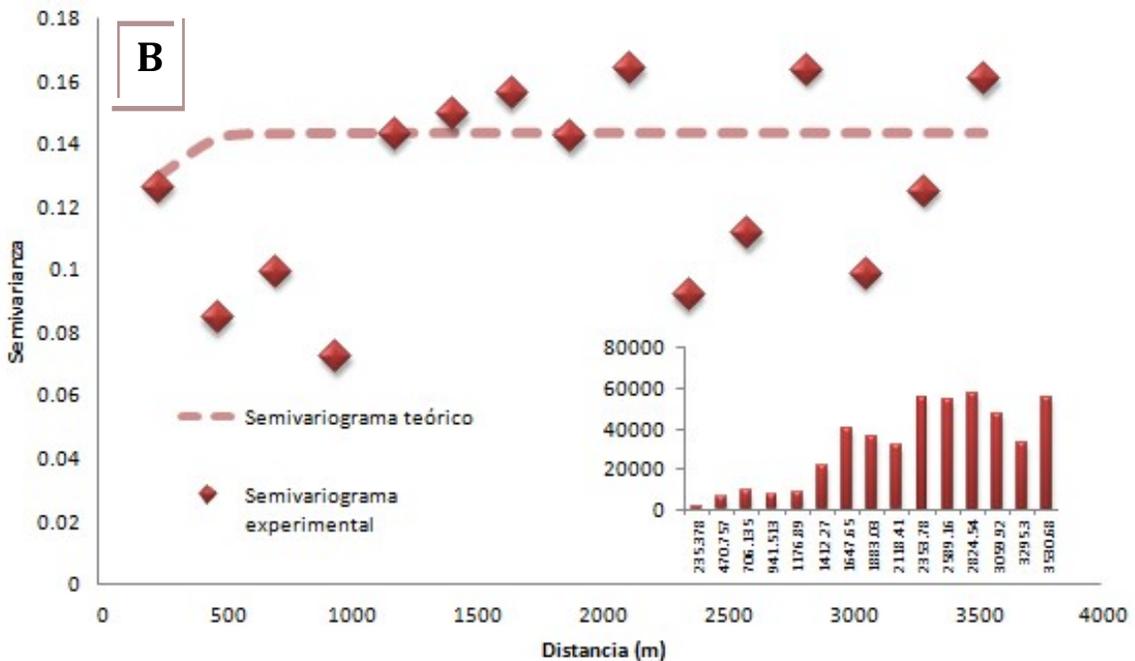


Figura IV.35. Variograma experimental y teórico ajustado horizontal para minimizar el error por medio de validación cruzada de la hidrofacies D de la zona III.

4.8. Modelos tridimensionales de las hidrofacies

Los modelos tridimensionales de las hidrofacies fueron obtenidos mediante los códigos *ik3d* y *sisim* de GSLIB (Deutsch y Journel, 1998). *Ik3d* implementa krigeado simple u ordinario de variables indicador categóricas. *Sisim* implementa un algoritmo de simulación secuencial indicador de variables categóricas y variables continuas categorizadas como variable indicador definidas a partir de una función acumulada de probabilidad.

De acuerdo que transformamos nuestros valores cualitativos de los registros litológicos a valor indicador de las hidrofacies se realizaron dos alternativas para obtener los modelos tridimensionales de las zonas I, II y III: (a) mediante krigeado indicador se obtiene un estimado “suavizado” de la probabilidad media a partir de los datos disponibles; el estimador es “suavizado” porque únicamente interpola entre mediciones y (b) por medio de simulación secuencial indicador condicionada, a partir de las que también se obtiene un estimado de la probabilidad media (promediando entre realizaciones) pero que genera mayor detalle en los espacios o porciones donde no hay datos debido a que usa las propiedades estadísticas de las hidrofacies .

El primer paso fue discretizar las zonas de interés. El área I se discretizó en 1,000,000 elementos cada uno de dimensiones 108.46m(x)*68.46m (y)*4.21m (z). El área II contiene 125,000 elementos con de dimensiones 229.31m(x)*136.18m (y)*6.96m (z) y el área III de igual manera que en la zona II contiene 125,000 elementos con de dimensiones 161.28m(x)*136.71m (y)*7.02m (z).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Con los parámetros geoestadísticos del modelo exponencial ajustado para cada hidrofacies y los datos del variable indicador de los pozos se puede estimar la probabilidad de que una hidrofacies esté presente en cada elemento del dominio.

Mediante el krigado indicador y las simulaciones secuenciales indicadores condicionados se estiman en cada punto cuatro valores de probabilidad de que la hidrofacies esté presente en ese punto. La regla para asignar una hidrofacies a cada punto se basa en los siguientes casos que se describen a continuación:

- 1) **Cuando la hidrofacies i tiene una probabilidad ($Prob(I_i)$) mayor que el resto de las hidrofacies, la hidrofacies asignada es i , esto es**

$$Prob(I_i) > Prob(I_j), \text{ para toda } j = A, \dots, D, j \neq i$$

$$I(x, y, z) = I_i$$

- 2) **Cuando las probabilidades de las hidrofacies A, B, C, D son iguales, existen cuatro posibilidades dependiendo de las proporciones con respecto a la profundidad Z_i .**

$$Prob(I_A) = Prob(I_B) = Prob(I_C) = Prob(I_D)$$

- a. **Cuando la proporción de la hidrofacies A reales $Prop(I_A)_R$ son mayores a las proporciones de la hidrofacies A simulados $Prop(I_A)_S$. La hidrofacies asignada es la A.**

$$Prop(I_A)_S < Prop(I_A)_R$$

$$I_{x,y,z} = I_A$$

- b. **Cuando la proporción de la hidrofacies B reales $Prop(I_B)_R$ son mayores a las proporciones de la hidrofacies B simulados $Prop(I_B)_S$. La hidrofacies asignada es la B.**

$$Prop(I_B)_S < Prop(I_B)_R$$

$$I_{x,y,z} = I_B$$

- c. **Cuando la proporción de la hidrofacies C reales $Prop(I_C)_R$ son mayores a las proporciones de la hidrofacies C simulados $Prop(I_C)_S$. La hidrofacies asignada es la C.**

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

$$\mathbf{Prop}(I_C)_S < \mathbf{Prop}(I_C)_R$$

$$I_{x,y,z} = I_C$$

- d. **Cuando la proporción de la hidrofacies D reales $\mathbf{Prop}(I_D)_R$ son mayores a las proporciones de la hidrofacies D simulados $\mathbf{Prop}(I_D)_S$.**

$$\mathbf{Prop}(I_D)_S < \mathbf{Prop}(I_D)_R$$

$$I_{x,y,z} = I_D$$

Modelo tridimensional de las hidrofacies Zona I

Modelo tridimensional de las hidrofacies krigeado Indicador

El modelo tridimensional de las hidrofacies a partir del krigeado indicador se muestra en las figuras IV.37a y IV.37b se denota la continuidad de la hidrofacies A en la porción superficial, mientras que las hidrofacies B se mezcla con las hidrofacies D y C. Las hidrofacies C se concentra en la porción oriental de la zona. Las definiciones de las fronteras entre cada uno son totalmente planas y cuadradas. En cuanto a las proporciones en las figuras IV.36A y IV.36B muestra el comportamiento de las proporciones reales y los simulados por el krigeado indicador de las hidrofacies en tabla IV.10.

Modelo tridimensional de las hidrofacies obtenido de simulación secuencial indicador condicionada

Para este caso, se generaron 1,000 realizaciones de cada hidrofacies y se calculó el promedio para cada punto; este promedio representa la probabilidad condicional de que la hidrofacies *i* ocurra en ese punto. La asignación de la hidrofacies corresponde al mayor número de repeticiones de las hidrofacies por punto y la conservación de las proporciones de las hidrofacies. En la figura IV.38a y IV.38b

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

se muestra el modelo tridimensional de las mismas, las hidrofacies conservan una distribución similar a la obtenida del kriging indicador, pero mostrando unas fronteras más realistas de cómo puede comportarse sedimentos aluviales y las rocas volcánicas en la zona I.

La hidrofacies A presenta continuidad en la porción superior del modelo interrumpido en algunas zonas pequeñas, mientras que la hidrofacies B envuelve a las hidrofacies D y C. Las hidrofacies C se localiza en la porción oriental dando un pequeña formación que es rodeada por las hidrofacies B y D.

Las hidrofacies D muestran el contacto directo con la hidrofacies A y C, y en menor proporción con la hidrofacies B en la parte superior. En la porción inferior de la zona hay contacto irregular inferior con la hidrofacies B.

En la tabla IV.10 se logra visualizar los valores promedio de las proporciones de la zona I con el kriging indicador y las simulaciones secuenciales indicador condicionada y en la tabla IV.11 los errores medio cuadráticos de las proporciones de las hidrofacies A, B, C y D, entre los valores de las proporciones estimadas y los valores de las proporciones reales con relación a la profundidad.

Proporciones (%)	<i>Hidrofacies A</i>	<i>Hidrofacies B</i>	<i>Hidrofacies C</i>	<i>Hidrofacies D</i>
<i>Reales</i>	15.462	43.137	9.976	31.426
<i>Kriging Indicador</i>	17.120	43.244	7.733	31.903
<i>Simulación Secuencial Indicador Condicionada</i>	16.941	41.839	7.890	33.330

Tabla IV.10. Valores de las proporciones promedio calculadas de las hidrofacies A, B, C y D de la zona I.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una
porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Error Medio Cuadrático (EMC)	<i>Hidrofacies A</i>	<i>Hidrofacies B</i>	<i>Hidrofacies C</i>	<i>Hidrofacies D</i>
<i>Krigeado Indicador</i>	0.05520	0.05914	0.01459	0.02904
<i>Simulación Secuencial Indicador Condicionada</i>	0.09146	0.09391	0.01190	0.06024

Tabla IV.11. Valores de Error Medio cuadrático de las proporciones de las hidrofacies A, B, C y D de la zona I.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

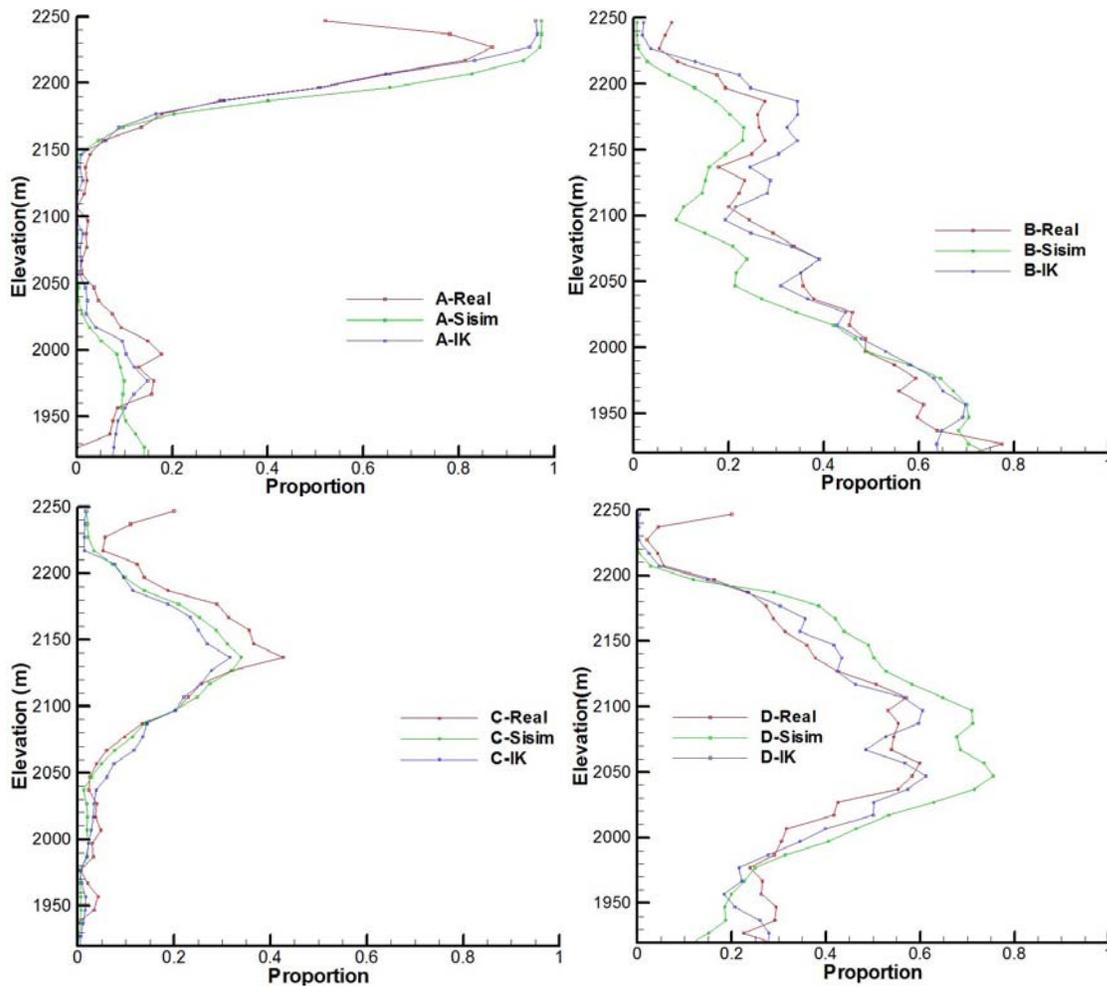


Figura IV.36. Proporciones de las hidrofacies de la Zona I de las hidrofacies A, B, C y D, proporciones reales (rojo), proporciones de la simulación secuencial indicador condicionada (verde) y proporciones del krigado indicador (azul).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

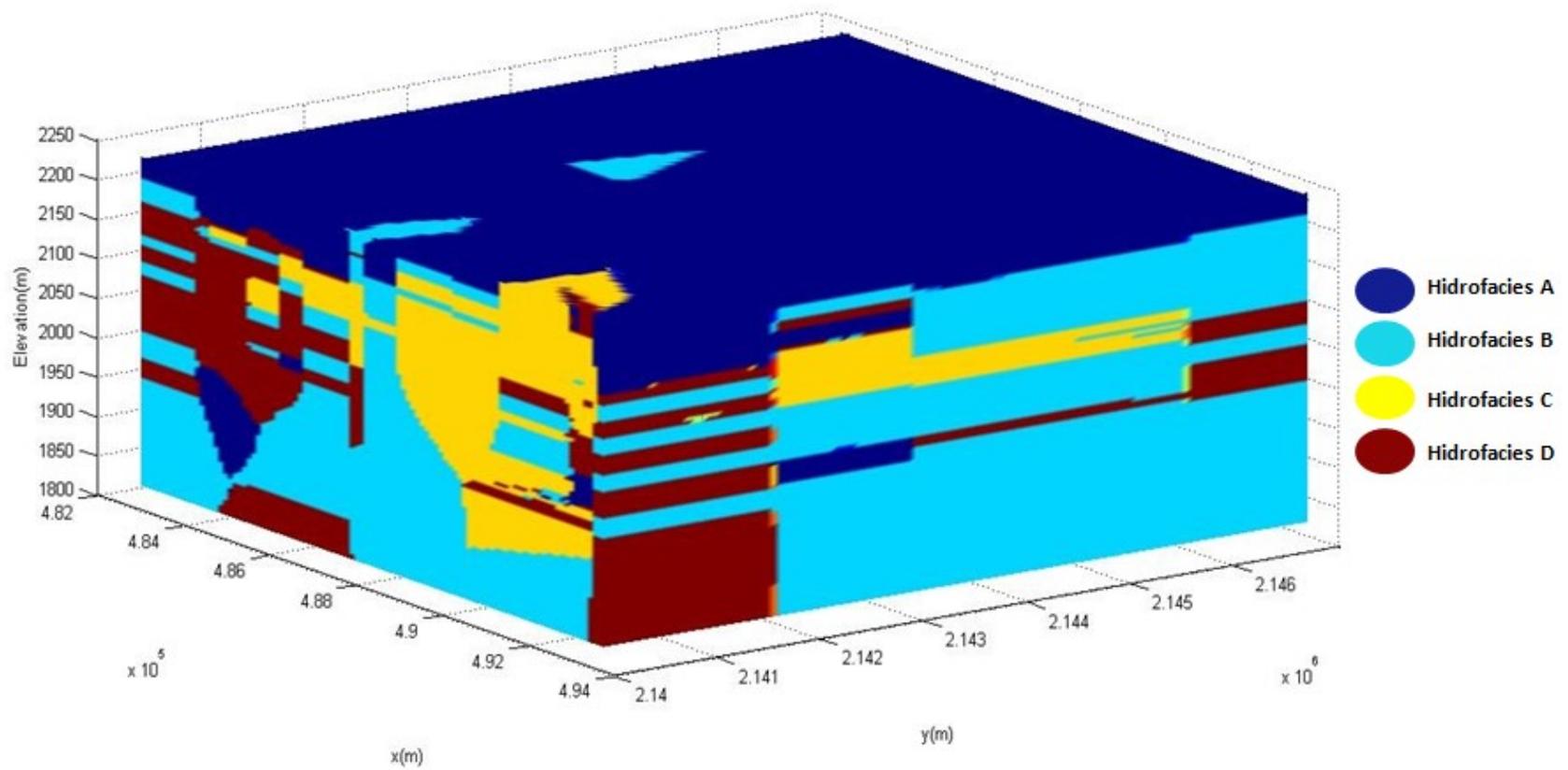


Figura IV.37a. Modelo tridimensional de las hidrofacies a partir del krigeado Indicador de la zona I.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

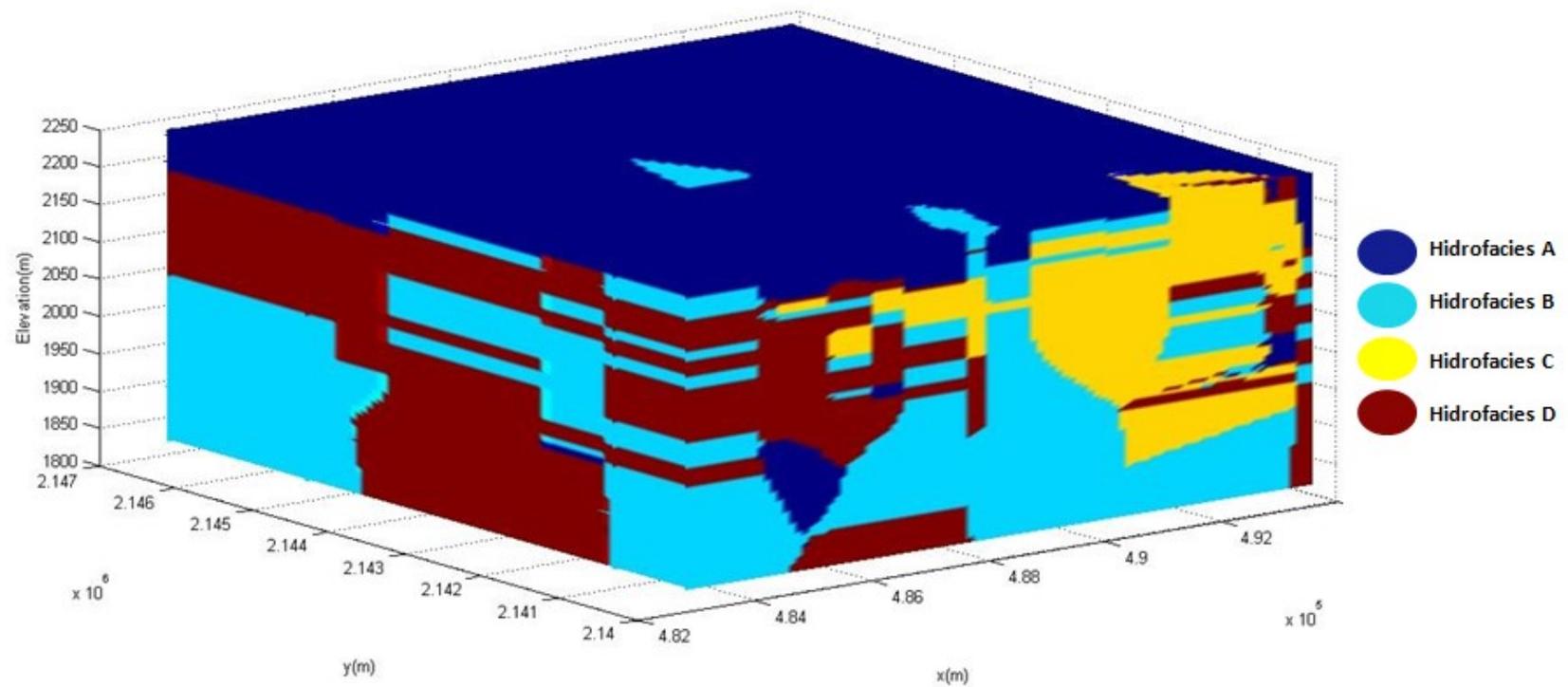


Figura IV.37b. Vista desde otro ángulo del modelo tridimensional de las hidrofacies a partir del krigeado Indicador de la zona I.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

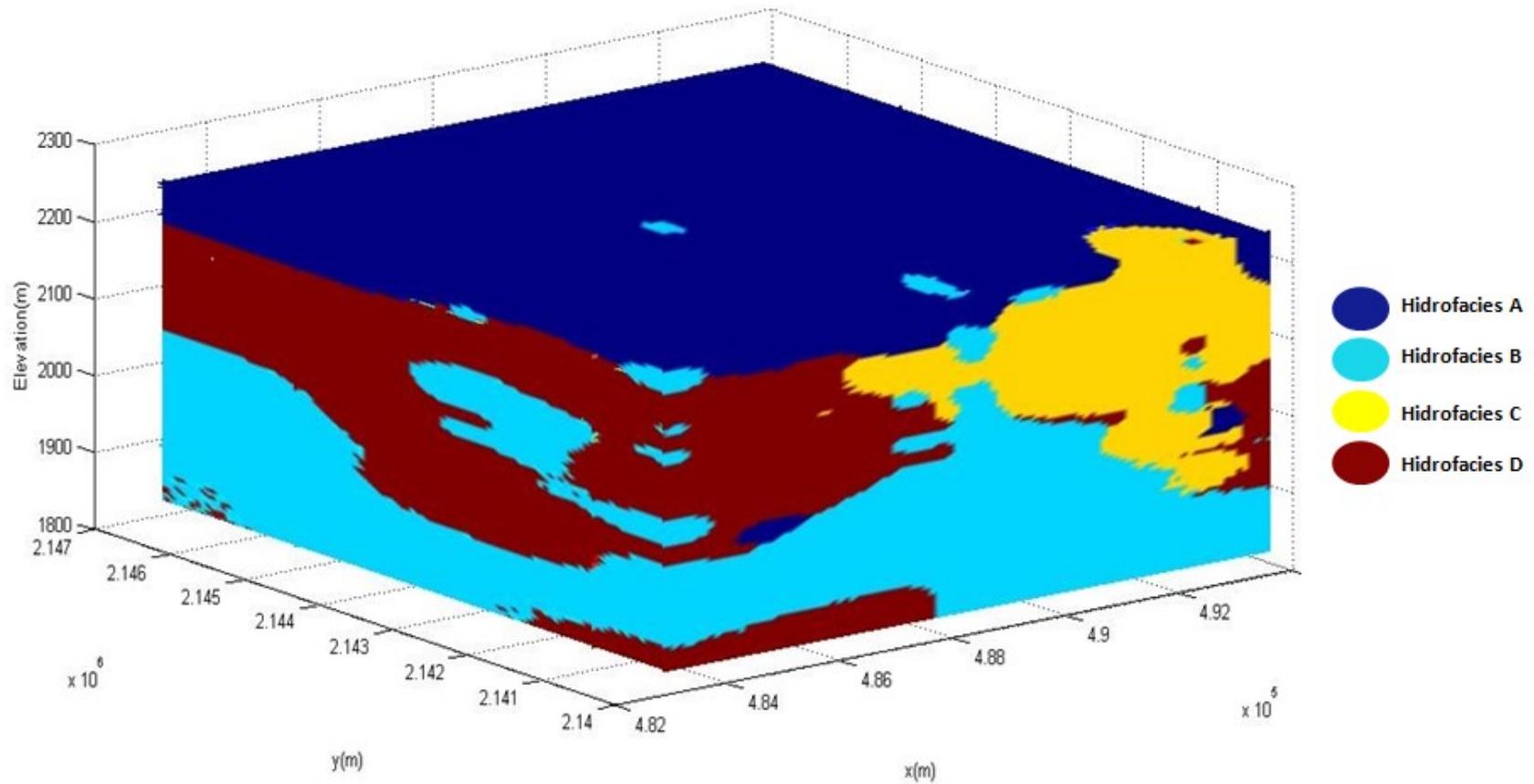


Figura IV.38a. Modelo tridimensional de las hidrofacies a partir de las simulaciones secuencial indicador condicionada de la zona I (1000 realizaciones).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

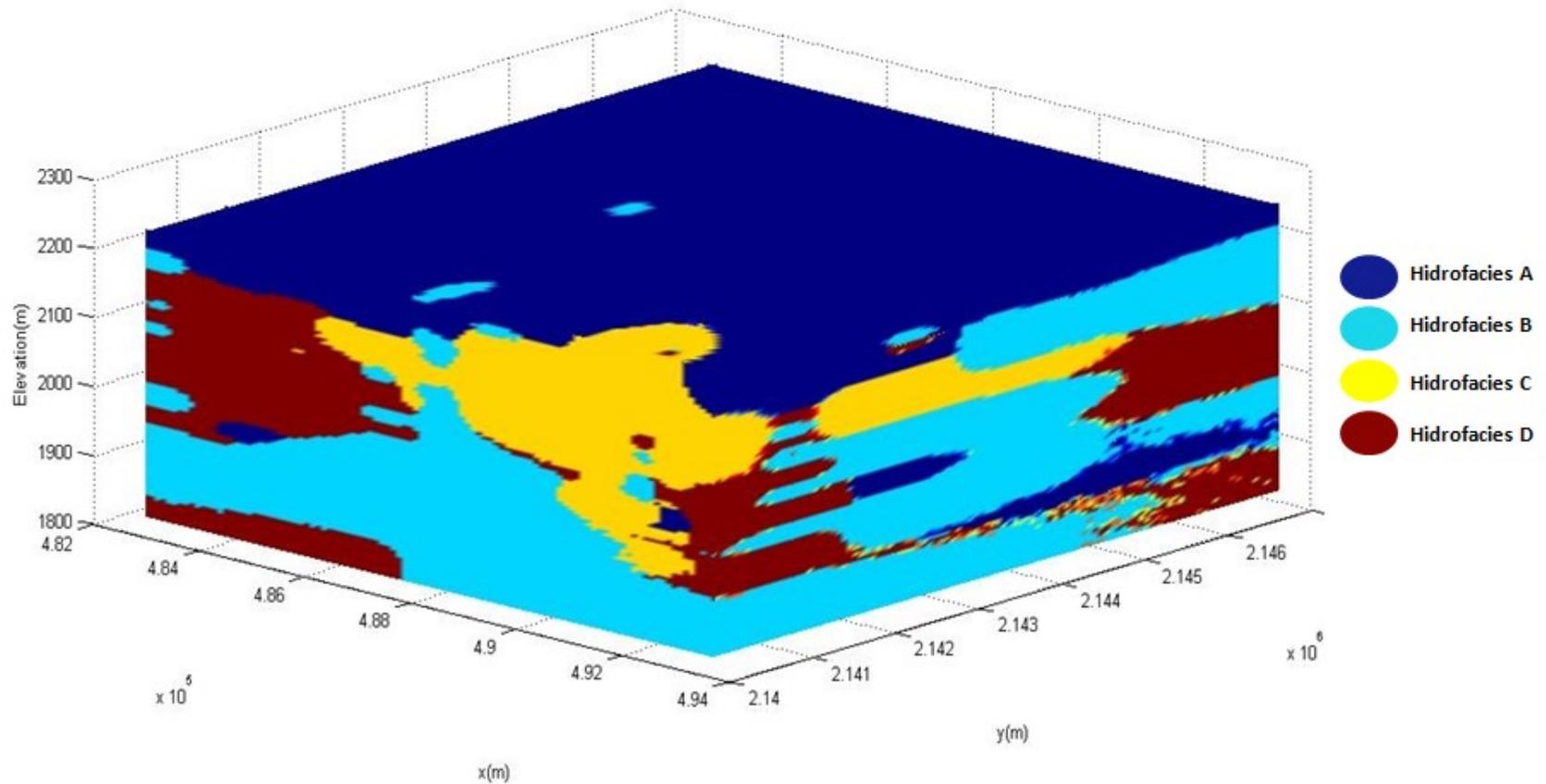


Figura IV.38b. Vista desde otro ángulo del Modelo tridimensional de las hidrofacies a partir de las simulaciones secuencial indicador condicionada de la zona I (1000 realizaciones).

Modelo tridimensional de las hidrofacies Zona II

Modelo tridimensional de las hidrofacies krigeado Indicador

Con la misma metodología se obtuvo el modelo tridimensional de las hidrofacies de la zona II, se muestra en las figuras IV.40a donde se observa la continuidad de la hidrofacies A y las intercalaciones a profundidad de las hidrofacies B, C y D.

Las hidrofacies D en la porción suroeste presentan una continuidad a profundidad hasta la superficie pero con poca extensión en la horizontal. Con intercalaciones de hidrofacies C e hidrofacies B. El comportamiento de las proporciones se conservan en ciertos intervalos las proporciones, pero siendo la hidrofacies D con mayor error dado que esta su proporción en los intervalos del 1950m al 2100 m aumenta y disminuye con del 40% al 60% y las estimaciones varían del 45% al 55%. En el intervalo de 1950m al 2100m las hidrofacies C, su proporción es casi cero y en la estimación se obtiene del 20% en este intervalo. En la tabla IV.12 se reportan las proporciones reales y las estimadas por el krigeado indicador, las hidrofacies A es casi el 50% sobreestimada, la hidrofacies B es subestimada un 30%, la hidrofacies B es sobreestimada en mayor al 50% y la hidrofacies D subestima en 15% (figura IV.39b)

Modelo tridimensional de las hidrofacies obtenido de simulación secuencial indicador condicionada

En las figuras IV.40b y IV.40c se muestra dos figuras de las simulaciones con cincuenta realizaciones y mil realizaciones; en donde la figura IV.40c se encuentra la mejor definición de las fronteras entre las hidrofacies con mayor realizaciones; la hidrofacies A se intercala con todas las hidrofacies pero predominando en la superficie, la hidrofacies B tiene una distribución constreñida a lentes intercalados con la hidrofacies C, A y D. La hidrofacies C se localiza en

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

zonas localizadas sin extensión alguna de continuidad. Las hidrofacies D se muestran más definidas en las fronteras.

Proporciones (%)	Hidrofacies A	Hidrofacies B	Hidrofacies C	Hidrofacies D
<i>Reales</i>	12.802	23.686	14.909	48.603
<i>Krigeado Indicador</i>	18.450	16.852	22.740	41.958
<i>Simulación Secuencial Indicador Condicionada</i>	18.880	12.621	19.215	49.284

Tabla IV.12. Valores de las proporciones promedio calculadas de las hidrofacies A, B, C y D de la zona II.

Error Medio Cuadrático (EMC)	Hidrofacies A	Hidrofacies B	Hidrofacies C	Hidrofacies D
<i>Krigeado Indicador</i>	0.07965	0.01839	0.01750	0.04235
<i>Simulación Secuencial Indicador Condicionada</i>	0.13948	0.02152	0.01778	0.05473

Tabla IV.13. Valores de Error Medio cuadrático de las proporciones de las hidrofacies A, B, C y D de la zona II.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

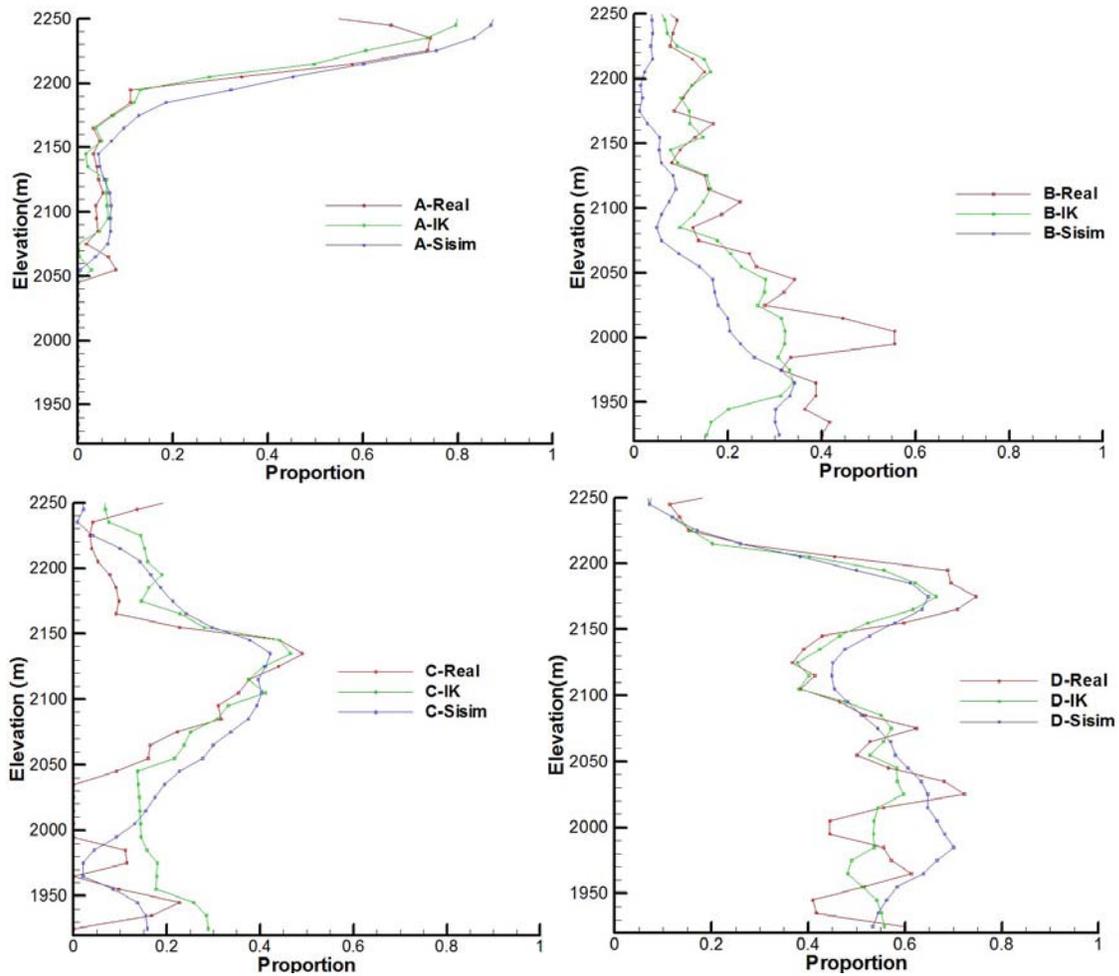


Figura IV.39. Proporciones de las hidrofacies de la Zona II de las hidrofacies A, B, C y D, proporciones reales (rojo), proporciones de la simulación secuencial indicador condicionada (azul) y proporciones del krigado indicador (verde).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

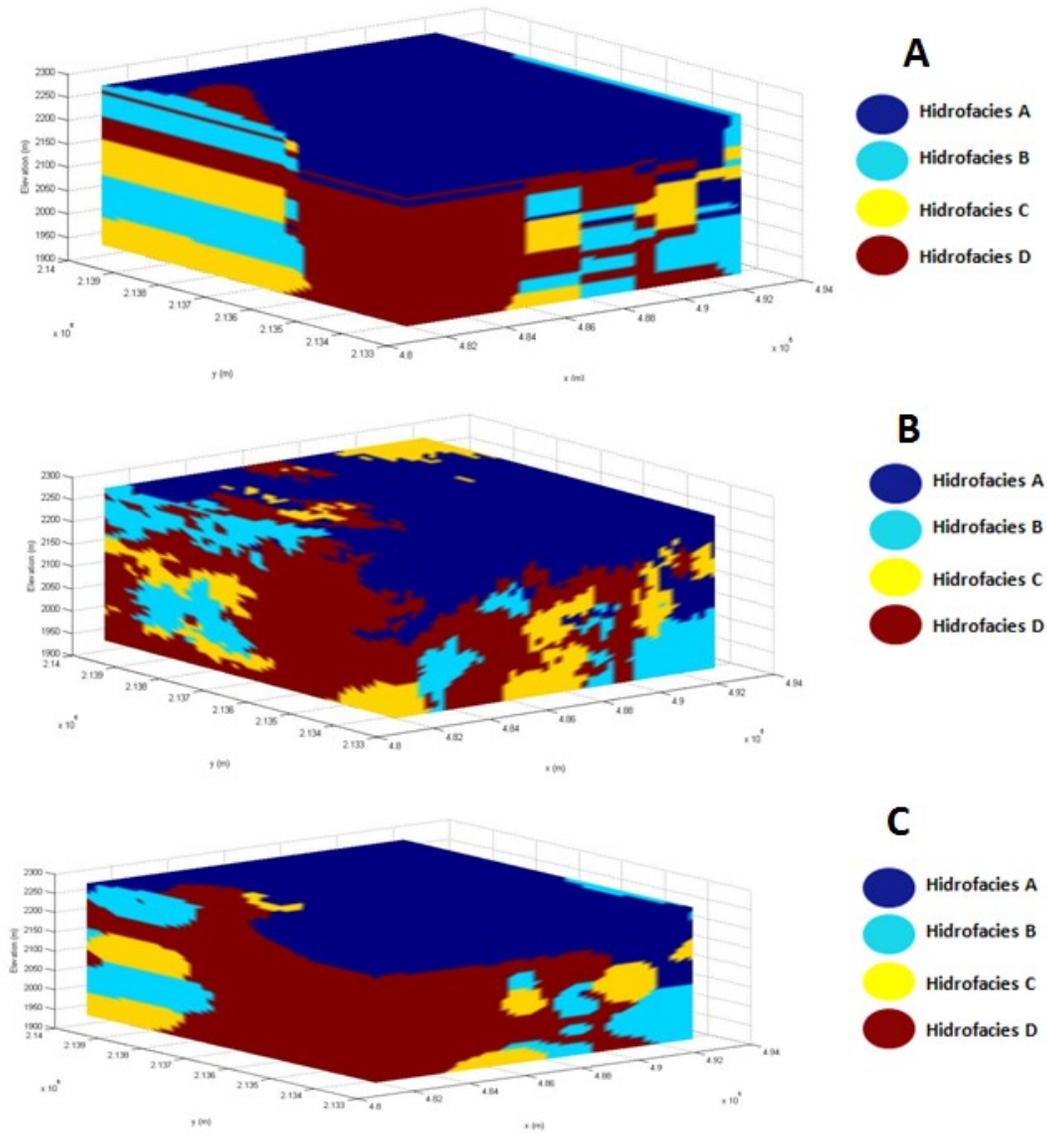


Figura IV.40. Modelo tridimensional de las hidrofacies de la zona II. A) Krigeado Indicador, B) Simulación Secuencial Indicador Condicionada (promedio de 50 realizaciones) y C) Simulación Secuencial Indicador Condicionada (promedio de 1000 realizaciones) Hidrofacies A (Azul rey), Hidrofacies B (Azul claro), Hidrofacies C (Amarillo) e Hidrofacies D(Rojo).

Modelo tridimensional de las hidrofacies Zona III

Modelo tridimensional de las hidrofacies krigeado Indicador

El modelo con peor definición es de la zona III, debido a la pocos datos obtenidos de la misma y lo tan dispersos que no permitieron obtener una configuración de las hidrofacies adecuadas para que represente una posible distribución de las mismas (figura IV.42). La proporción en este caso es pobre ya que subestima y sobreestima proporciones de las hidrofacies y los valores reales, valores estimados contra la profundidad (figura IV.41a).

Modelo tridimensional de las hidrofacies obtenido de simulación secuencial indicador condicionada

Para mejorar la estimar la distribución de las hidrofacies y tratar de conservar las proporciones se realizaron simulaciones secuencial indicador condicionada que nos permitirá definir mejor la distribución y fronteras de las mismas. En las figuras IV.42 y IV.43 con una realización se muestra una mejora en la definición de las hidrofacies. La hidrofacies A predomina en la posición superficial, la distribución de la hidrofacies B se restringe en pequeños lentes que están rodeados por la hidrofacies C, y la hidrofacies D se definen como lentes de grandes extensiones en porciones superficiales y a profundidad pero con poca ocurrencia y la hidrofacies C se encuentra rodeando a la hidrofacies D.

Con 1000 realizaciones de la simulación, las distribuciones de la hidrofacies C en la parte superior es con la hidrofacies A el contacto inferior con la hidrofacies B principalmente. La hidrofacies D, se encuentra como lentes dentro de las hidrofacies B.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Proporciones (%)	<i>Hidrofacies A</i>	<i>Hidrofacies B</i>	<i>Hidrofacies C</i>	<i>Hidrofacies D</i>
<i>Reales</i>	19.619	23.555	39.519	17.306
<i>Krigeado Indicador</i>	20.436	22.582	32.601	24.381
<i>Simulación Secuencial Indicador Condicionada</i>	26.673	15.993	44.816	15.234

Tabla IV.14. Valores de las proporciones promedio calculadas de las hidrofacies A, B, C y D de la zona III.

Error Medio Cuadrático (EMC)	<i>Hidrofacies A</i>	<i>Hidrofacies B</i>	<i>Hidrofacies C</i>	<i>Hidrofacies D</i>
<i>Krigeado Indicador</i>	0.06112	0.03911	0.04312	0.01039
<i>Simulación Secuencial Indicador Condicionada</i>	0.12214	0.03943	0.14400	0.02299

Tabla IV.15. Valores de Error Medio cuadrático de las proporciones de las hidrofacies A, B, C y D de la zona III.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

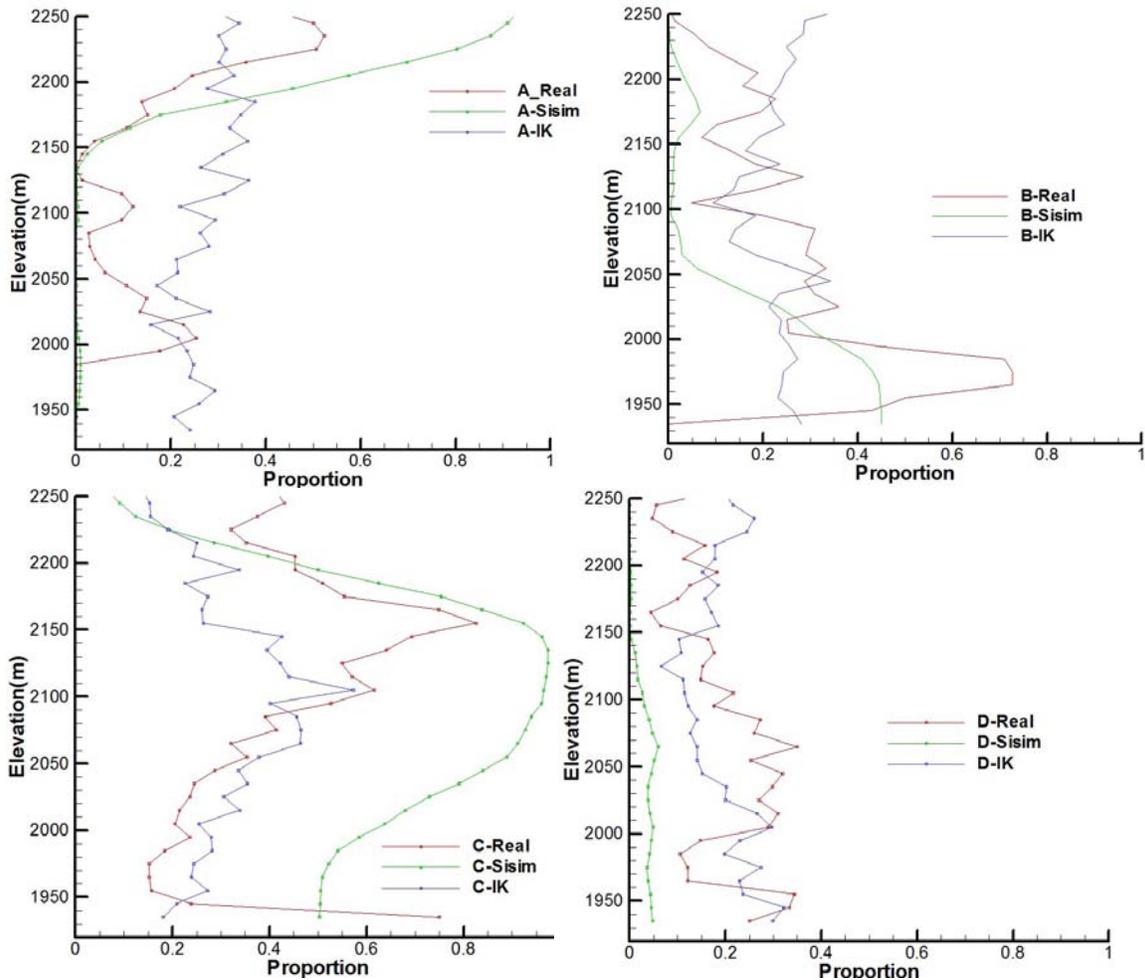


Figura IV.41. Proporciones de las hidrofacies de la Zona II de las hidrofacies A, B, C y D, proporciones reales (rojo), proporciones de la simulación secuencial indicador condicionada (azul) y proporciones del krigado indicador (verde).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

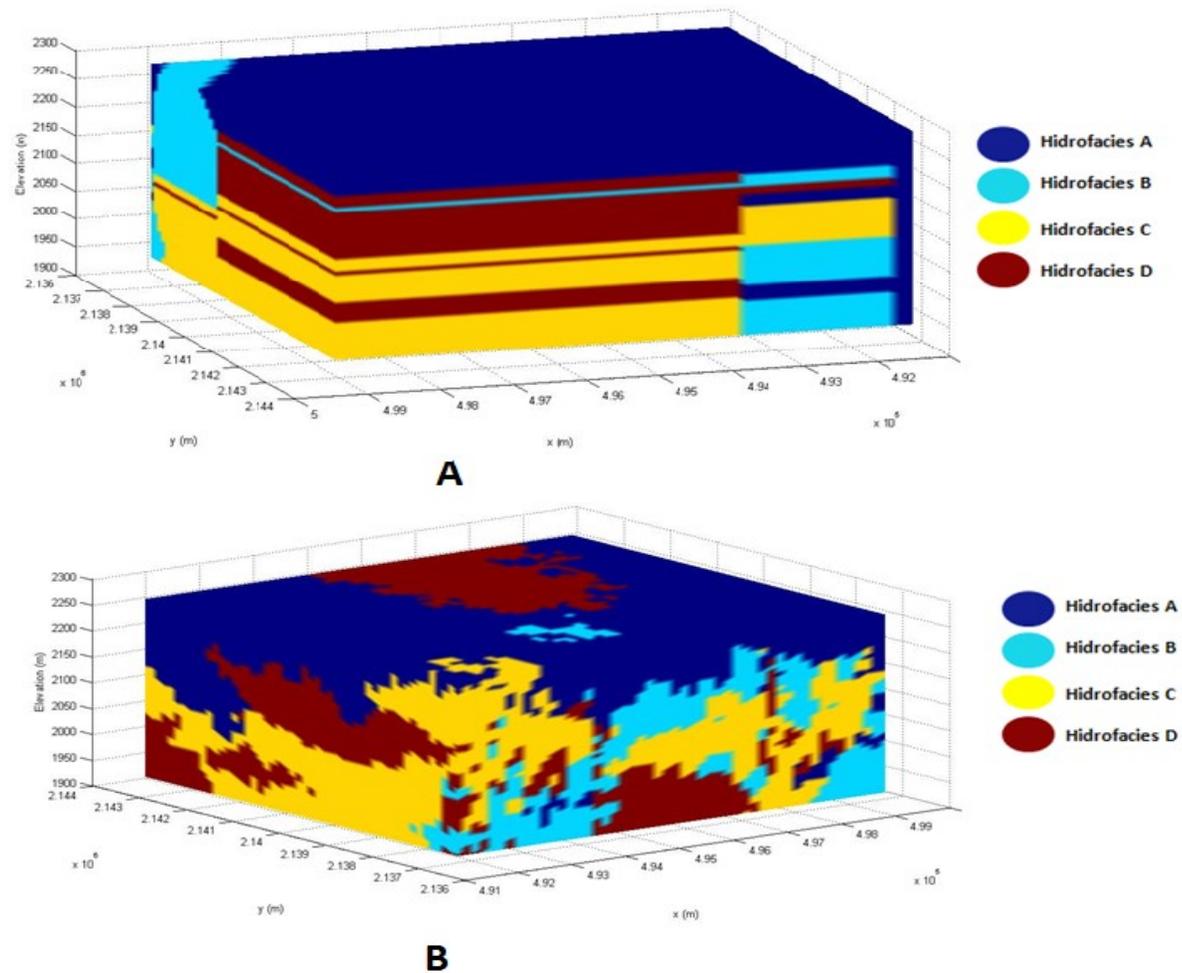


Figura IV.42. Modelo tridimensional de las hidrofacies de la zona III. (De arriba hacia abajo, Krigeado Indicador, Simulación Secuencial Indicador Condicionada (1 realización) Hidrofacies A (Azul rey), Hidrofacies B (Azul claro), Hidrofacies C (Amarillo) e Hidrofacies D (Rojo).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

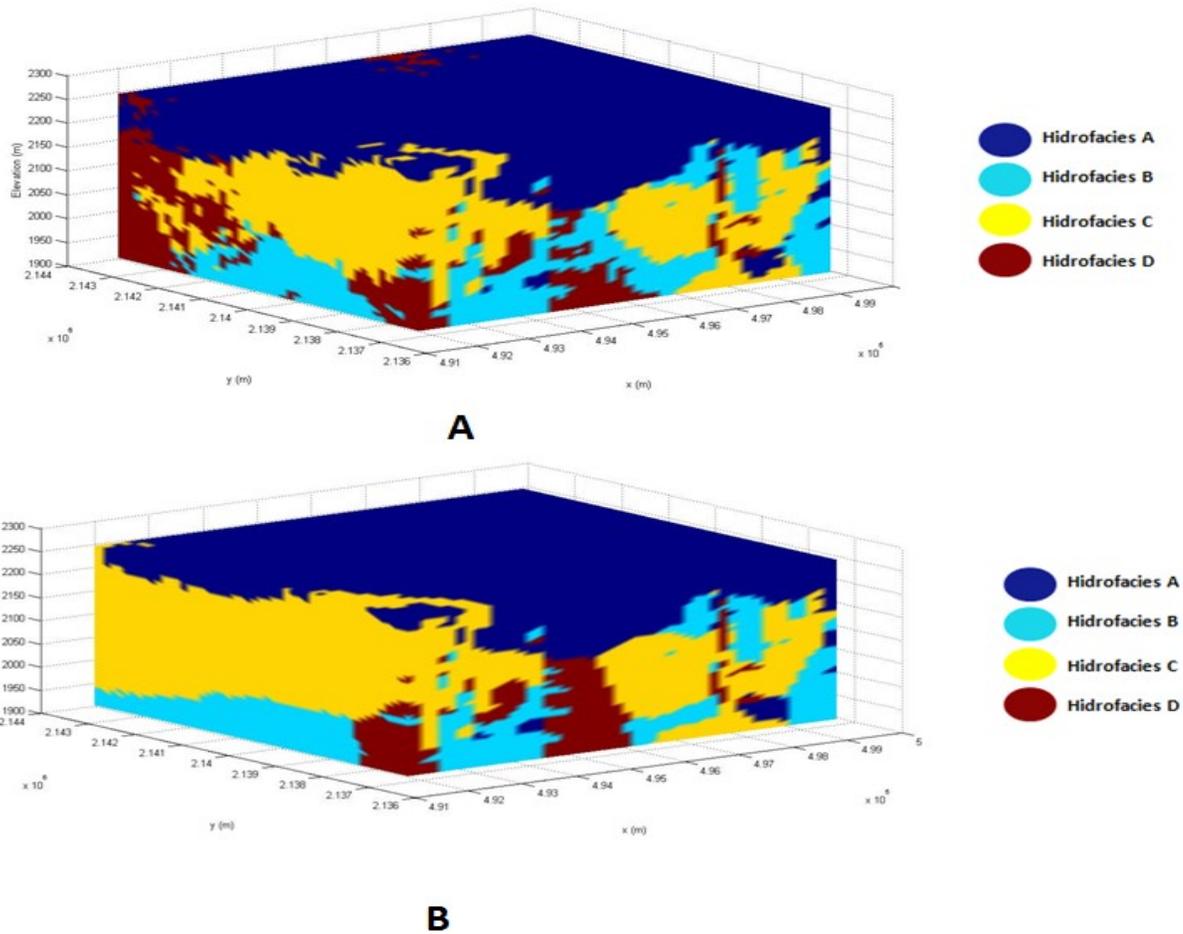


Figura IV.43. Modelo tridimensional de las hidrofacies de la zona III. A) Simulación Indicador Secuencial (50 realizaciones), B) Simulación Indicador Secuencial (1000 realizaciones) Hidrofacies A (Azul rey), Hidrofacies B (Azul claro), Hidrofacies C (Amarillo) e Hidrofacies D (Rojo).

Las figuras IV. 44, IV.45 y IV.46 se muestran los variogramas experimentales obtenidos con los datos reales contra los variogramas obtenidos con los variogramas experimentales obtenidos de las simulaciones secuenciales indicador condicionada y el krigeado indicador de las zonas I, II y III, respectivamente. Los mejores resultados con respecto a la semejanza de los variogramas experimentales se registran con el krigeado indicador y en menor proporción a los variogramas resultantes de las simulaciones secuenciales indicador condicionales.

Las secciones anteriormente presentadas fueron realizadas con un modelo conceptual geológico de la Cuenca de la Ciudad de México. La figura IV.47 representa una porción de la sección C, y el modelo tridimensional de hidrofacies ambas tienen una capa superficial lacustre. Debajo de ella se encuentra la capa del aluvión que agrupa a las hidrofacies B y D, en el modelo tridimensional de hidrofacies muestra diferencias y su variabilidad de las mismas; la hidrofacies B presenta mayor continuidad lateral y envolviendo a las hidrofacies D y C. La hidrofacies C presenta mayor continuidad al modelo geológico. La figura IV.48 representa la sección B, presentan una capa superficial lacustre debajo de ella se encuentra la hidrofacies C que se intercala con la hidrofacies B y D. La hidrofacies D se presenta como lentes limitados por la hidrofacies B. La figura IV.49 en esta sección las hidrofacies D predomina al oeste teniendo una transición a la hidrofacies C al este, la hidrofacies B se localiza debajo principalmente de la hidrofacies C.

Modelo geostatístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

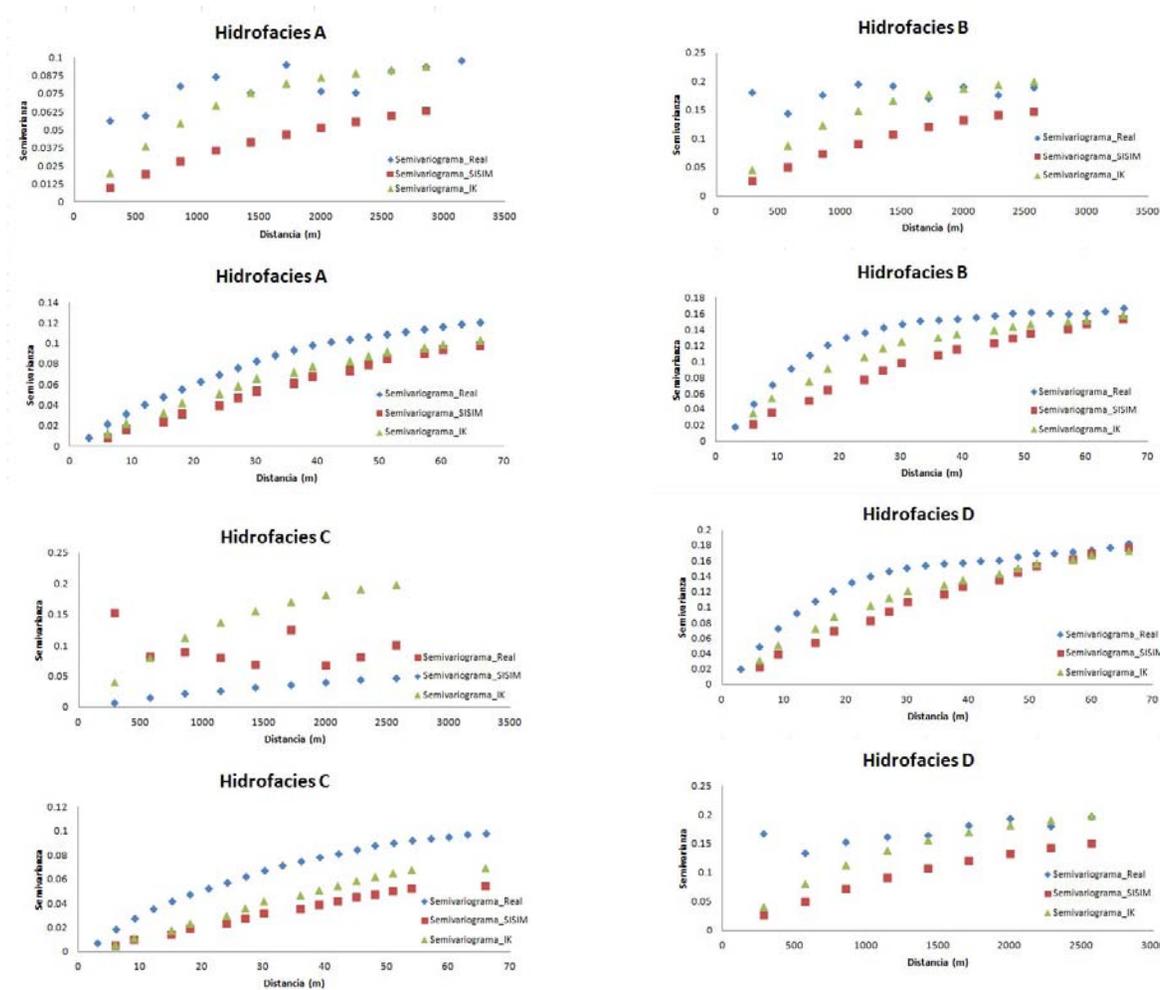


Figura IV.44. Comparación de los variogramas experimentales vertical y horizontal a partir de los modelos tridimensionales de las hidrofacies con los métodos de simulación secuencial indicador condicionamiento y el krigeado indicador de la Zona I.

Modelo geostatístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

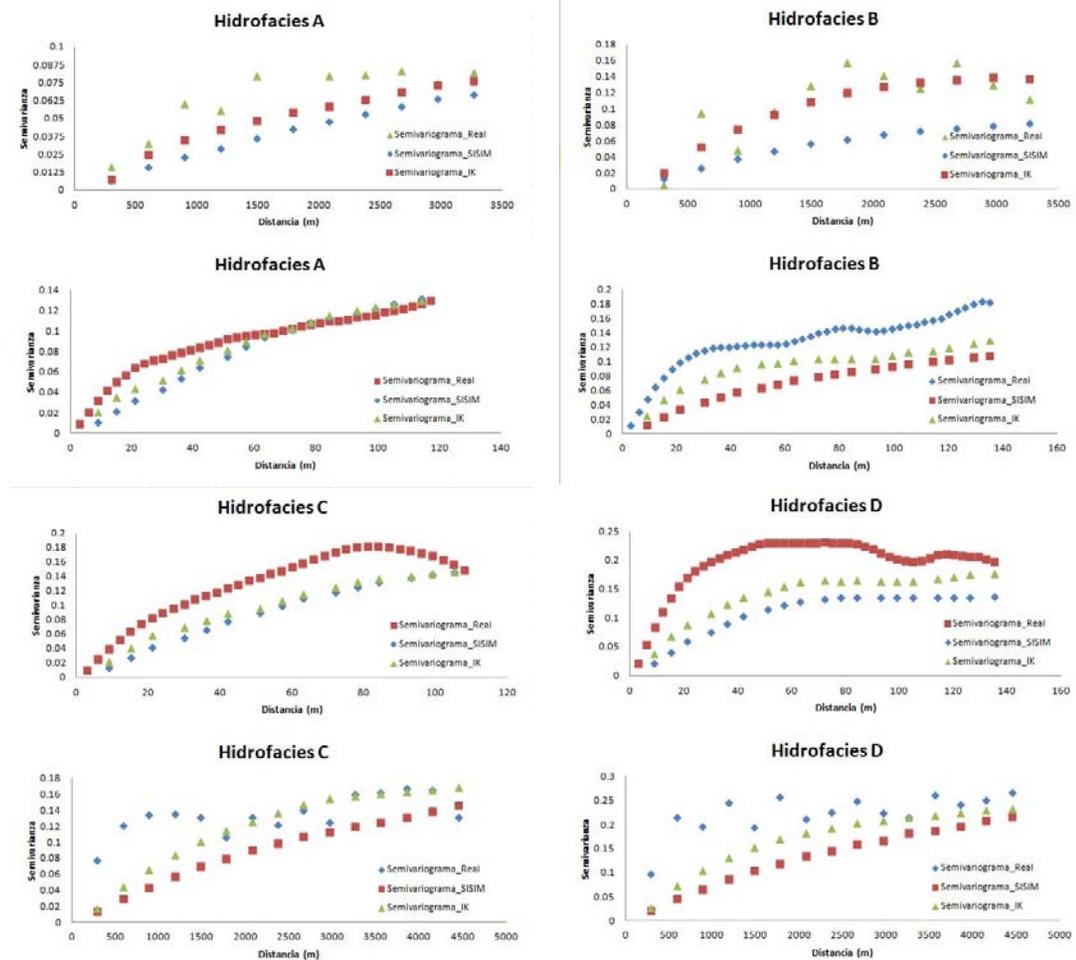


Figura IV.45. Comparación de los variogramas experimentales vertical y horizontal a partir de los modelos tridimensionales de las hidrofacies con los métodos de simulación secuencial indicador condicionamiento y el krigeado indicador de la Zona II.

Modelo geostatístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

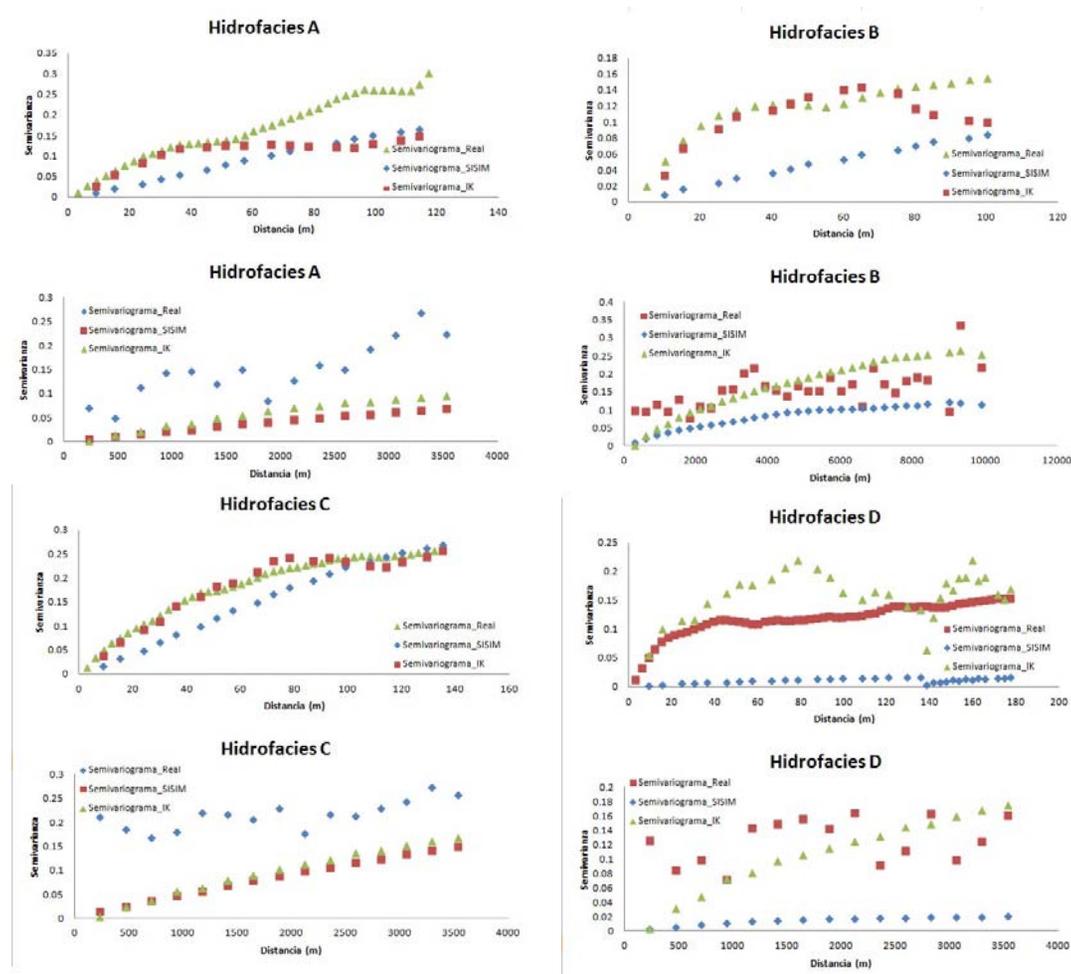


Figura IV.46. Comparación de los variogramas experimentales vertical y horizontal a partir de los modelos tridimensionales de las hidrofacies con los métodos de simulación secuencial indicador condicionamiento y el krigeado indicador de la Zona III.

Modelo geostatístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

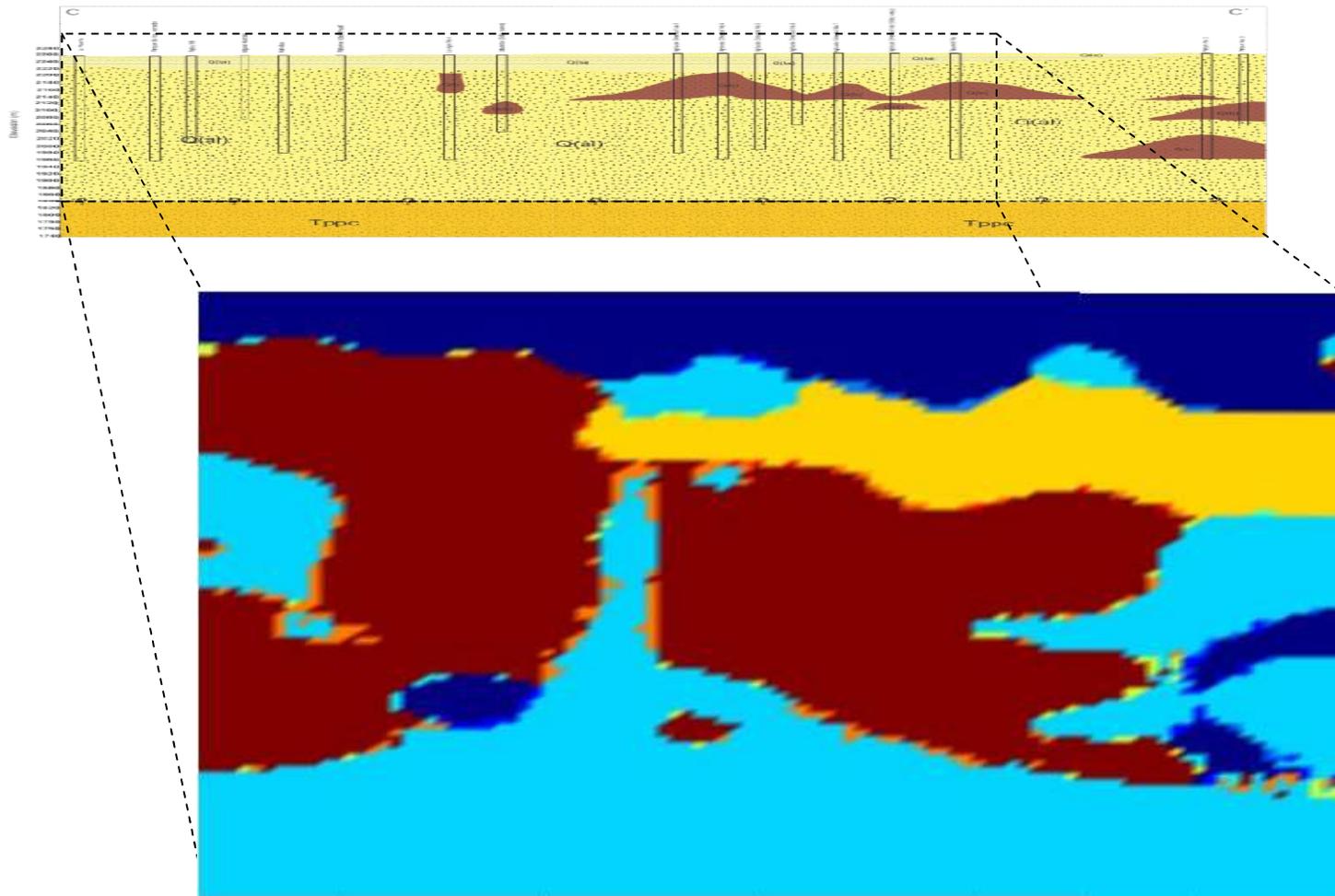


Figura IV.47. Comparación del modelo conceptual de la sección C y el modelo tridimensional de las hidrofacies construido a partir de simulaciones secuenciales indicador condicionadas.

Modelo geostatístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

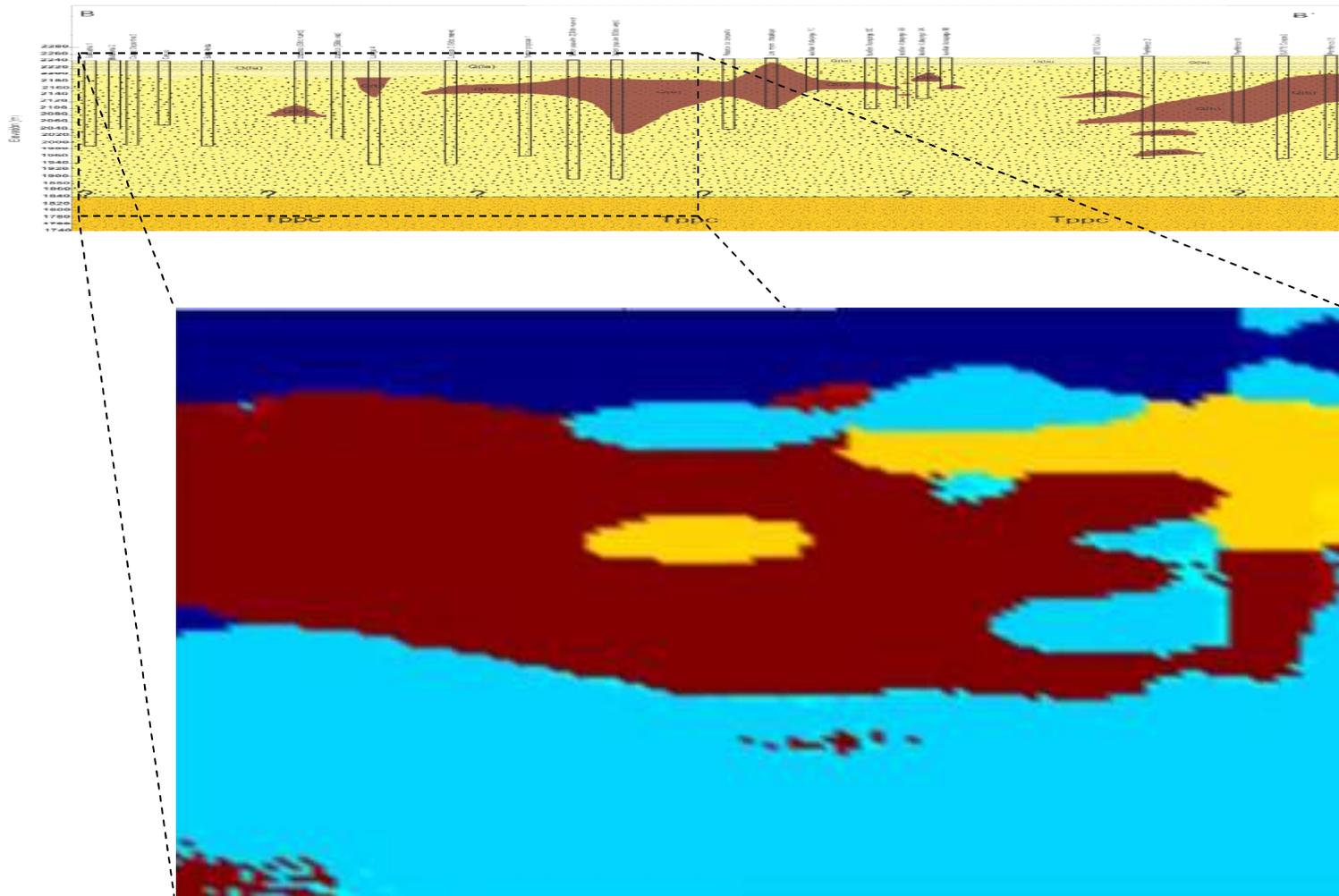


Figura IV.48. Comparación del modelo conceptual de la sección B y el modelo tridimensional de las hidrofacies construido a partir de simulaciones secuenciales indicador condicionadas.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

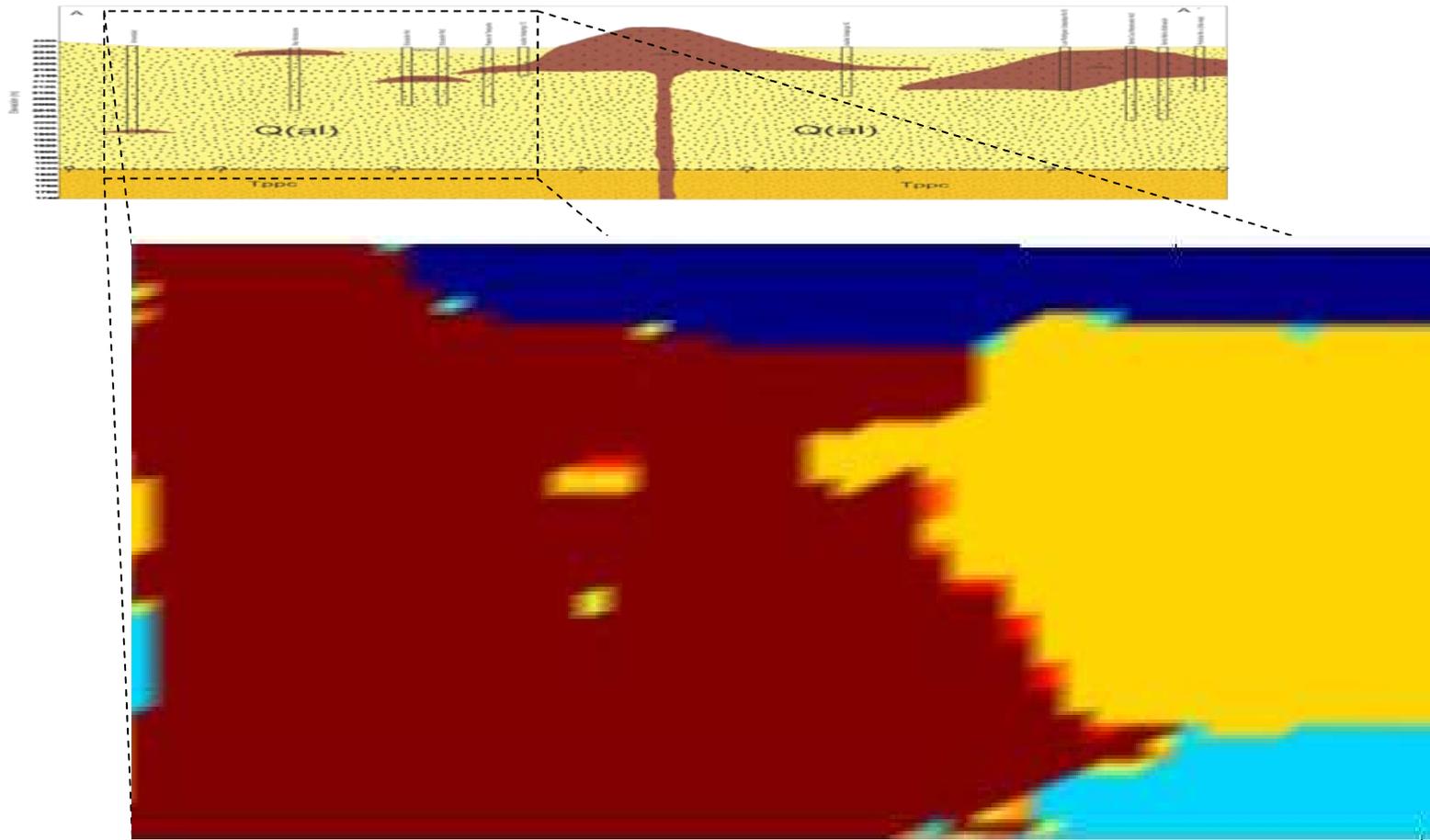


Figura IV.49. Comparación del modelo conceptual de la sección A y el modelo tridimensional de las hidrofacies construido a partir de simulaciones secuenciales indicador condicionadas.

CAPITULO 5.-Parametrización hidrogeológica

Habiendo generado un modelo 3D con la distribución de las hidrofacies, surge la pregunta sobre si es posible asignar valores a sus propiedades hidrogeológicas. En este capítulo exploro la posibilidad de estimar valores de los parámetros hidrogeológicos (conductividad hidráulica K y almacenamiento específico S_s) mediante la inversión de tres pruebas de bombeo. Las pruebas de bombeo fueron simuladas utilizando MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988) y la estimación de parámetros utilizando el código PEST (Doherty 2010).

Cabe señalar que la estimación de parámetros para las hidrofacies a partir de pruebas de bombeo en pozos tiene las siguientes limitantes: (a) las pruebas se realizaron en pozos en producción que captan porciones de las hidrofacies B, C y D, por lo que los abatimientos medidos promedian lo que ocurre en toda la longitud del cedazo y (b) no se cuenta con mediciones de abatimiento en cada hidrofacies, por lo que no es factible identificar o separa el efecto del bombeo en cada hidrofacies.

5.1.- Modelación matemática con MODFLOW

El software utilizado para la elaboración del modelo matemático del acuífero aluvial de la Ciudad de México fue el MODFLOW 2005 (Harbaugh, 2005). Este programa simula el flujo de un sistema hidrogeológico irregular en el cual las capas acuíferas pueden ser confinadas, no confinadas o una combinación de confinado y no confinado. MODFLOW resuelve una forma tridimensional de la ecuación de flujo de agua subterránea (McDonald y Harbaugh, 1988):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde:

K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} : Son los valores de la conductividad hidráulica a lo largo de los ejes coordenados x,y,z, que son paralelos a los ejes mayores de la conductividad hidráulica.

h : Carga hidráulica.

W : representa las fuentes o sumideros de agua y es caudal por unidad de volumen de medio poroso .

S_s : Coeficiente de almacenamiento específico de los acuíferos.

t : tiempo.

La ecuación anterior es resuelta mediante el método de diferencias finitas. Se calcula un valor de la carga hidráulica en cada nodo de la malla. La forma general de la expresión de diferencias finitas es la siguiente:

$$Bh_{i-1,j,k} + Ch_{i,j+1,k} + Dh_{i+1,j,k} + Eh_{i,j-1,k} + Fh_{i,j,k+1} + Gh_{i,j,k-1} + Hh_{i,j,k} = RHS_{i,j,k}$$

La ecuación para la carga en el nodo i,j,k ($h_{i,j,k}$) involucra la carga en el nodo en sí, así como las cargas en los seis nodos circundantes. Cada carga es multiplicada por un coeficiente (B, C, D, E, F, G ó H) que es una función de la conductividad

hidráulica entre los nodos, el coeficiente H es también función del término de almacenamiento y el término $RHS_{i,j,k}$ incluye términos de almacenamiento y recarga en el lado derecho de la ecuación (Anderson, 1992).

5.2.-Estimación de parámetros con PEST

PEST (acrónimo de Parameter ESTimation, Doherty, 2010) es una herramienta que apoya en la interpretación de datos, la calibración del modelo y el análisis predictivo. Los detalles del método que usa PEST para estimar parámetros fueron descritos en el capítulo 3. En este capítulo, el objetivo es estimar la combinación de parámetros (K y S_s) para cada hidrofacies que mejor reproducen los abatimientos observados en cada prueba de bombeo. La función objetivo que minimiza PEST entonces se construye a partir de los residuales entre los abatimientos observados y modelados

$$\Phi = (s_{obs} - s_{mod})^T (s_{obs} - s_{mod})$$

donde s_{obs} y s_{mod} son los vectores de abatimientos observados y modelados, respectivamente, para cada prueba de bombeo y el superíndice T representa la operación transpuesta. Adicionalmente, s_{mod} depende de la distribución espacial de las hidrofacies y de los parámetros hidrogeológicos, K y S_s , de cada una. Puesto que se tienen 4 hidrofacies, en total se tendrán que estimar máximo 8 parámetros por prueba de bombeo. Sin embargo, en algunas pruebas el tiempo de duración varía de 17 minutos a 720 minutos lo cual influenciará en los resultados.

Los datos que se requieren para un modelo son de cuatro tipos principales: 1) Datos fijos. Estos datos definen el sistema, tal como la geometría de las unidades hidrogeológicas. 2) Parámetros. Estas son las propiedades del sistema como K y S_s ; un modelo puede tener muchos parámetros, 3) Excitaciones. Estas son las cantidades que "impulsan" el sistema, 4) Datos de control. Estos datos proporcionan ajustes para el método de solución numérica por la cual las ecuaciones del sistema se resuelven.

5.3.- Parametrización hidrogeológica

Condiciones de frontera

Para la interpretación e inversión de las pruebas de bombeo, los límites laterales de cada área a modelar se consideraron como fronteras impermeables, cuidando que la extensión del área a modelar fuera suficientemente extensa para que el efecto del bombeo no llegara a la frontera.

Discretización espacial

La selección de los periodos del tiempo (Δt) y la construcción del mallado son pasos críticos en el diseño del modelo porque los valores de la discretización del tiempo y el espacio tiene una fuerte influencia sobre la exactitud de los resultados numéricos (Anderson, 1992).

Para la mejor definición de los conos de abatimiento alrededor de la prueba de bombeo se propuso una malla con menor espaciamento cerca del pozo de bombeo con las siguientes dimensiones de las columnas son de 108.46 m, 54.23 m, 27.12 m, 18.07m, 13.55 m, 10.84 m, 13.55 m, 18.07m, 27.12 m, 54.23 m y 108.46 m. y de los renglones son 68.64 m, 34.32 m, 17.16 m, 11.44m, 8.58 m, 11.44 m, 17.16m, 34.32m y 68.64 m con un área de modelación que cubre una

extensión de 4.0 km². El número de capas en Agrícola Oriental N°4 son 73, Ciudad Deportiva N°1 y Ciudad Deportiva N°2 son 70 capas con un espesor uniforme de 4.21 m (Figura V.1).

Discretización del tiempo

El tiempo de simulación está basado en los periodos con los que se cuenta información de los abatimientos provocados por la prueba de bombeo que son 17 minutos en el pozo Agrícola Oriental N°4; 720 minutos en Ciudad Deportiva N°1 y 220 minutos en Ciudad Deportiva N°2.

Carga hidráulica inicial

De la distribución espacial de las hidrofacies es evidente que la hidrofacies A corresponde al acuitardo (sedimentos lacustres) y el resto de las hidrofacies corresponde al acuífero en explotación. Para la carga hidráulica inicial se consideraron dos opciones:

- a) Suponiendo que el sistema está en equilibrio antes del bombeo, por lo que la carga hidráulica inicial en todo el dominio es constante (tanto en el acuífero como en el acuitardo). En este caso la carga hidráulica fue definida en 2243.79 m que fue estimada para el año 1993(año en que se realizaron las pruebas de bombeo).
- b) Suponiendo que las hidrofacies que corresponden al acuífero en explotación se encuentran en equilibrio (carga hidráulica constante) mientras que en el acuitardo (hidrofacies A) se ha desarrollado flujo vertical descendente. Esto para investigar la posible influencia en las pruebas de flujo descendente debido a la sobreexplotación del acuífero. Para este caso la distribución de carga hidráulica en la vertical se presenta en la Tabla V.1.

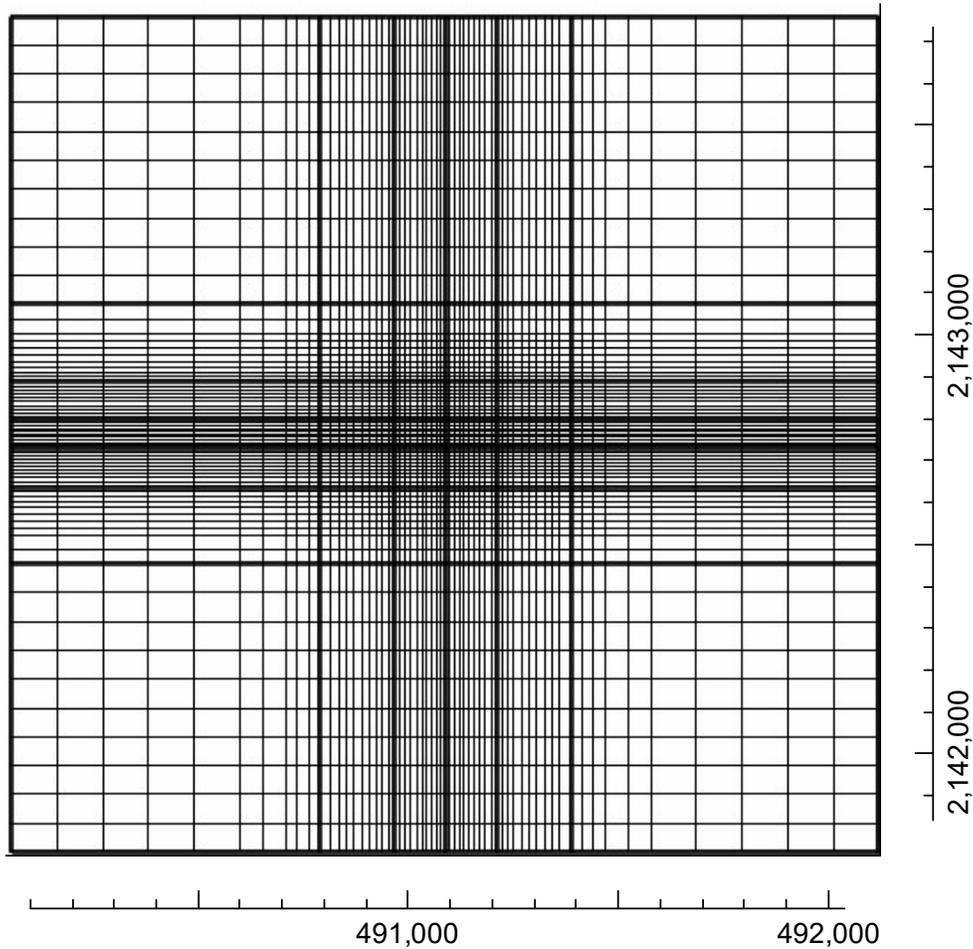
Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Figura V.1. Mallado del modelo matemático del Agrícola Oriental N°4, Ciudad Deportiva N°1 y Ciudad Deportiva N°2.

Adicionalmente, se desprecia la influencia del flujo natural (cero gradiente lateral inicial en la carga hidráulica) y, puesto que no se tienen datos para estimarla, se desprecia la posible influencia de pozos operando en las cercanías. Estos supuestos son razonables porque las gráficas de abatimiento de las pruebas de bombeo no sugieren influencias externas.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Tabla V.1. Descripción del perfil hidráulico de para los modelos matemáticos.

Capa	Carga hidráulica (m)
1	2243.79
2	2243.79
3	2243.79
4	2243.79
5	2243.79
6	2243.79
7	2243.79
8	2243.79
9	2243.76
10	2243.49
11	2241.4
12	2230.14
13-73	2195

Distribución de las hidrofacies

A partir del modelo tridimensional mostrado en el capítulo 4, se tomó un área superficial de 4 km² alrededor de la zona de cada pozo y a profundidad de acuerdo al fondo del mismo. En las figuras V.2, V.3 y V.4 se muestran la distribución espacial de las hidrofacies que fue utilizada para la modelación inversa para la obtención de los parámetros hidráulicos.

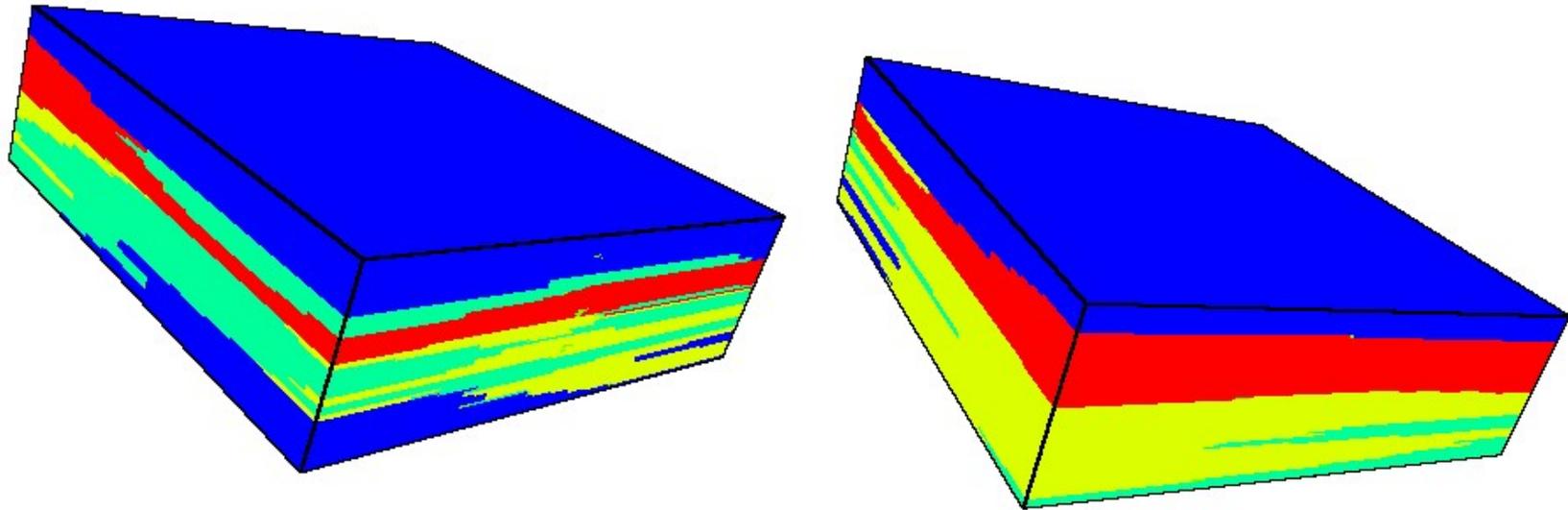


Figura V.2. Dos vistas del modelo tridimensional de las hidrofacies A (color azul), hidrofacies B (color azul claro), hidrofacies C (color rojo) e hidrofacies D (color amarillo) en el pozo Agrícola Oriental N°4.

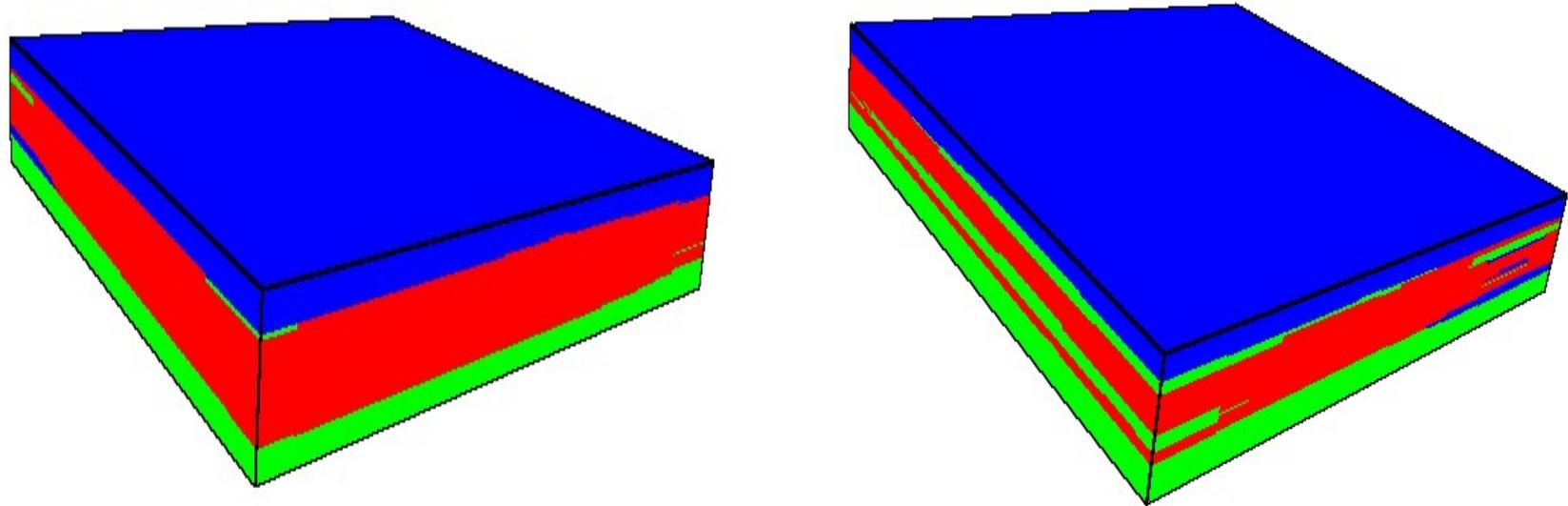


Figura V.3. Modelo tridimensional de las hidrofacies A (color azul), hidrofacies B (color verde), hidrofacies C (color amarillo) e hidrofacies (color rojo) en el pozo Ciudad Deportiva N°1.

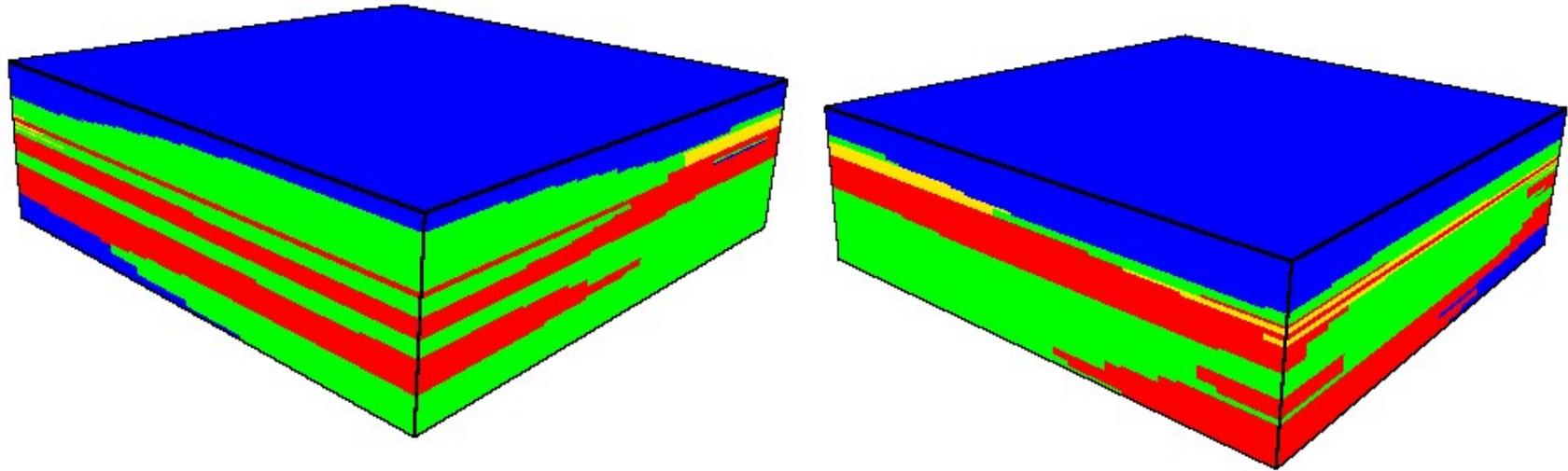


Figura V.4. Modelo tridimensional de las hidrofacies A (color azul), hidrofacies B (color verde), hidrofacies C (color amarillo) e hidrofacies D (color rojo) del pozo Ciudad Deportiva N°2.

5.4.- Modelación inversa con carga constante y carga variable

Caso Agrícola Oriental N° 4

El caso Agrícola Oriental se destaca por tener abatimientos muy pequeños con tiempos muy pequeños. En las tablas V.2 y V.3 se muestran los valores medidos y los valores simulados para estas pruebas. También se muestra el error cuadrático total y la contribución al error correspondiente a cada medición. Los errores obtenidos (Φ) son de $6.19E-04$ y $1.40E-03$ para los casos de carga constante y carga variable, respectivamente. Las figuras V.5 y V.6 se muestran las curvas de abatimiento de estas pruebas de bombeo siendo ambas muy aceptables, ya que conservan el comportamiento hidráulico a la curva medida.

Tabla V.2. Valores de abatimiento medidos y simulados con carga hidráulica inicial constante de la prueba de bombeo de Agrícola Oriental N°4. CI (Contribución individual residual al error medio cuadrático (Φ)).

Tiempo (min)	Abatimiento medido (m)	Abatimiento simulado (m)	CI
0.08	0.04	0.04	5.260E-06
0.25	0.08	0.08	1.020E-06
0.50	0.10	0.11	1.400E-04
0.75	0.12	0.13	6.910E-05
1.00	0.13	0.14	6.710E-05
2.00	0.15	0.15	7.290E-06
4.00	0.16	0.16	8.070E-06
8.00	0.16	0.17	9.800E-05
17.00	0.16	0.17	2.230E-04
		Phi	6.19E-04

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Tabla V.3. Valores de abatimiento medidos y simulados con carga hidráulica inicial variable de la prueba de bombeo de Agrícola Oriental N°4. CI (Contribución individual residual al error medio cuadrático (Phi)).

Tiempo (min)	Abatimiento medido (m)	Abatimiento simulado (m)	CI
0.08	0.04	0.04	2.220E-06
0.25	0.08	0.09	6.710E-05
0.50	0.10	0.12	4.540E-04
0.75	0.12	0.14	2.280E-04
1.00	0.13	0.14	1.010E-04
2.00	0.15	0.14	8.240E-05
4.00	0.16	0.14	3.280E-04
8.00	0.16	0.15	1.400E-04
17.00	0.16	0.16	1.310E-06
		Phi	1.40E-03

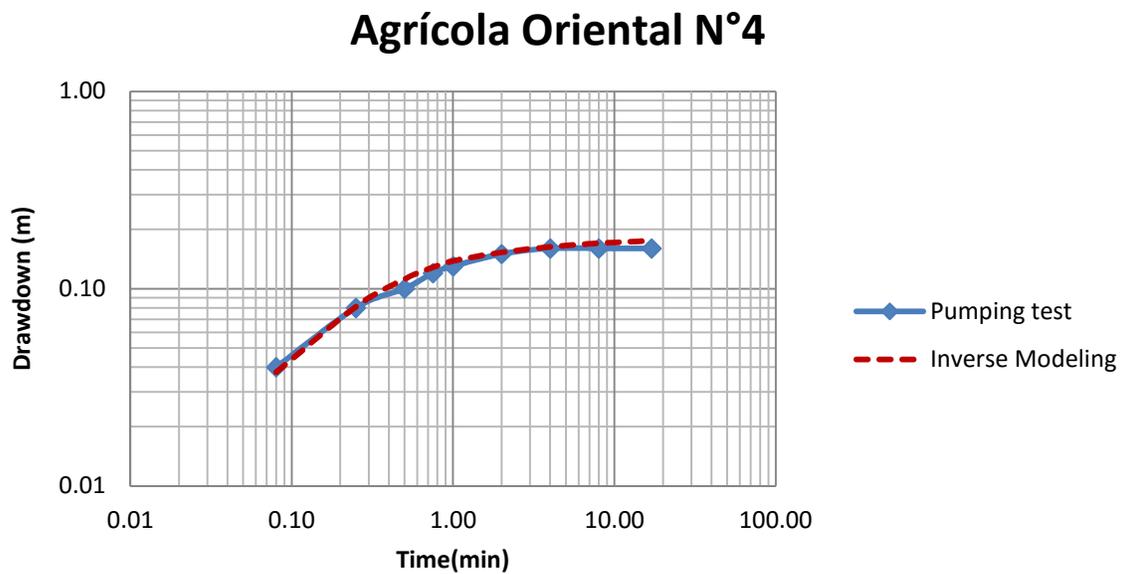


Figura V.5. Gráfica de la prueba de bombeo de Agrícola Oriental N°4 con carga hidráulica inicial constante.

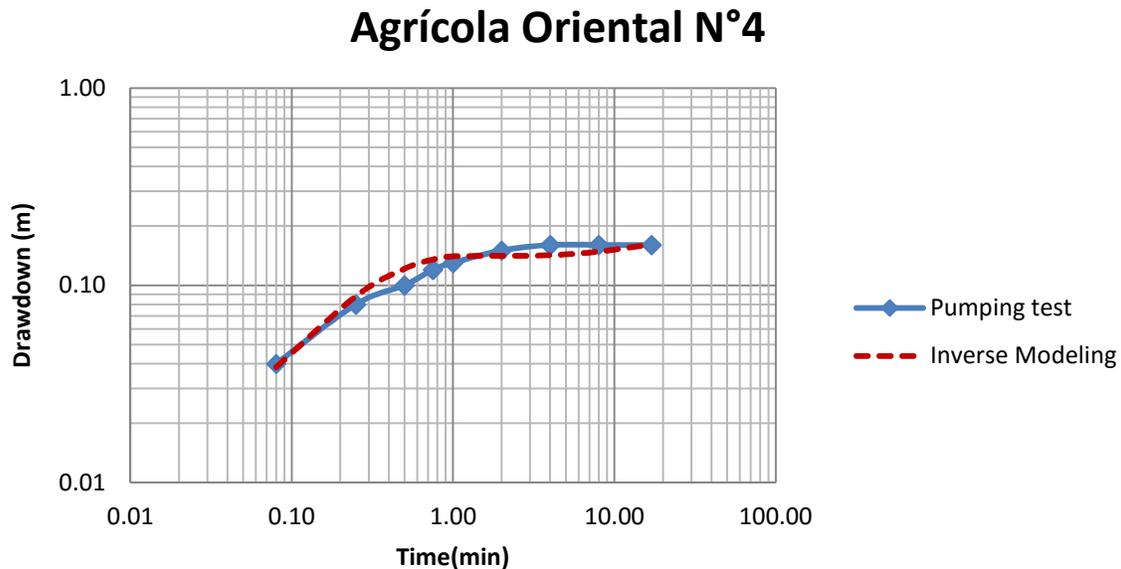


Figura V.6. Gráfica de la prueba de bombeo de Agrícola Oriental N°4 con carga hidráulica inicial variable.

Caso Ciudad Deportiva N°1

El caso Ciudad Deportiva N°1 presenta lo contrario a Agrícola Oriental N°4, los abatimientos en el primer minuto de la prueba de bombeo son mayores a 12 m y se estabilizan después de 3 hrs de haber empezado la misma. En las tablas V.4 y V.5 se muestran los valores medidos y los valores simulados para estas pruebas. También se muestra el error cuadrático total y la contribución al error correspondiente a cada medición (Φ), los cuales son de 3.17 y 4.56 para los casos de carga constante y carga variable, respectivamente.

Las figuras V.7 y V.8 muestran las curvas de abatimiento de estas pruebas de bombeo siendo ambas muy aceptables, ya que conservan el mismo comportamiento hidráulico de la curva medida en la prueba de bombeo.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Tabla V.4. Valores de abatimiento medidos y simulados carga hidráulica inicial constante de la prueba de bombeo de Ciudad Deportiva N°1. CI (Contribución individual residual al error medio cuadrático (Phi)).

Tiempo (min)	Abatimiento medido (m)	Abatimiento simulado (m)	CI
1.10	12.6	13.43	6.940E-01
2.20	15.9	15.46	1.970E-01
4.20	17.4	17.02	1.440E-01
8.50	19.2	18.28	8.530E-01
17.00	19.8	19.12	4.580E-01
31.00	20.1	19.64	2.130E-01
62.00	20.52	20.07	2.020E-01
115.00	20.58	20.41	2.900E-02
230.00	20.7	20.76	3.730E-03
370.00	20.88	21.02	1.930E-02
470.00	20.88	21.16	7.950E-02
590.00	21	21.30	9.170E-02
720.00	21	21.44	1.900E-01
		Phi	3.17

Tabla V.5. Valores de abatimiento medidos y simulados con carga hidráulica inicial variable de la prueba de bombeo de Ciudad Deportiva N°1. CI (Contribución individual residual al error medio cuadrático (Phi)).

Tiempo (min)	Abatimiento medido (m)	Abatimiento simulado (m)	CI
1.10	12.6	13.54	8.790E-01
2.20	15.9	15.47	1.870E-01
4.20	17.4	16.94	2.100E-01
8.50	19.2	18.11	1.190E+00
17.00	19.8	18.90	8.170E-01
31.00	20.1	19.39	4.970E-01
62.00	20.52	19.84	4.610E-01
115.00	20.58	20.20	1.420E-01
230.00	20.7	20.58	1.490E-02

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

370.00	20.88	20.85	6.450E-04
470.00	20.88	21.01	1.720E-02
590.00	21	21.17	2.950E-02
720.00	21	21.33	1.090E-01
		Phi	4.56

Ciudad Deportiva N°1

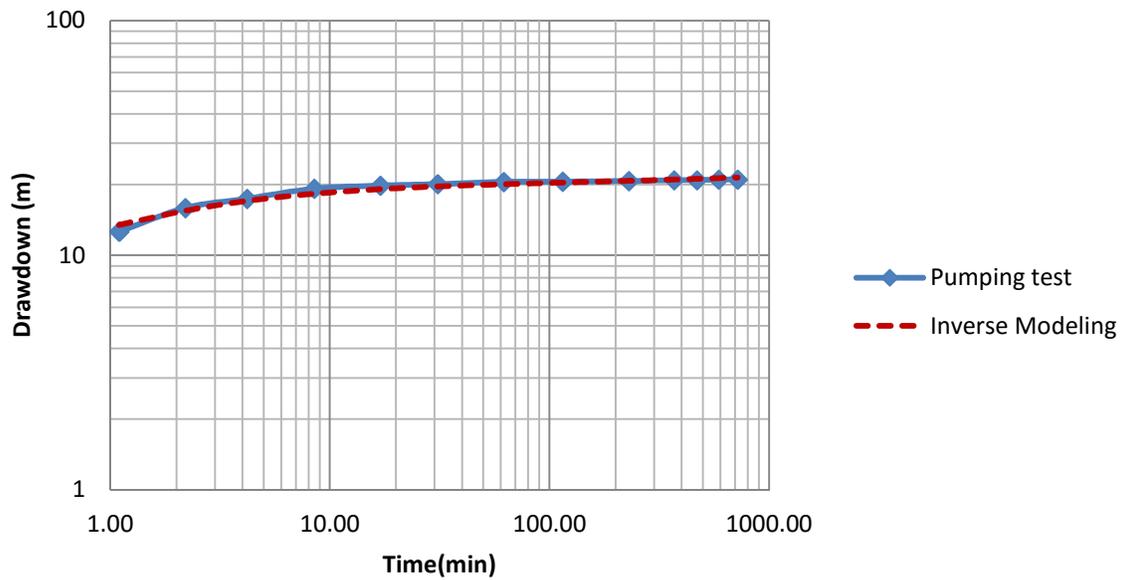


Figura V.7. Gráfica de la prueba de bombeo de Ciudad Deportiva N°1 con carga hidráulica inicial constante.

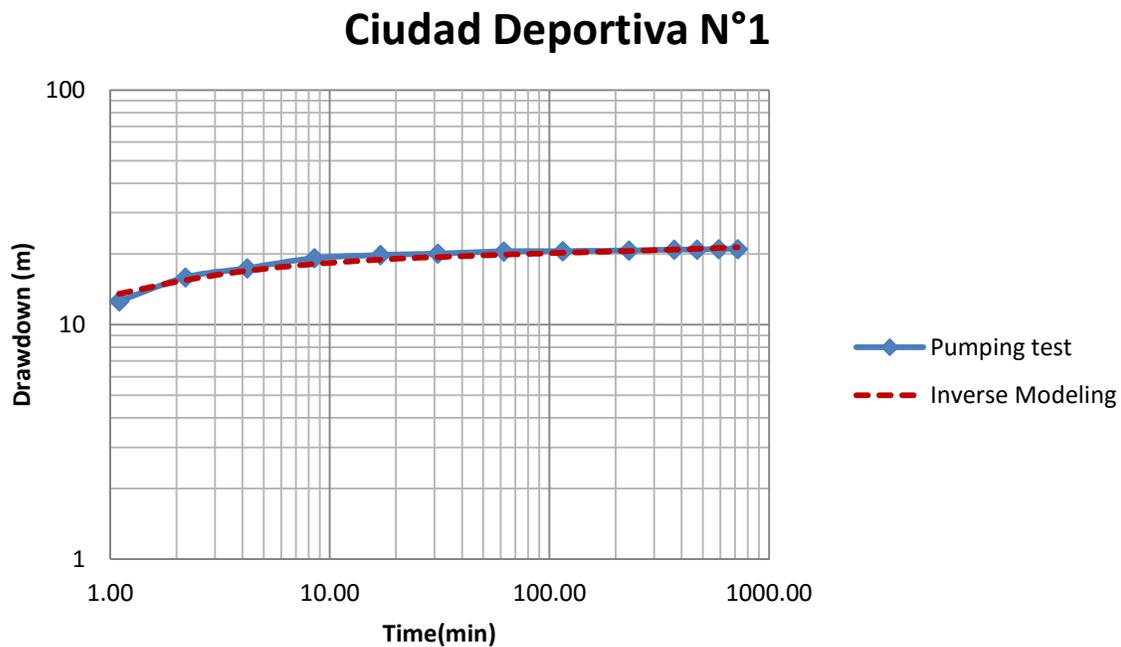


Figura V.8. Gráfica de la prueba de bombeo de Ciudad Deportiva N°1 con carga hidráulica inicial variable.

Caso Ciudad Deportiva N°2

Debido a la proximidad entre los pozos Ciudad Deportiva N°1 y Ciudad Deportiva N°2, la distribución de las hidrofacies es muy similar y los valores de abatimientos son muy parecidos. El ajuste de la curva de abatimiento es razonable excepto en las primeras tres mediciones. Los errores cuadráticos obtenidos (Φ) son de 63.0 y 63.04 para los casos de carga constante y carga variable, respectivamente; sin embargo, si no se consideran las tres primeras mediciones, el error cuadrático es del orden de 5 unidades. Las figuras V.9 y V.10 se muestran las curvas de abatimiento de estas pruebas de bombeo.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Las tablas V.6 y V.7 se muestran los valores medidos y los valores simulados para estas pruebas.

Tabla V.6. Valores de abatimiento medidos y simulados con carga hidráulica inicial constante de la prueba de bombeo de Ciudad Deportiva N°2. CI (Contribución individual residual al error medio cuadrático (Phi)).

Tiempo (min)	Abatimiento medido (m)	Abatimiento simulado (m)	CI
0.14	8.13	2.48	3.190E+01
0.27	8.75	4.29	1.990E+01
0.50	9.38	6.52	8.150E+00
2.00	11.25	11.25	1.020E-05
4.00	13.31	13.71	1.540E-01
7.80	15.63	15.48	2.210E-02
16.00	16.75	16.87	1.450E-02
29.00	17.50	17.77	7.390E-02
57.00	17.81	18.52	5.060E-01
85.00	18.13	18.92	6.370E-01
110.00	18.13	19.16	1.070E+00
150.00	18.75	19.41	4.370E-01
180.00	19.88	19.56	1.010E-01
200.00	19.88	19.64	5.690E-02
220.00	19.88	19.72	2.540E-02
		Phi	63.00

Tabla V.7. Valores de abatimiento medidos y simulados con carga hidráulica inicial variable de la prueba de bombeo de Ciudad Deportiva N°2. CI (Contribución individual residual al error medio cuadrático (Phi)).

Tiempo (min)	Abatimiento medido (m)	Abatimiento simulado (m)	CI
0.14	8.13	2.48	3.190E+01
0.27	8.75	4.29	1.990E+01
0.50	9.38	6.52	8.150E+00
2.00	11.25	11.25	1.020E-05
4.00	13.31	13.71	1.540E-01

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

7.80	15.63	15.48	2.210E-02
16.00	16.75	16.87	1.450E-02
29.00	17.50	17.77	7.390E-02
57.00	17.81	18.52	5.060E-01
85.00	18.13	18.92	6.370E-01
110.00	18.13	19.16	1.070E+00
150.00	18.75	19.41	4.370E-01
180.00	19.88	19.56	1.010E-01
200.00	19.88	19.64	5.690E-02
220.00	19.88	19.72	2.540E-02
		Phi	63.04

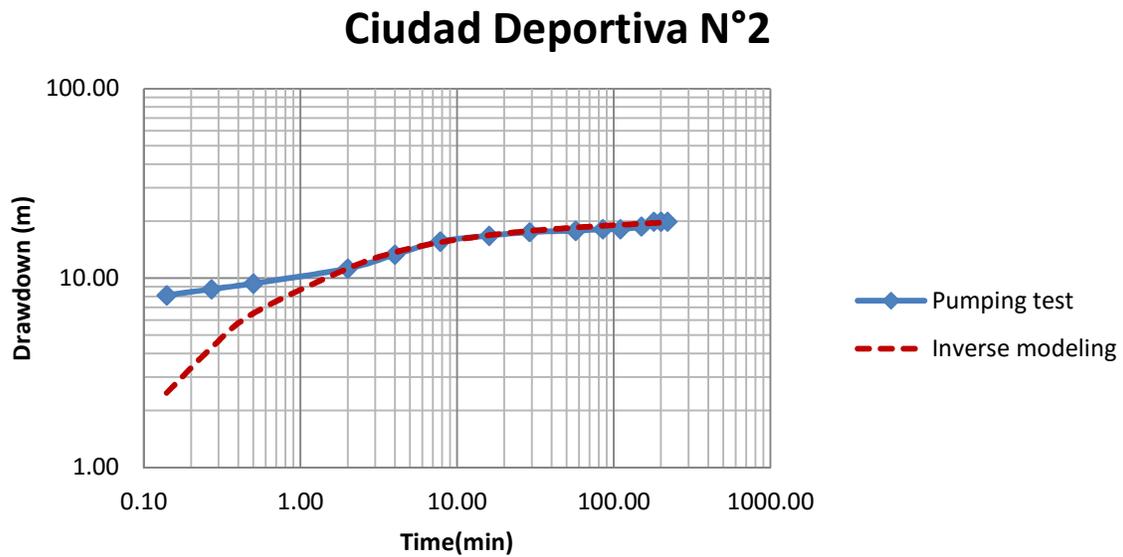


Figura V.9. Gráfica de la prueba de bombeo de Ciudad Deportiva N°2 con carga hidráulica inicial constante.

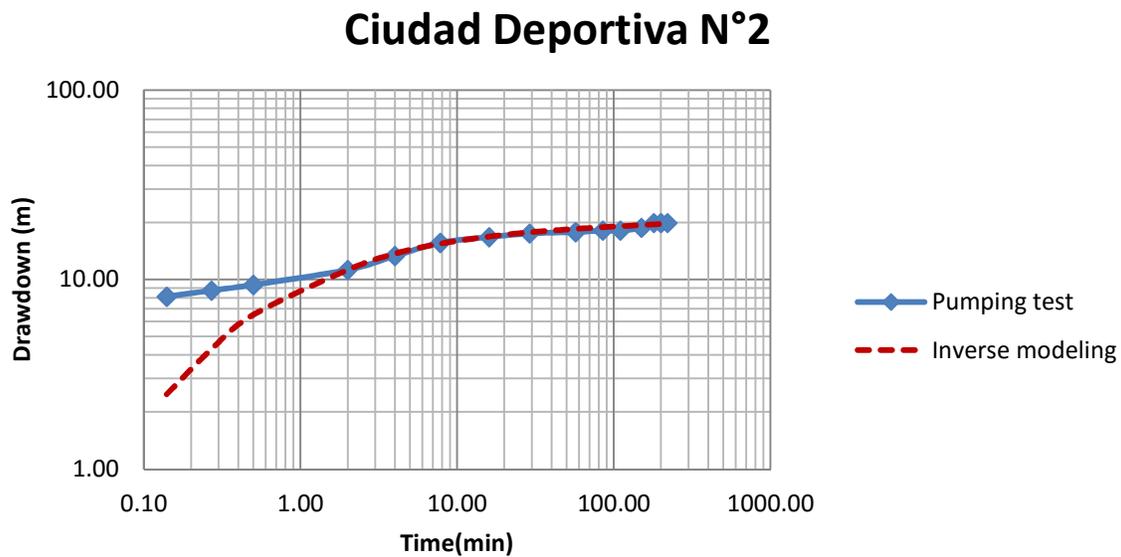


Figura V.10. Gráfica de la prueba de bombeo de Ciudad Deportiva N°2 con carga hidráulica inicial variable.

5.5.-Resultados

La modelación inversa consistió en la estimación de conductividad hidráulica, almacenamiento específico de cada hidrofacies a partir de los datos medidos de las pruebas de bombeo. El rendimiento específico se consideró un valor teórico fijo reportado debido a que no se contaba con gran cantidad de datos para evaluar correctamente este valor.

Se obtuvieron los parámetros hidráulicos que minimizaron el error cuadrático entre los abatimientos modelados y los medidos en cada prueba de bombeo. En las tablas V.8 y V.9 se reportan los valores de las conductividades hidráulicas de las hidrofacies y coeficientes de almacenamiento para los dos casos de cargas hidráulicas de los modelos. Los resultados de cada una de las pruebas de bombeo se describen a continuación.

En los gráficos V12, V13 y V.14 se muestran los valores de las interpretaciones de los depósitos aluviales (29), depósitos lacustres (13) y rocas volcánicas cuaternarias (8). Los valores de conductividades hidráulicas reportadas y los obtenidos por medio de la simulación varían en varios rangos esto es debidos que exista una gran heterogeneidad de los depósitos. Los valores de las conductividades hidráulicas de la hidrofacies A son menores a los valores reportados, las hidrofacies B y D son encuentran en los intervalos de los depósitos aluviales son valores intermedios y valores mayores. Y la hidrofacies C son comparados con los valores reportados de las rocas volcánicas del cuaternario.

Los valores obtenidos para la conductividad hidráulica de la hidrofacies A varían de $1.5 \text{ E-}5$ a $1\text{E-}13$ m/min teniendo un gran intervalo de posibilidades que puede tener. Un análisis de sensibilidad mostró que este valor no afecta con los valores de abatimiento de las pruebas de bombeo (Anexo Sensibilidad Hidrofacies A).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Tabla V.8 Parámetros hidráulicos obtenidos con carga hidráulica inicial constante en los modelos matemáticos de las pruebas de bombeo. CD1 (Ciudad Deportiva N°1), CD2 (Ciudad Deportiva N°2) y AG4 (Agrícola Oriental N°4), Ka(Conductividad hidráulica hidrofacies A), Kb(Conductividad hidráulica hidrofacies B), Kc (Conductividad hidráulica hidrofacies C), Kd(Conductividad hidráulica hidrofacies D),

Parámetros	CD1	CD2	AG4
Ka	1.570E-05	1.000E-13	1.000E-13
Kb	2.882E-03	1.729E-03	4.100E-09
Kc	4.154E-02	1.500E-03	3.154E+02
Kd	2.240E-04	4.042E-04	2.111E-02
Ssa	1.619E-07	1.951E-06	1.022E-03
Ssb	1.170E-07	1.170E-07	4.680E-05
Ssc	1.075E-06	7.394E-06	1.500E-05
Ssd	1.170E-07	8.474E-07	6.432E-05
Sya	2.000E-02	2.000E-02	2.000E-02
Syb	2.000E-01	2.000E-01	2.000E-01
Syc	8.500E-02	8.500E-02	8.500E-02
Syd	8.000E-02	8.000E-02	8.500E-02

Tabla V.9. Parámetros hidráulicos obtenidos con carga hidráulica inicial variable constante en los modelos matemáticos de las pruebas de bombeo. CD1 (Ciudad Deportiva N°1), CD2 (Ciudad Deportiva N°2) y AG4 (Agrícola Oriental N°4), Ka(Conductividad hidráulica hidrofacies A), Kb(Conductividad hidráulica hidrofacies B), Kc (Conductividad hidráulica hidrofacies C), Kd(Conductividad hidráulica hidrofacies D).

Parámetros	CD1	CD2	AG4
ka	1.000E-13	1.000E-13	1.000E-13
kb	2.837E-03	1.729E-03	4.098E-07
kc	4.165E-02	1.500E-03	3.518E+02
kd	2.285E-04	4.042E-04	9.202E-03
Ssa	1.012E-08	1.951E-06	1.186E-03
Ssb	1.170E-07	1.170E-07	1.170E-05
Ssc	9.816E-07	7.394E-06	5.990E-05

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Ssd	2.170E-07	8.474E-07	5.462E-05
Sya	2.000E-02	2.000E-02	2.000E-02
Syb	2.000E-01	2.000E-01	2.000E-01
Syc	8.500E-02	8.500E-02	8.500E-02
Syd	8.000E-02	8.000E-02	8.500E-02

Depósitos aluviales (Qal)

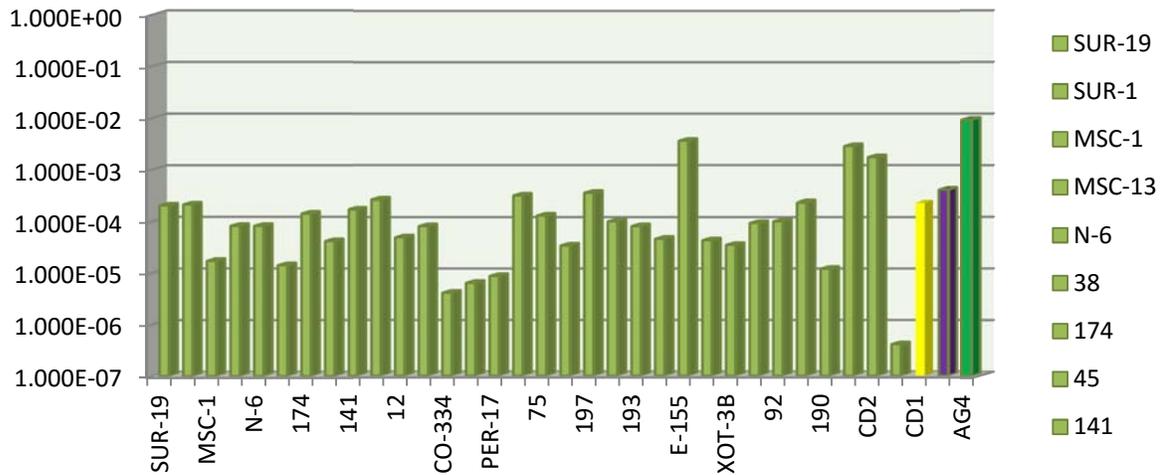


Figura V.12. Gráficas de los valores de las conductividades hidráulicas (m/s) de los depósitos aluviales de las interpretaciones de las pruebas de bombeo (Instituto de Geofísica, 1994) y los valores obtenidos de Ciudad Deportiva N°1, Ciudad Deportiva N°2 y Agrícola Oriental N°4.

Depósitos lacustres (Q_{la})

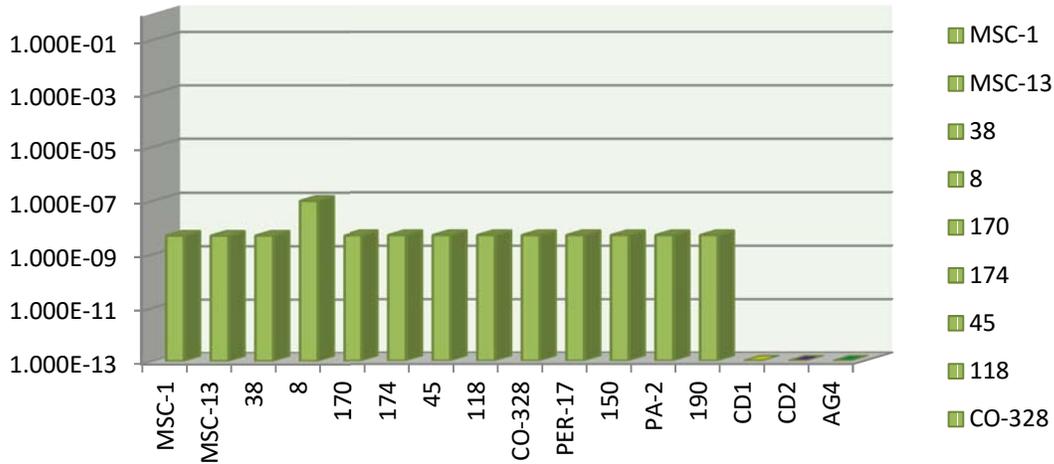


Figura V.13. Gráficas de los valores de las conductividades hidráulicas (m/s) de los depósitos lacustres de las interpretaciones de las pruebas de bombeo (Instituto de Geofísica, 1994) y los valores obtenidos de Ciudad Deportiva N°1, Ciudad Deportiva N°2 y Agrícola Oriental N°4.

Rocas volcánicas del Cuaternario (Q_b)

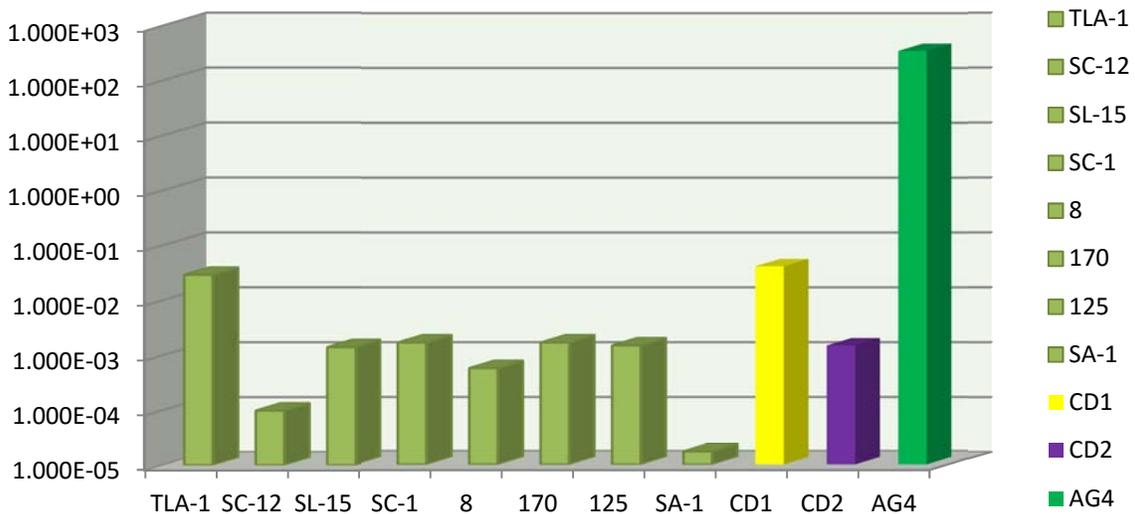


Figura V.14. Gráficas de los valores de las conductividades hidráulicas (m/s) de los depósitos lacustres de las interpretaciones de las pruebas de bombeo (Instituto de Geofísica, 1994) y los valores obtenidos de Ciudad Deportiva N°1, Ciudad Deportiva N°2 y Agrícola Oriental N°4.

5.6.-Análisis de los intervalos de confianza de los parámetros hidráulicos y coeficiente de variación.

Conductividad hidráulica de la hidrofacies A (K_A)

La hidrofacies A corresponde, en general al sedimento superficial lacustre de la Cuenca de México. Los valores estimados para esta hidrofacies son de $1E-13$ a $1.5E-5$ m/min (Tabla V.10). Puesto que la amplitud de los intervalos de confianza es varios órdenes de magnitud mayor al rango de los parámetros, los valores estimados de K_A son muy inciertos.

En la figura V.15 se muestra la variabilidad de los límites de confianza, siendo el mejor parámetro ajustado a la prueba de Ciudad Deportiva N°1 con carga variable; mientras que el de peor ajuste es de la prueba de Agrícola Oriental N°4 para el mismo parámetro. De la misma manera los gráficos V.16 con los coeficientes de variación y el de menor variación es el de Ciudad Deportiva N°1 con la carga hidráulica inicial constante.

Tabla V.10. Valores de los límites de confianza y coeficientes de variación para la conductividad hidráulica de la hidrofacies A.

Carga Constante				
	Límite inferior	Límite superior	Coeficiente de variación	Valor estimado
AG4	-2.496E+01	2.496E+01	1.558E+17	1.000E-13
CD1	-5.075E-03	5.106E-03	4.127E+01	1.570E-05
CD2	-5.944E-03	5.944E-03	8.833E+09	1.000E-13
Carga Variable				
	Límite inferior	Límite superior	Coeficiente de variación	Valor estimado
AG4	-1.565E-02	1.565E-02	6.126E+10	1.000E-13
CD1	-1.119E-04	1.119E-04	3.129E+06	1.000E-13
CD2	-5.944E-03	5.944E-03	8.833E+09	1.000E-13

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

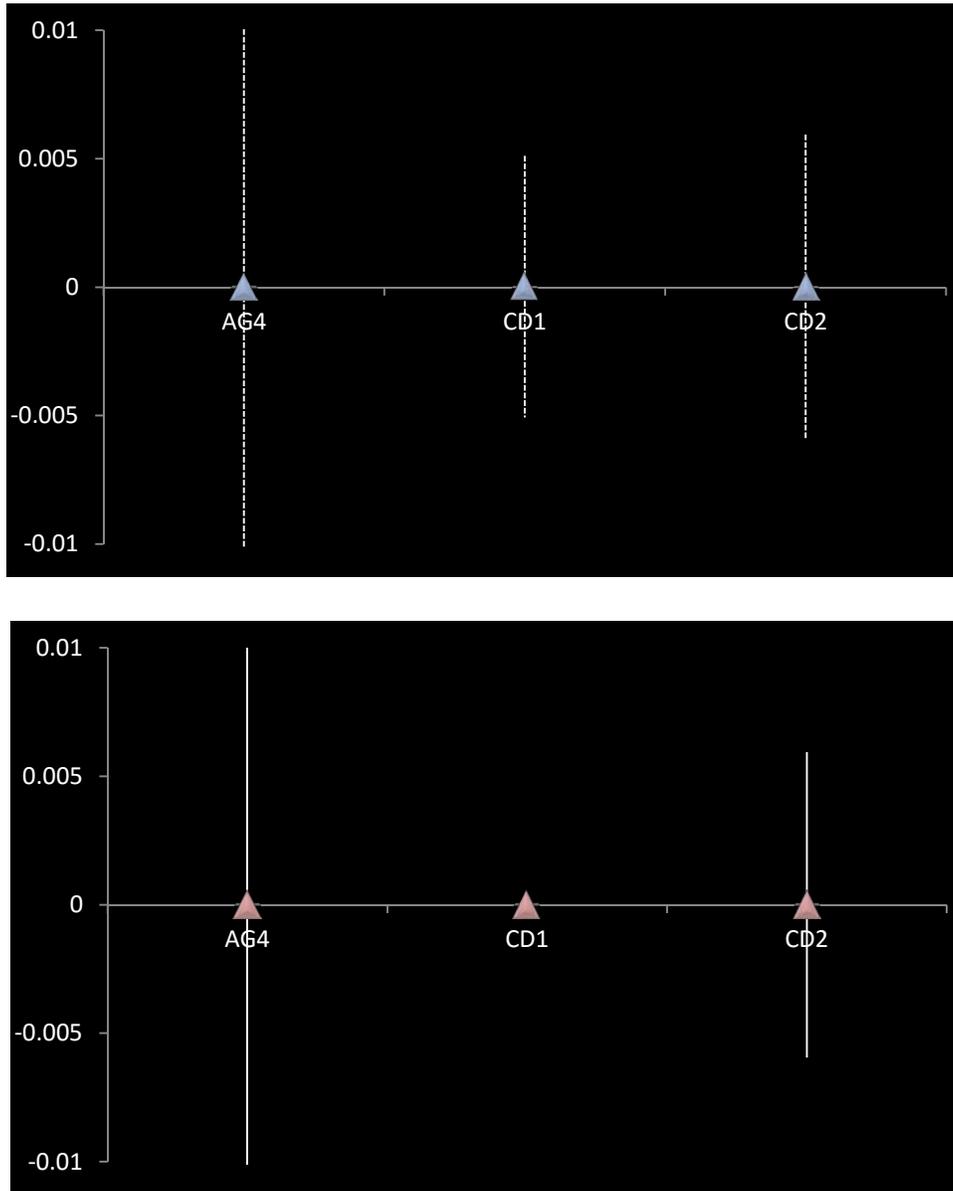


Figura V.15. Gráficos de los intervalos de confianza para la conductividad hidráulica de la hidrofacies A (carga hidráulica inicial constante en Azul y variable en Rojo carga hidráulica inicial variable).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

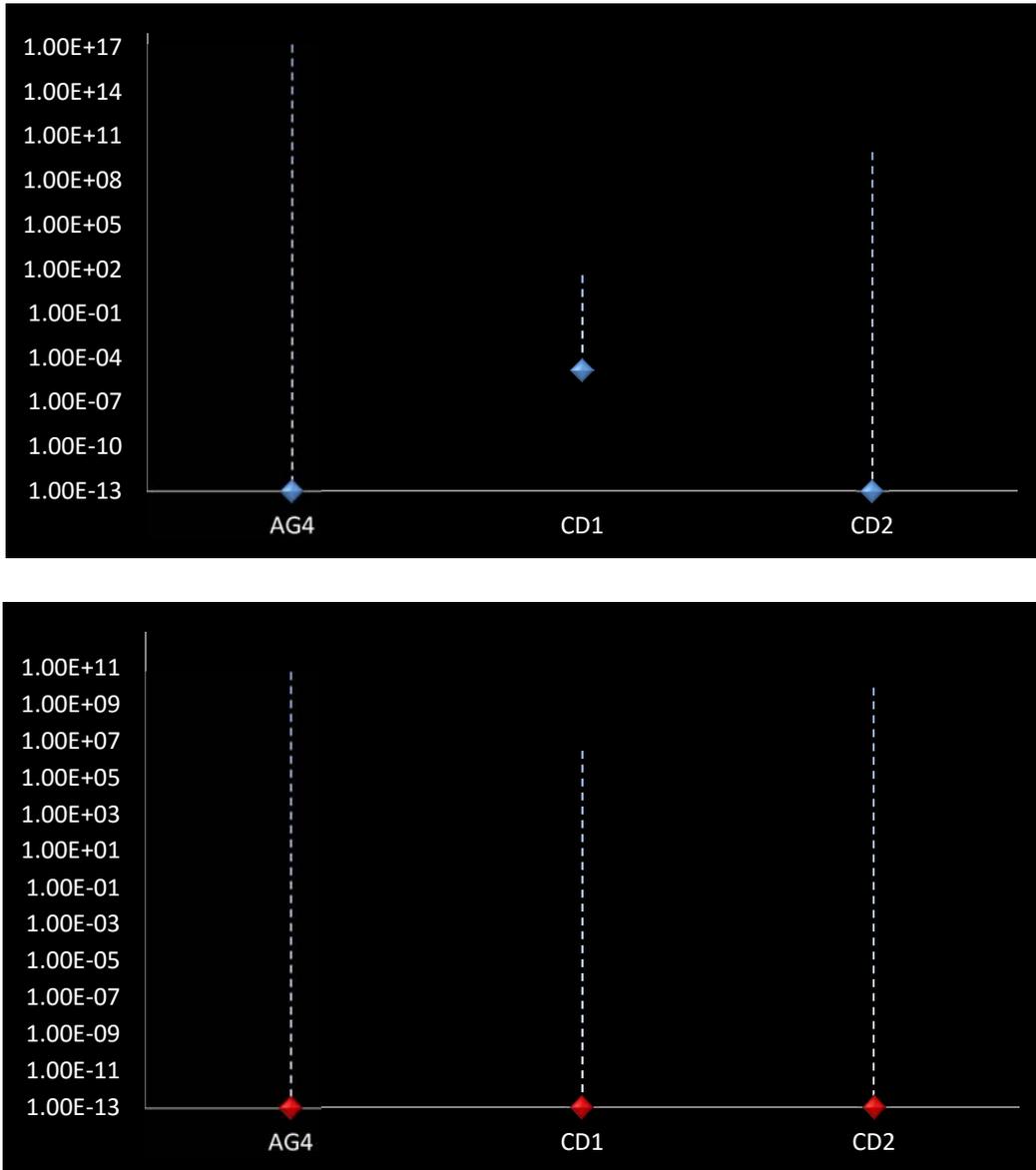


Figura V.16. Gráficos de los coeficientes de variación para la conductividad hidráulica de la hidrofacies A (carga hidráulica inicial constante en Azul y variable en Rojo carga hidráulica inicial variable).

Conductividad hidráulica de la hidrofacies B (K_B)

La hidrofacies B se encuentra a sedimentos considerados de baja conductividad, como arena/arcilla, arcilla/arena, toba, etc. y es la hidrofacies que predomina en la porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México estudiada en esta tesis. Los valores de conductividad hidráulica estimados de las pruebas de bombeo se reportan en la tabla V.11 y van de $4.1E-9$ m/min a $1.73E-3$ m/min. Los valores son más altos que los de la arcilla de la hidrofacies A y los intervalos de confianza al 95% son menos amplios. Aún así, la incertidumbre de los valores estimados para K_B es alta.

Tabla V.11. Valores de los límites de confianza y coeficientes de variación para la conductividad hidráulica de la hidrofacies B.

Carga constante				
	Límite inferior	Límite superior	Coficiente de variación	Valor estimado
AG4	-5.938E-01	5.938E-01	2.150E+09	4.100E-09
CD1	-5.838E-01	5.895E-01	2.985E+03	2.882E-03
CD2	-5.553E-01	5.587E-01	4.486E+03	1.729E-03
Carga Variable				
	Límite inferior	Límite superior	Coficiente de variación	Valor estimado
AG4	-1.758E+00	1.758E+00	1.885E+08	4.098E-07
CD1	-5.510E-01	5.567E-01	2.703E+03	2.837E-03
CD2	-5.553E-01	5.587E-01	4.486E+03	1.729E-03

En la figura V.17 son los límites de la confianza los cuales son muy similares en todos los casos; siendo el parámetro hidráulico mejor ajustado de todos. Pero el valor que destaca es el de menor conductividad en comparación de las otras pruebas es de la prueba de bombeo Agrícola Oriental N°4 que su valor varía en los órdenes de $4E-9$ m/min a $4E-7$ m/min a los valores de 0.001 m/min de la zona donde están las pruebas de bombeo de Ciudad Deportiva N°1 y N°2.

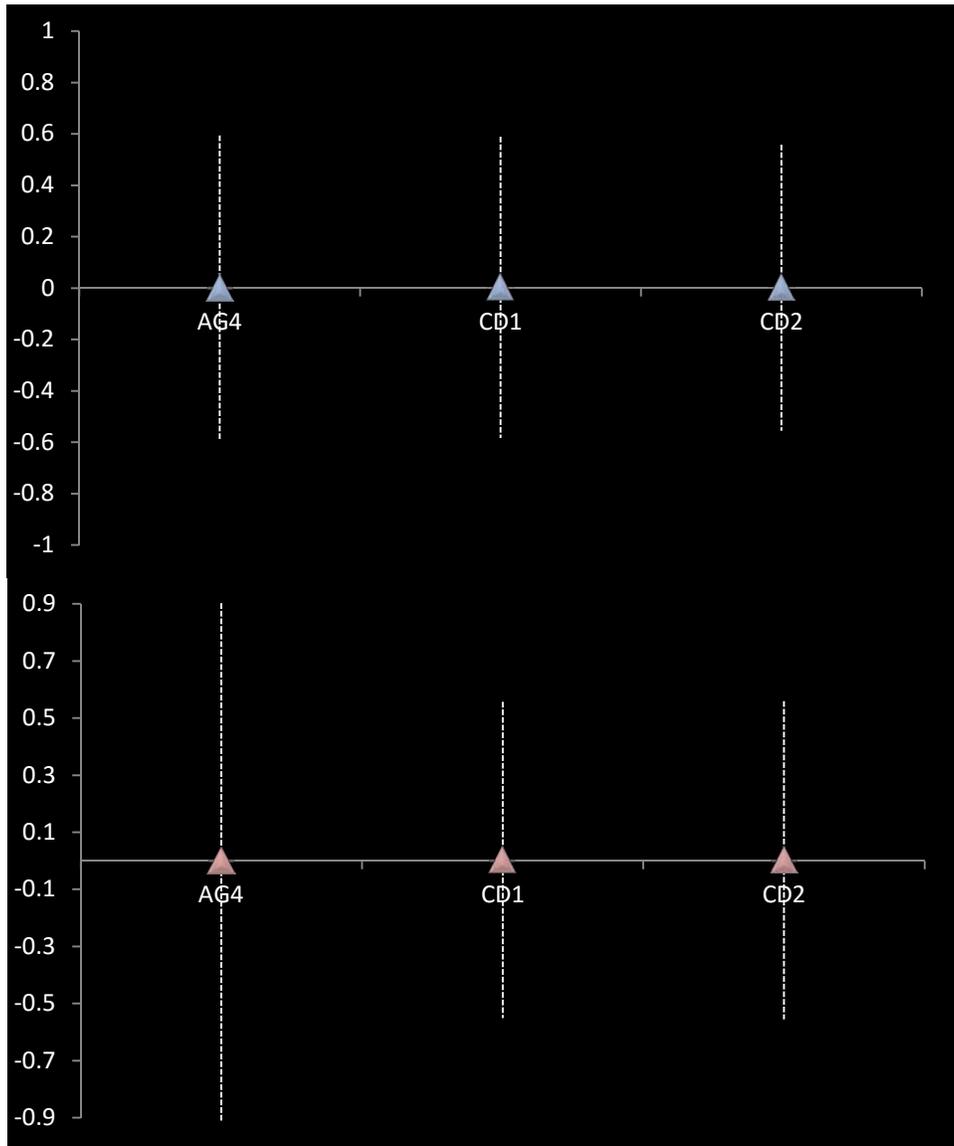


Figura V.17. Gráficos de los intervalos de confianza para la conductividad hidráulica de la hidrofacies B (carga hidráulica inicial constante en Azul y variable en Rojo carga hidráulica inicial variable).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

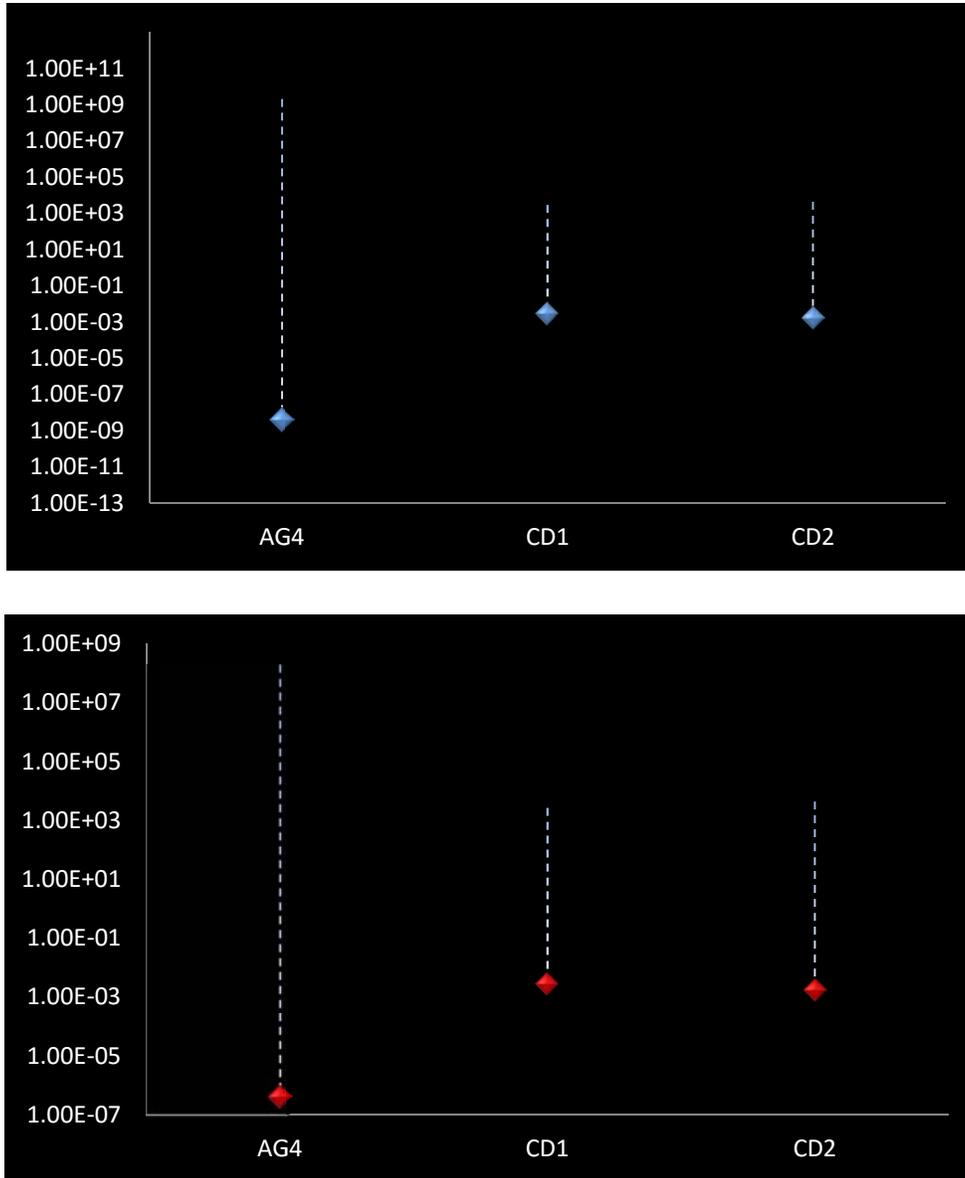


Figura V.18. Gráficos de los coeficientes de variación para la conductividad hidráulica de la hidrofacies B (carga hidráulica inicial constante en Azul y variable en Rojo carga hidráulica inicial variable).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Mientras que en la figura V.17 se muestran los intervalos de confianza muy similares, pero en la figura V.18 se ilustra que los mejor estimados son en Ciudad Deportiva N°1 para la K_B de carga hidráulica constante.

Conductividad hidráulica de la hidrofacies C (K_c)

La conductividad hidráulica de la hidrofacies C se le asocia a las rocas volcánicas que se encuentran a una profundidad de máxima de 300 m; en la zona de las pruebas de bombeo Ciudad Deportiva N°1 y N°2 el espesor de esta hidrofacies es muy pequeño, mientras que en la prueba de bombeo en el pozo Agrícola Oriental N°4 su espesor es considerable y su influencia es más grande. Los valores de conductividad se reportan en la tabla V.12 que van de 0.0015 m/min a 315 m/min. Los valores más altos de conductividad se encuentran en la Agrícola Oriental N°4.

Tabla V.12. Valores de los límites de confianza para la conductividad hidráulica de la hidrofacies C.

Carga constante				
	Límite inferior	Límite superior	Coeficiente de variación	Valor estimado
AG4	-5.252E+06	5.253E+06	2.187E+12	3.154E+02
CD1	-3.257E+02	3.258E+02	6.388E+07	4.154E-02
CD2	-3.588E+02	3.588E+02	2.146E+09	1.500E-03
Carga Variable				
	Límite inferior	Límite superior	Coeficiente de variación	Valor estimado
AG4	-2.020E+04	2.090E+04	3.001E+07	3.518E+02
CD1	-3.389E+02	3.390E+02	6.895E+07	4.165E-02
CD2	-3.588E+02	3.588E+02	2.146E+09	1.500E-03

En la figura V.19 los intervalos de confianza presentan variabilidad en las dos zonas (Ciudad Deportiva y Agrícola Oriental) siendo el de Agrícola Oriental el de un límite muy amplio, derivado que esta hidrofacies C es un medio fracturado y su porosidad es secundaria, producto de los esfuerzos en la roca. La amplitud del intervalo de confianza refleja la incertidumbre asociada al valor estimado. Por su parte, los intervalos de confianza de las pruebas de Ciudad Deportiva N°1 y 2 son más amplios (entre 5 y 6 órdenes de magnitud con respecto al valor estimado) que el AG4 anterior, reflejando la observación de que la extensión de esta hidrofacies es limitada en estos casos y no puede ser estimada.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

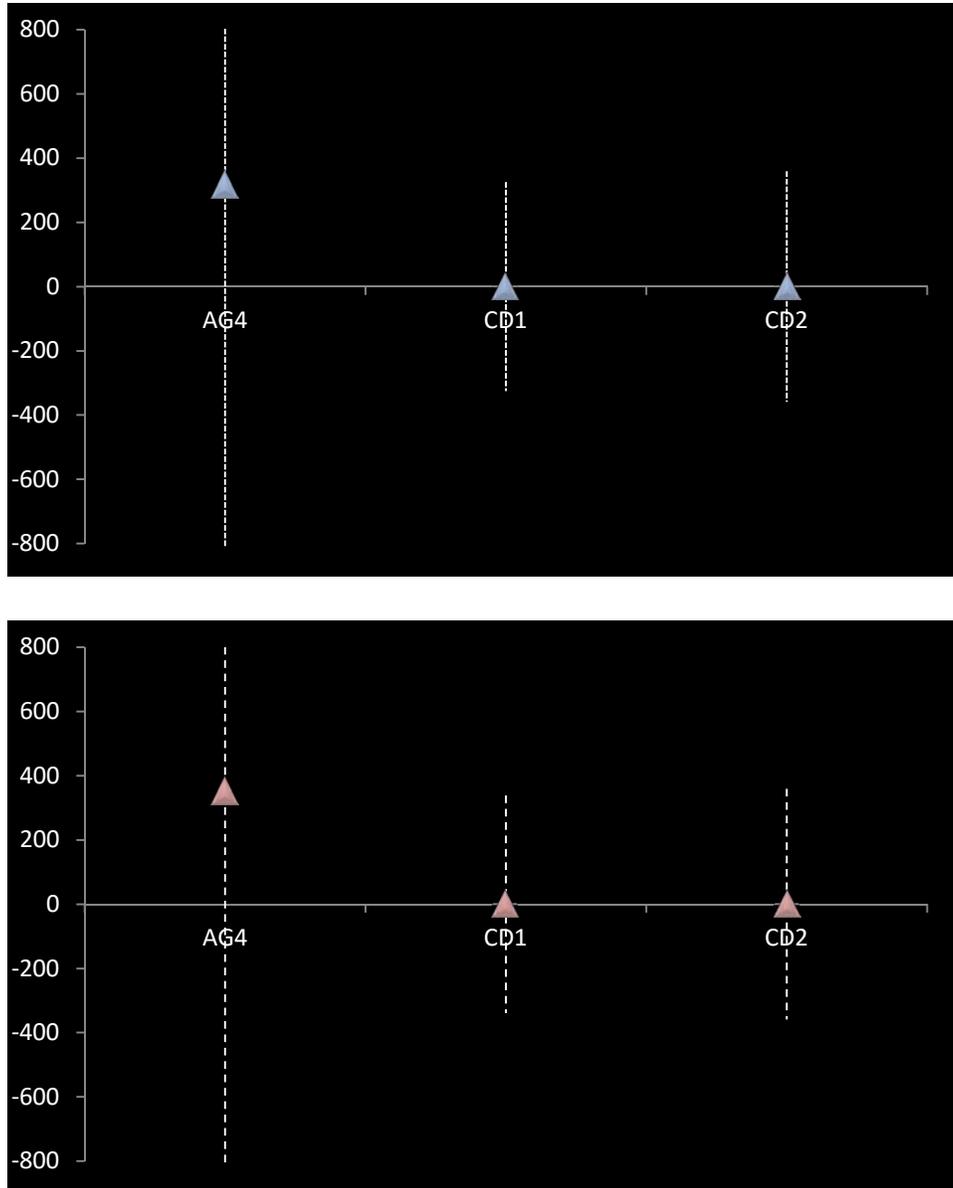


Figura V.19. Gráficos de los intervalos de confianza para la conductividad hidráulica de la hidrofacies C (carga hidráulica inicial constante en Azul y variable en Rojo carga hidráulica inicial variable).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

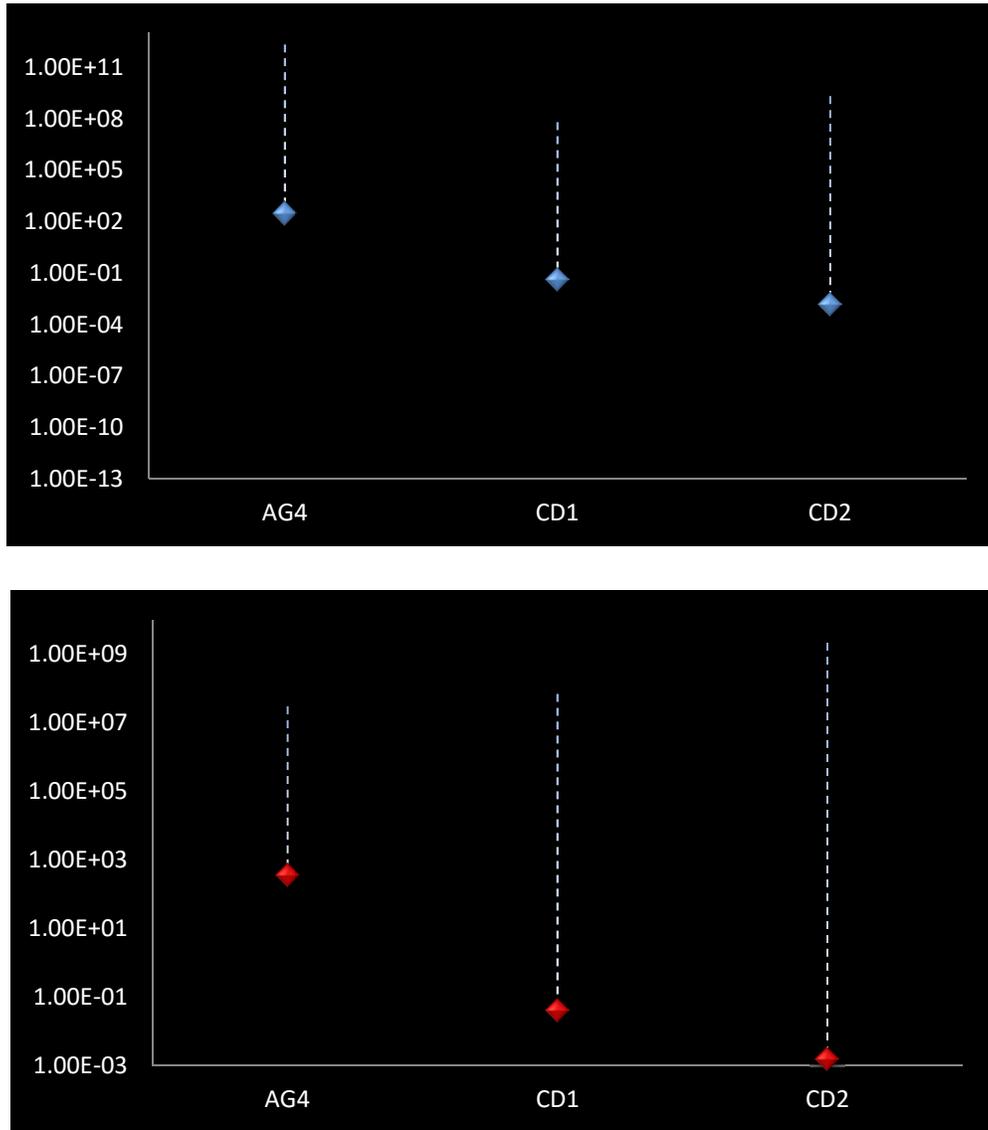


Figura V.20. Gráficos de los coeficientes de variación para la conductividad hidráulica de la hidrofacies C (carga hidráulica inicial constante en Azul y variable en Rojo carga hidráulica inicial variable).

Los valores de coeficientes de variación son menores en los casos de carga hidráulica variable en el caso del pozo Agrícola Oriental estimando que el valor de 351 m/min es el que menor error de estimación tiene (figura V.20).

Conductividad hidráulica de la hidrofacies D (Kd)

La hidrofacies D son los sedimentos con alta conductividad hidráulica y se presentan intercaladas con la hidrofacies B en contacto con la hidrofacies C y en menor proporción a la hidrofacies A. Además de la hidrofacies C, la hidrofacies D presenta una conductividad de 2.2E-4m/min a 2.11E-2 m/min.

Tabla V.13. Valores de los límites de confianza para la conductividad hidráulica de la hidrofacies D.

Carga constante				
	Límite inferior	Límite superior	Coficiente de variación	Valor estimado
AG4	-8.058E-01	8.481E-01	8.098E+02	2.111E-02
CD1	-4.808E-02	4.853E-02	2.604E+02	2.240E-04
CD2	-1.681E-01	1.689E-01	1.757E+03	4.042E-04
Carga Variable				
	Límite inferior	Límite superior	Coficiente de variación	Valor estimado
AG4	-3.851E+00	3.870E+00	4.049E+04	9.202E-03
CD1	-6.628E-02	6.674E-02	4.839E+02	2.285E-04
CD2	-1.681E-01	1.689E-01	1.757E+03	4.042E-04

En la figura V.21 los intervalos de confianza presentan con variabilidad en las dos zonas (Ciudad Deportiva y Agrícola Oriental) siendo el de Agrícola Oriental el de un límite muy amplio. El mejor ajustado es el valor de la prueba de bombeo Ciudad Deportiva N°1 de $2.2E-4$ m/min. El efecto de la carga hidráulica variable o constante en este parámetro es mínimo, siendo ambos valores de correctos.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

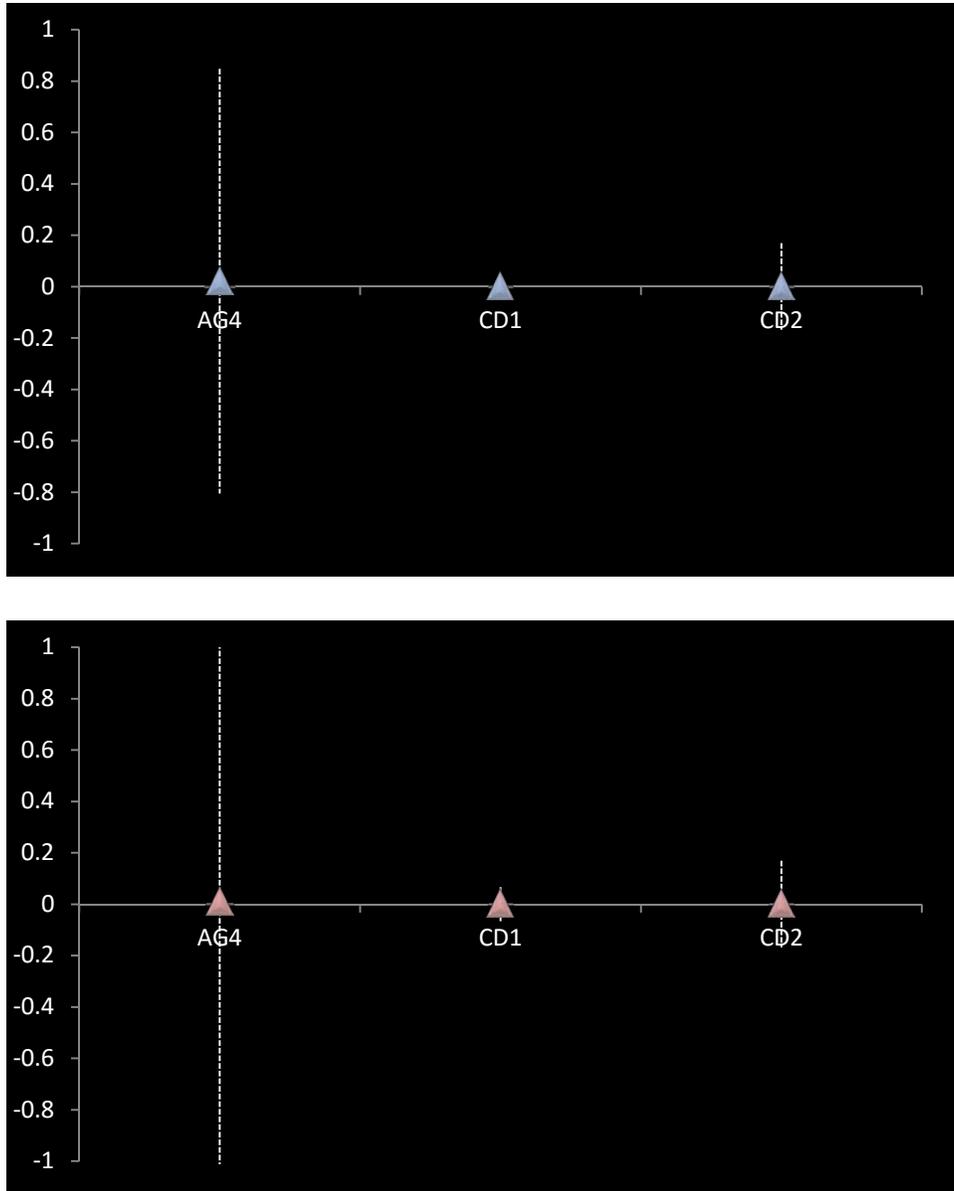


Figura V.21. Gráficos de los intervalos de confianza para la conductividad hidráulica de la hidrofacies D (carga hidráulica inicial constante en Azul y variable en Rojo carga hidráulica inicial variable).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

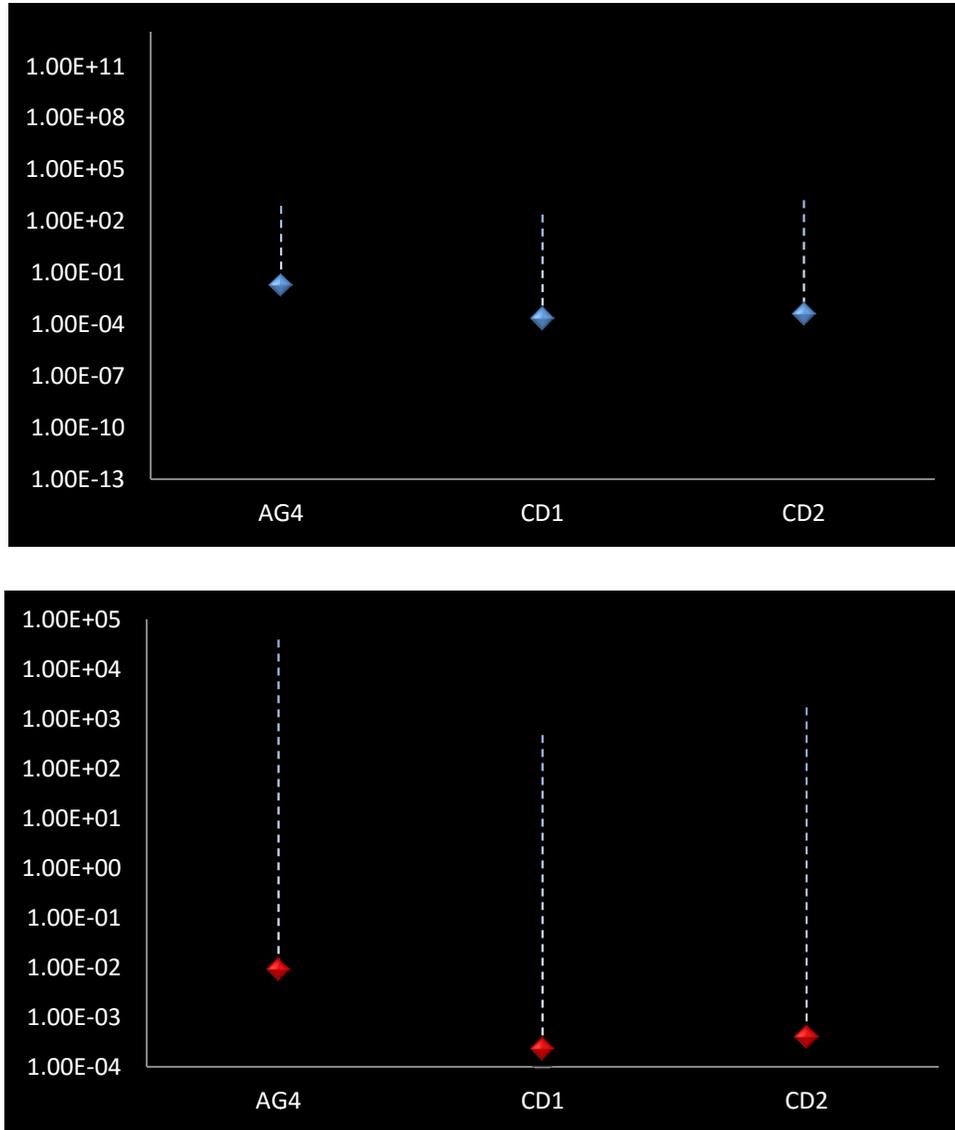


Figura V.22. Gráficos de los coeficientes de variación para la conductividad hidráulica de la hidrofacies D (Azul, carga hidráulica constante y Rojo, carga hidráulica variable).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

De acuerdo a los coeficientes de variación las mejores estimaciones son las de carga hidráulica constante y entre ellos el valor del pozo Agrícola Oriental N°4. (Figura V.22).

Almacenamiento específico de la hidrofacies A (Ssa)

El almacenamiento específico de la hidrofacies A esta asociada a la arcilla superficial de la cuenca de México. Este valor de coeficiente varía de acuerdo si está en la Agrícola Oriental o en la Ciudad Deportiva de 1.02E-3 a 1.012E-8. Los valores de intervalos de confianza son muy pequeños (figura V.23) y muy similares con los de carga hidráulica constante y carga variable.

Tabla V.14. Valores de los limites de confianza para el almacenamiento específico de la hidrofacies A (Ssa).

Carga constante				
	Límite inferior	Límite superior	Coeficiente de variación	Valor estimado
AG4	-0.166343	0.168387	6.852E+02	0.001021948
CD1	-0.002265196	0.00226552	7.926E+02	1.61871E-07
CD2	-0.007185869	0.007189771	6.621E+02	1.95092E-06
Carga variable				
	Límite inferior	Límite superior	Coeficiente de variación	Valor estimado
AG4	-0.594812	0.597183	7.491E+03	0.0011855
CD1	-0.004670555	0.004670575	5.387E+04	1.01235E-08
CD2	-0.007185869	0.007189771	6.621E+02	1.95092E-06

De acuerdo a los valores de los coeficientes los mejores estimaciones de los coeficientes de almacenamiento son los de carga hidráulica en orden de menor a mayor error: Ciudad Deportivo N°2, Agrícola Oriental N°4 y después Ciudad Deportiva N°1.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

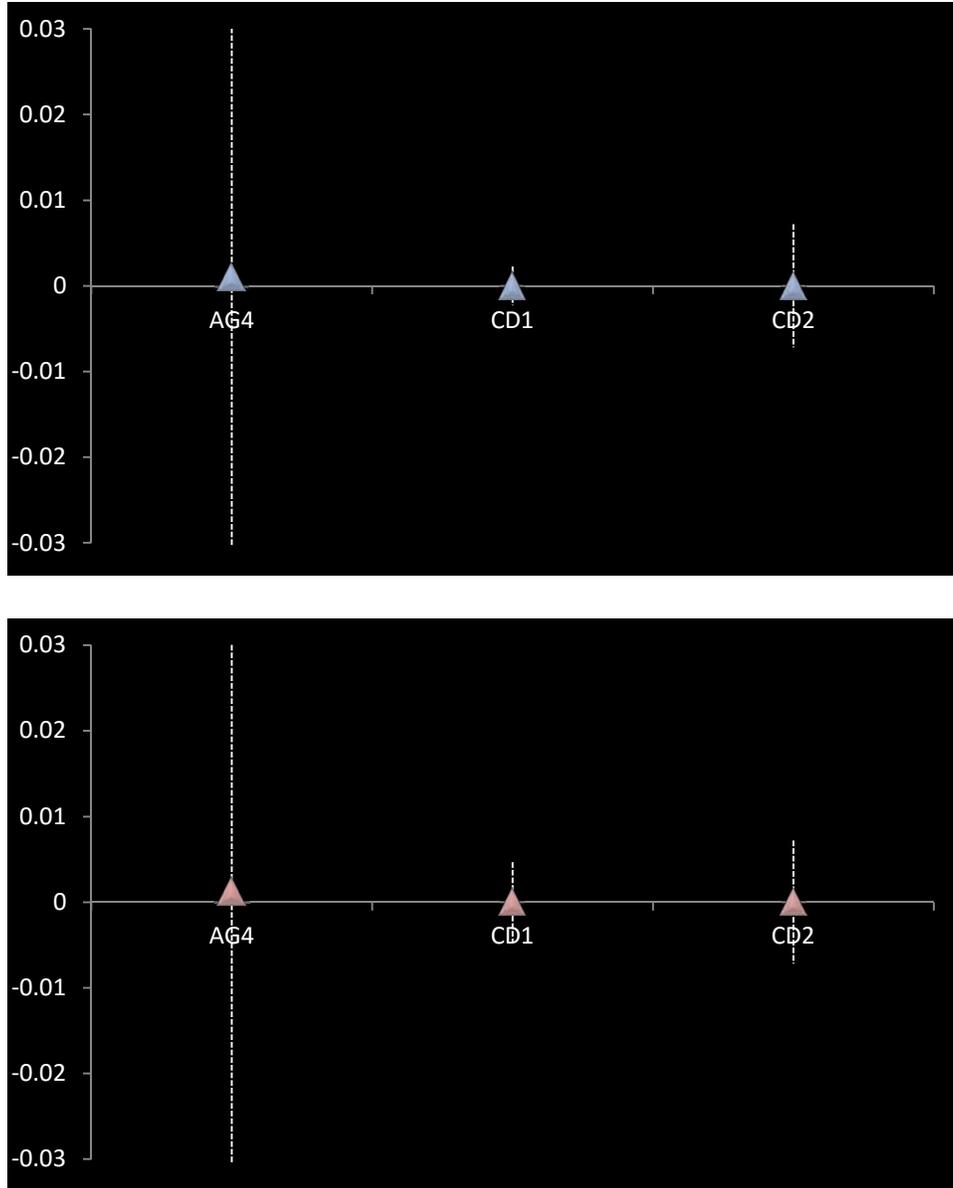


Figura V.23. Gráficos de los intervalos de confianza para el almacenamiento específico de la hidrofacies A. (Carga hidráulica inicial constante en Azul y variable en Rojo carga hidráulica inicial variable).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

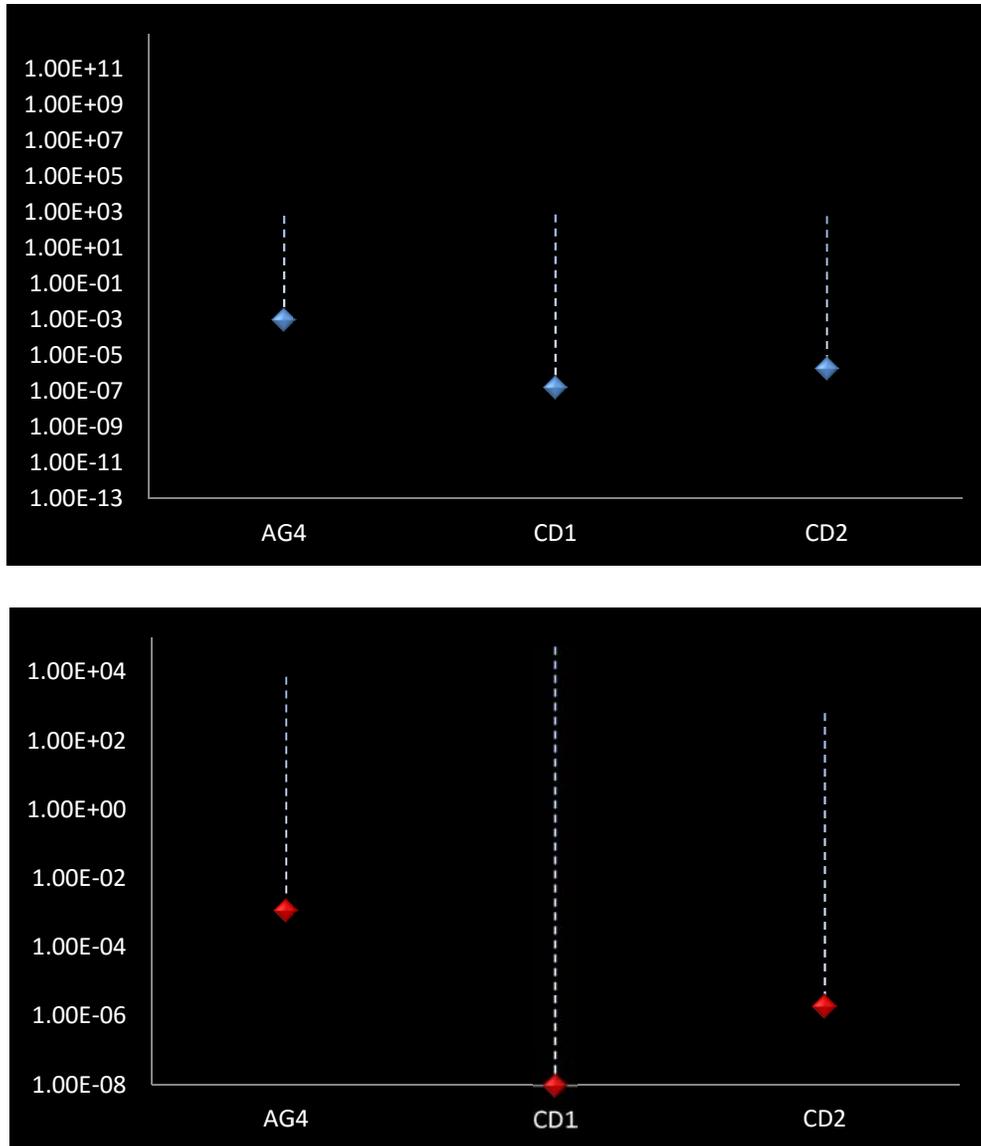


Figura V.24. Gráficos de los coeficientes de variación para la para el almacenamiento específico de la hidrofacies A. (carga hidráulica inicial constante en Azul y variable en Rojo carga hidráulica inicial variable).

Almacenamiento específico de la hidrofacies B (Ssb)

El valor del almacenamiento específico de la hidrofacies B varía en dos órdenes de magnitud de acuerdo si está en la Agrícola Oriental o en la Ciudad Deportiva y son de $1.10E-7$ a $4.68E-5$. Los valores de los intervalos de confianza son muy pequeños (figura V.25) y similares con los de carga hidráulica constante y carga variable. El que presenta un intervalo de confianza más amplio es de Ciudad Deportiva N°1 con carga variable.

Tabla V.15. Valores de los límites de confianza para el almacenamiento específico de la hidrofacies B.

Carga constante				
	Límite inferior	Límite superior	Coefficiente de variación	Valor estimado
AG4	-3.841E-01	3.842E-01	7.881E+04	4.680E-05
CD1	-3.193E+00	3.193E+00	2.179E+09	1.170E-07
CD2	-1.331E-01	1.331E-01	3.785E+06	1.170E-07
Carga Variable				
	Límite inferior	Límite superior	Coefficiente de variación	Valor estimado
AG4	-3.888E-01	3.888E-01	3.231E+05	1.170E-05
CD1	-1.283E+02	1.283E+02	3.517E+12	1.170E-07
CD2	-1.331E-01	1.331E-01	3.785E+06	1.170E-07

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

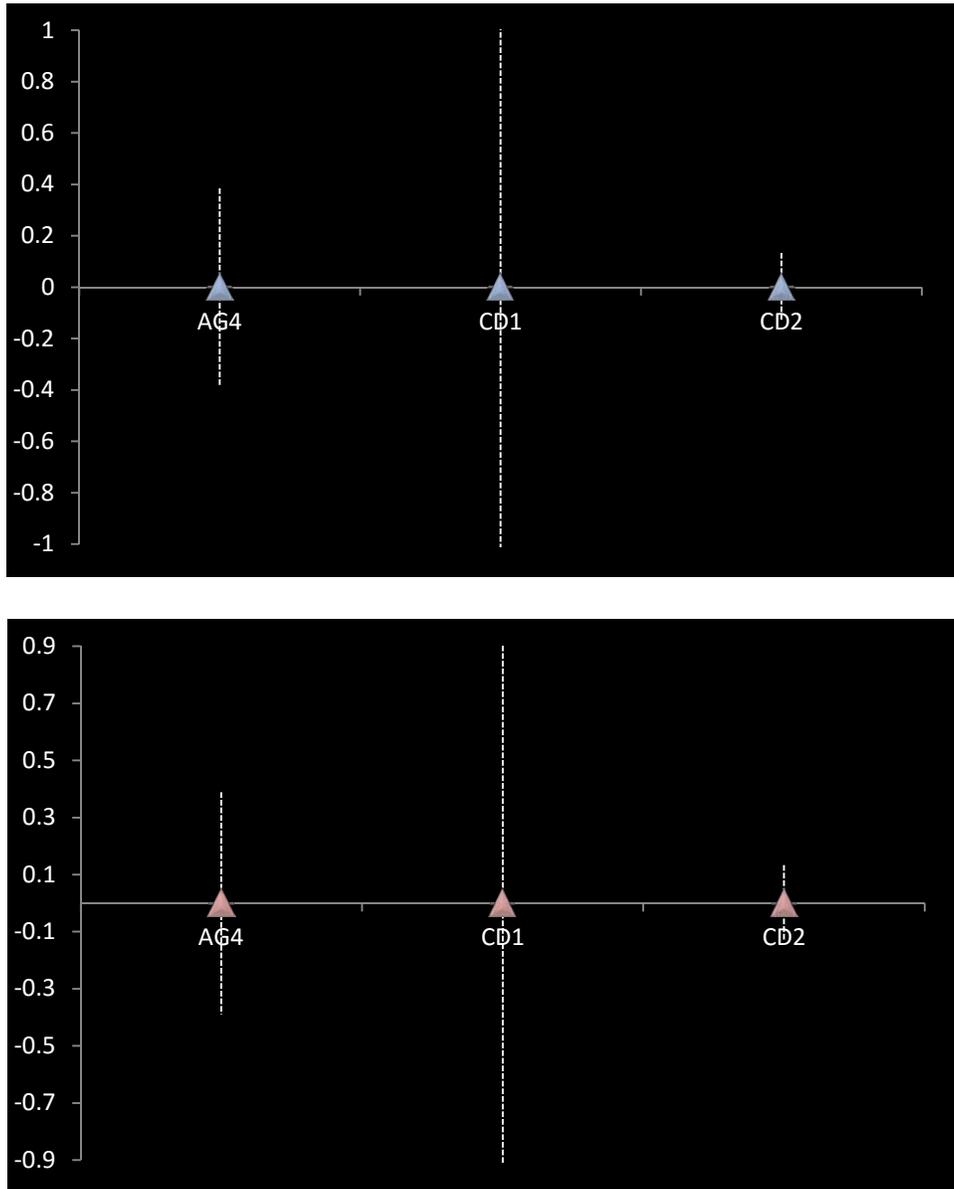


Figura V.25. Gráficos de los intervalos de confianza para el almacenamiento específico de la hidrofacies B. (carga hidráulica inicial constante en Azul y variable en Rojo carga hidráulica inicial variable).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

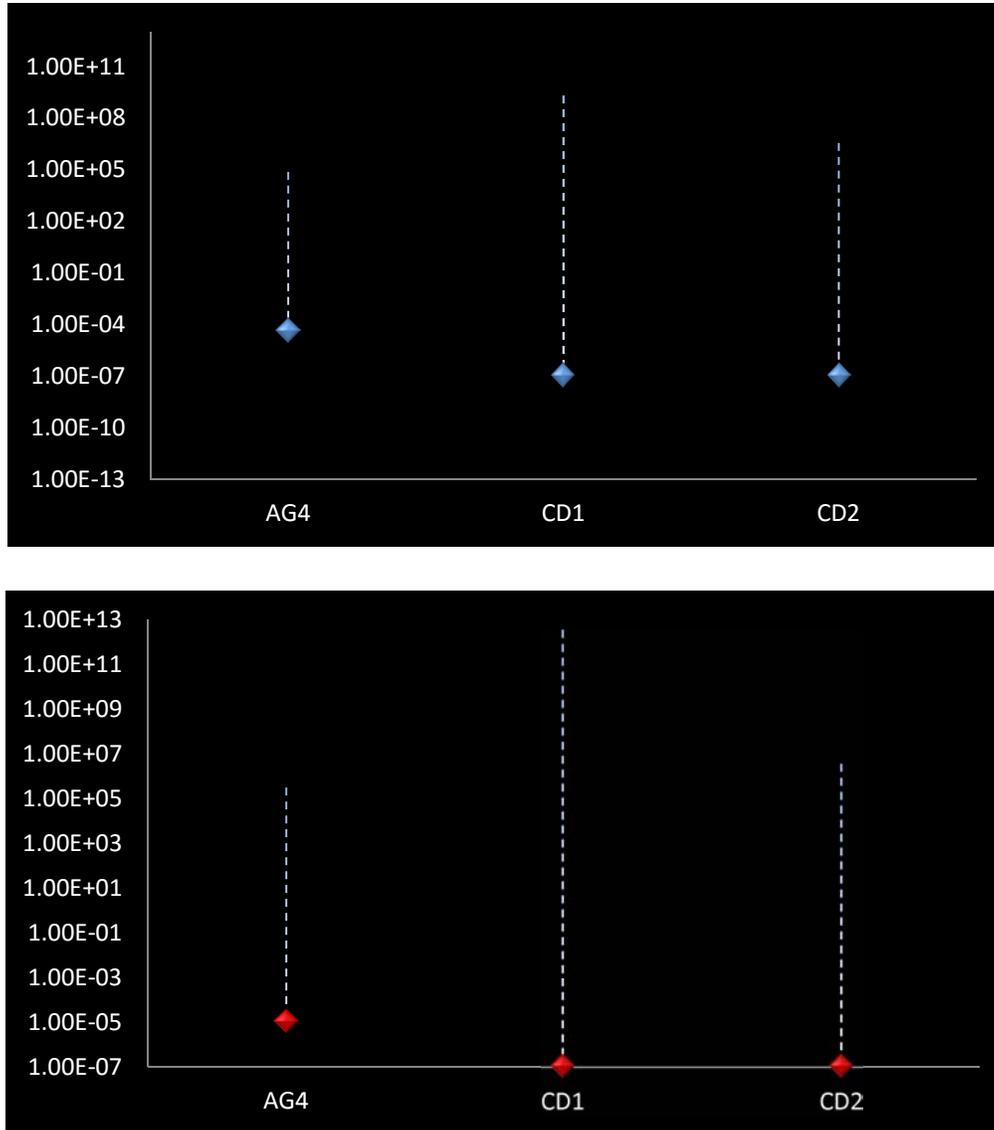


Figura V.26. Gráficos de los coeficientes de variación para la para el almacenamiento específico de la hidrofacies B. (carga hidráulica inicial constante en Azul y variable en Rojo carga hidráulica inicial variable).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

En la figura V.26 se logra observar que los valores del coeficiente de almacenamiento específico de la hidrofacies B es el mismo para carga variable y constante en el pozo Ciudad Deportiva N°2, el valor mejor estimado es el del pozo Agrícola Oriental de $4.68E-5$.

Almacenamiento específico de la hidrofacies C (Ssc)

El almacenamiento específico de la hidrofacies C entre todas las pruebas de bombeo varía en un orden de magnitud con valores de $1.5E-5$ a $9.81E-7$ de acuerdo si se encuentra en la Agrícola Oriental o en la Ciudad Deportiva. Los valores de intervalos de confianza son muy pequeños (figura V.27) y similares en comparación con los de carga hidráulica constante y carga variable.

Tabla V.16. Valores de los límites de confianza para el almacenamiento específico de la hidrofacies C.

Carga constante				
	Límite inferior	Límite superior	Coeficiente de variación	Valor estimado
AG4	-3.664E-01	3.664E-01	2.238E+05	1.500E-05
CD1	-6.537E-03	6.540E-03	9.940E+02	1.075E-06
CD2	-2.635E-02	2.636E-02	2.348E+03	7.394E-06
Carga Variable				
	Límite inferior	Límite superior	Coeficiente de variación	Valor estimado
AG4	-1.763E-01	1.764E-01	1.299E+04	5.990E-05
CD1	-7.318E-03	7.320E-03	1.364E+03	9.816E-07
CD2	-2.635E-02	2.636E-02	2.348E+03	7.394E-06

Con los coeficientes de variación (figura V.28) los valores que tienen mejor error son los que fueron estimados con cargas hidráulicas constantes. El valor mejor estimado es el de Ciudad Deportiva N°1.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

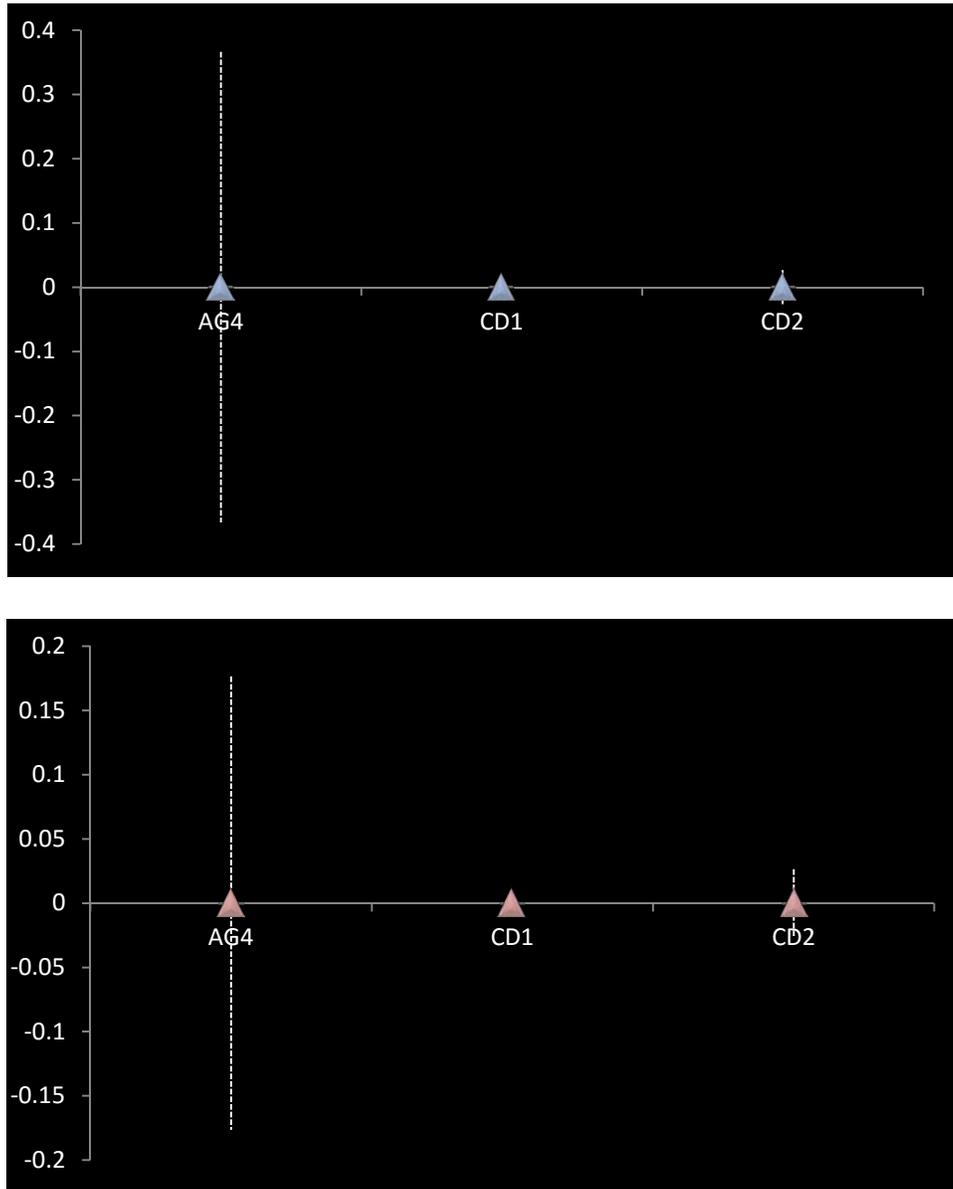


Figura V.27. Gráficos de los intervalos de confianza para el almacenamiento específico de la hidrofacies C. (carga hidráulica inicial constante en Azul y variable en Rojo carga hidráulica inicial variable).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

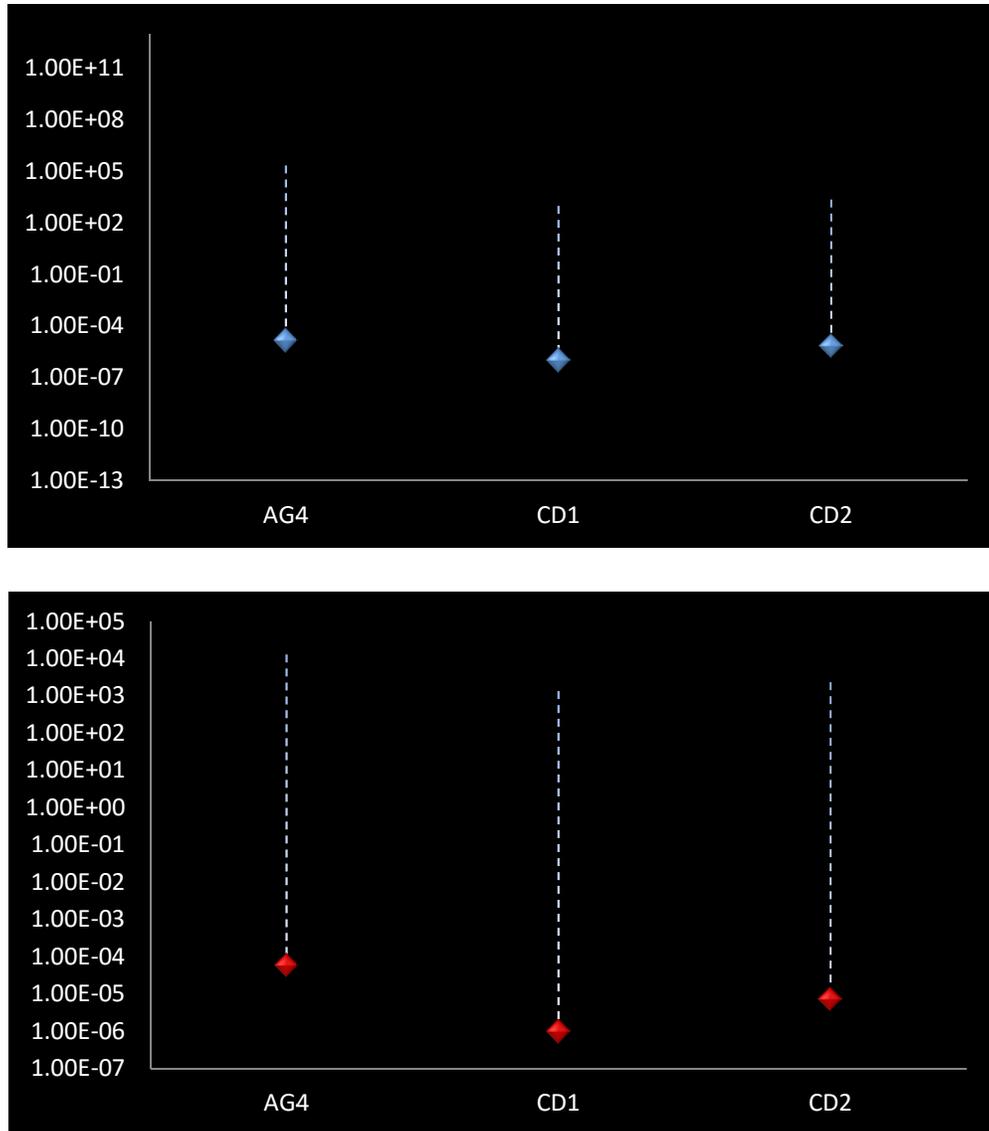


Figura V.28. Gráficos de los coeficientes de variación para la para el almacenamiento específico de la hidrofacies C. (carga hidráulica inicial constante en Azul y variable en Rojo carga hidráulica inicial variable).

Almacenamiento específico de la hidrofacies D (Ssd)

El almacenamiento específico de la hidrofacies D tiene una variación en dos órdenes de magnitud dependiendo de la zona. Este valor varía de $6.43E-5$ a $2.16E-7$ (figura V.29).

Tabla V.17. Valores de los límites de confianza para el almacenamiento específico de la hidrofacies D.

Carga Constante				
	Límite inferior	Límite superior	Coefficiente de variación	Valor estimado
AG4	-2.324E-01	2.326E-01	2.101E+04	6.430E-05
CD1	-3.191E+00	3.191E+00	2.176E+09	1.170E-07
CD2	-1.517E-01	1.517E-01	6.788E+05	8.470E-07
Carga Variable				
	Límite inferior	Límite superior	Coefficiente de variación	Valor estimado
AG4	-7.464E-01	7.465E-01	2.550E+05	5.461E-05
CD1	-1.283E+02	1.283E+02	1.897E+12	2.169E-07
CD2	-1.517E-01	1.517E-01	6.788E+05	8.474E-07

Los valores que tienen los intervalos mejor calculados son los que tienen cargas hidráulicas iniciales constantes, mientras que con los valores de intervalos de confianza se amplían son los que tienen carga hidráulica inicial variable. Siendo el de Ciudad Deportiva N° 2 el que conserva el valor de este parámetro muy cercano en ambos casos.

De acuerdo con los coeficientes de variación el mejor parámetro estimado es con carga hidráulica inicial constante del pozo Agrícola Oriental N°4 (Figura V.30).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

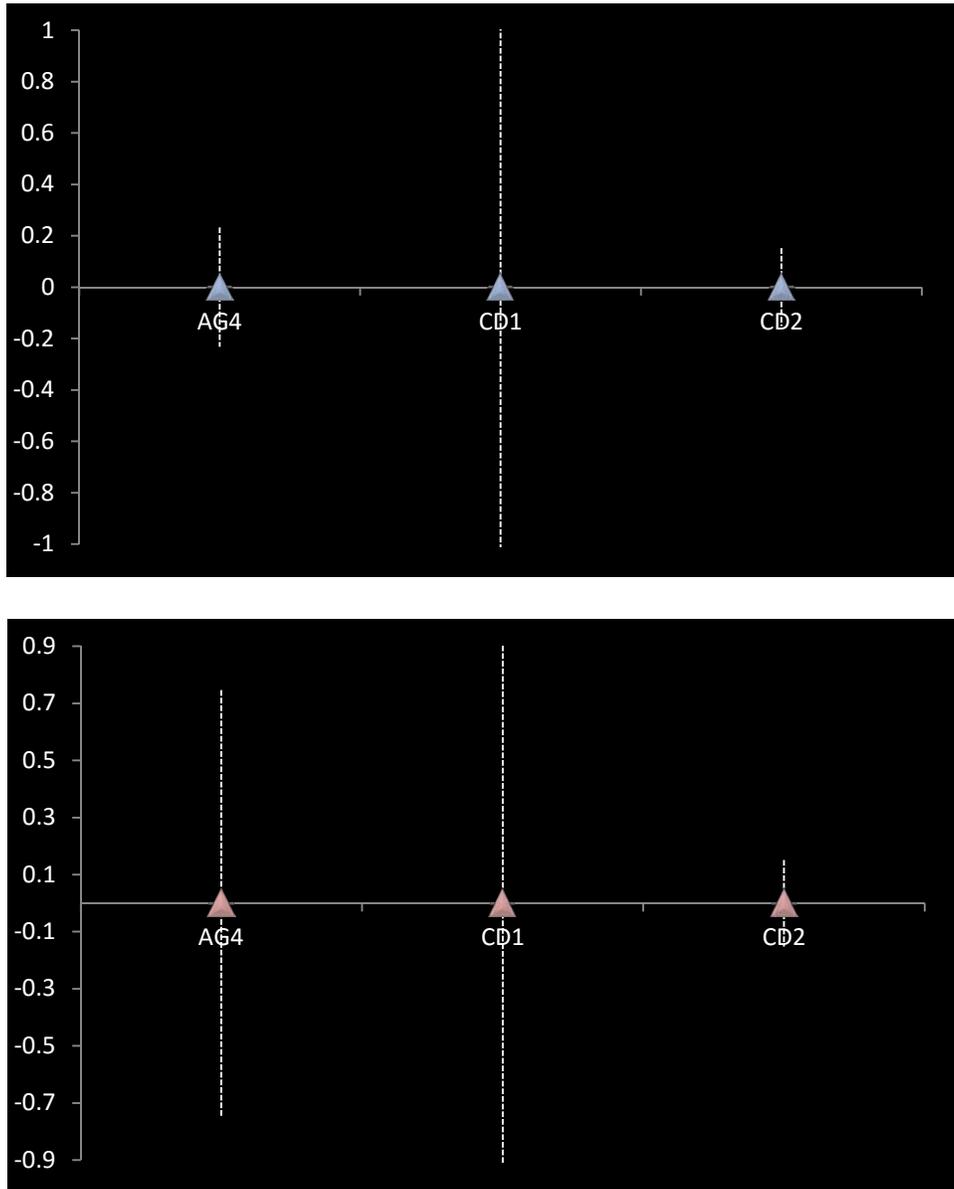


Figura V.29. Gráficos de los intervalos de confianza para el almacenamiento específico de la hidrofacies D. (carga hidráulica inicial constante en Azul y variable en Rojo carga hidráulica inicial variable).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

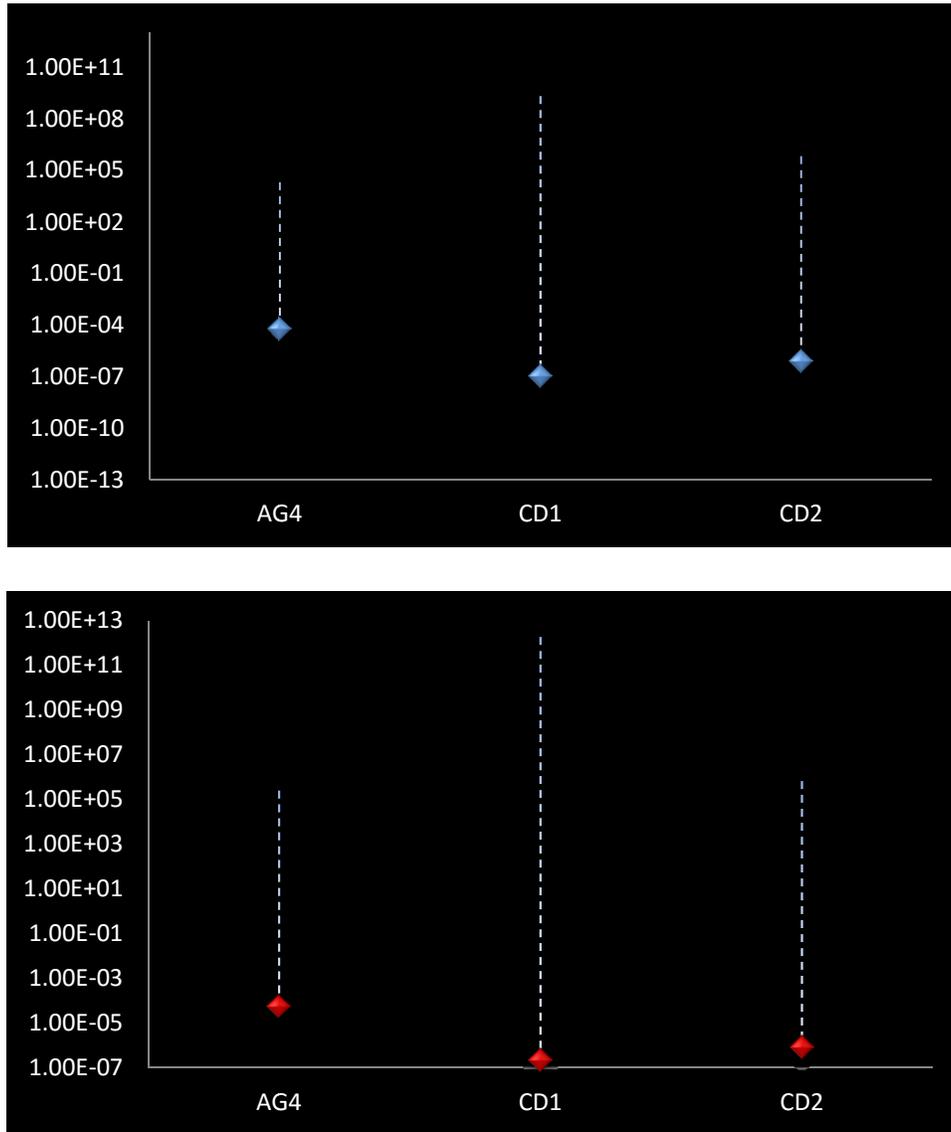


Figura V.30. Gráficos de los coeficientes de variación para la para el almacenamiento específico de la hidrofacies D (carga hidráulica inicial constante en Azul y variable en Rojo carga hidráulica inicial variable).

Conclusiones

Este trabajo se logró obtener un modelo tridimensional de hidrofacies a partir de geoestadística indicador y con ello obtener la variabilidad espacial de una porción del cuerpo aluvial. Y consiguiendo distinguir la heterogeneidad que no es representada en escala regional ni local en trabajos anteriormente citados.

La variabilidad espacial de las hidrofacies del aluvión es producto de la evolución geológica reciente de la cuenca de México, dado que presenta varios episodios que varían con actividad volcánica, ambientes de abanicos aluviales y lacustres. A manera de resultado la capa aluvial es una mezcla heterogénea de sedimentos y rocas de origen sedimentario y volcánico. Esta mezcla genera una variabilidad que de acuerdo a nuestra clasificación de hidrofacies en la zona es la siguiente: la hidrofacies A es la capa superior que se distribuye en forma continua y se encuentra en contacto con las hidrofacies B, C y D; la hidrofacies B presenta mayor distribución a profundidad y envuelve a los lentes de las hidrofacies D y rodea a la hidrofacies C, la hidrofacies C está localizada principalmente en zonas como el Cerro de la estrella, Peñón de los baños y sierra Santa Catarina.

La obtención de los modelos tridimensionales se realizaron por dos métodos: kriging indicador y simulación secuencial indicador condicional, siendo este último el seleccionado para la modelación inversa por producir resultados con una apariencia más realista en la distribución espacial de las hidrofacies.

Para cada hidrofacies se estimaron parámetros hidráulicos mediante la modelación inversa de tres pruebas de bombeo: Agrícola Oriental N°4, Ciudad Deportiva N°1 y Ciudad Deportiva N°2. Puesto que únicamente se contó con datos de abatimiento en los pozos de bombeo, se adoptó el supuesto de que cada hidrofacies es homogénea. Los parámetros hidráulicos estimados fueron conductividades hidráulicas y coeficientes de almacenamiento de las hidrofacies. Adicionalmente, para la condición inicial se probaron dos posibilidades: no flujo

inicial (equivalente a carga hidráulica inicial constante, que es el supuesto típico que se adopta en la interpretación de pruebas de bombeo) y carga hidráulica variable representando el flujo vertical descendente desde el acuitardo debido a la explotación intensiva del acuífero. Como resultado de la modelación inversa se obtuvieron los parámetros estimados y la covarianza del error de estimación de dichos parámetros; esta última proporciona una medida de la incertidumbre involucrada en los valores estimados de cada parámetro. De los resultados obtenidos de la inversión no fue posible determinar cuál opción de condición inicial (carga hidráulica constante o variable) es la más adecuada. Ambos casos produjeron resultados similares en términos del error de estimación y la magnitud de los parámetros estimados. Adicionalmente, puesto que las pruebas de bombeo no superan las 12 hrs, es posible que el flujo del acuitardo al acuífero no haya sido significativo durante el tiempo de la prueba.

Para la carga hidráulica inicial constante las conductividades hidráulicas son las siguientes: K_a varía entre $1E-13(m/min)$ a $1.57E-5 (m/min)$, K_b se encuentra $4.10E-9(m/min)$ y $2.88E-3(m/min)$, K_c tiene un intervalo de $1.5E-3 (m/min)$ a $3.15E2 (m/min)$ y K_d varía de $4.04E-4(m/min)$ a $2.11E-2(m/min)$. Para la carga hidráulica inicial variable las conductividades hidráulicas son las siguientes: K_a es de $1E-13(m/min)$, K_b se encuentra $4.1E-7(m/min)$ y $2.84E-3(m/min)$, K_c tiene un intervalo de $1.5E-3 (m/min)$ a $3.52E2 (m/min)$ y K_d varía de $9.20E-3 (m/min)$ a $4.04E-4(m/min)$.

Se concluye que es posible obtener una mejor representación de la variabilidad espacial de una unidad hidrogeológica mediante la definición de hidrofacies, el análisis geoestadístico de registros litológicos de pozos y utilizando modelación inversa de pruebas de bombeo para estimar parámetros de las hidrofacies. Para que esta metodología sea de mayor utilidad, en trabajos futuros se deben considerar los siguientes factores:

- *Considerar formalmente en el análisis geoestadístico el error inherente en los registros litológicos debidos a diferentes criterios de agrupación de sedimentos/rocas por cada geólogo de campo en cada perforación y los errores de muestreo asociados.*
- *Es necesario contar con pruebas hidráulicas (de bombeo) en las que se registre el abatimiento en varios puntos del sistema hidrogeológico (acuíferos y acuitardos) para estar en condiciones de estimar, con menor incertidumbre, parámetros en diferentes hidrofacies, En estas condiciones se podría utilizar una técnica conocida como tomografía hidráulica para estimar parámetros variables en el sistema.*

Bibliografía

1. Aguilera-Franco, N., 2000, High resolution Stratigraphy and Paleocology of the Cenomanian-Turonian succession, Southern Mexico, Londres, Inglaterra, University of London, tesis doctoral, 239 p.
2. Alencaster, G., 1980, Moluscos del Maastrichtiano de Texmalac, Guerrero: Sociedad Geológica Mexicana, Libro guía de la excursión geológica a la cuenca del alto Río Balsas, 39-42 p.
3. Anderson, M. P., 1987, Field studies in groundwater hydrology—A new era, Rev. Geophysics., 25(2), 141–147 p.
4. Anderson, Mary P., Woessner, W., 1992, Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport, Academic Press, 381 p.
5. Anderson, M. P., Aiken, J. S., Web, E. K., Mickelson, D. m., 1999, Sedimentology and hydrogeology of two braided stream deposits, Sedimentary Geology, 129, 187-199 p.
6. Ángeles-Serrano, G., 2001, El funcionamiento de los sistemas de flujo y su manejo a través del agua subterránea obtenida: Iztapalapa, Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis de maestría, 112 p.
7. Baafi, E.Y., Lenergan, J. E., Barua, S. L., Kim, Y. C., 1982, Condensed user's manual for basic geostatistics systems , Dept. of minig and geological engineering, University of Arizona.
8. Bastin, G., Gevers, M., 1985, Identification and optimal estimation of random fields from scattered point-wise data, Automatica, 20(2), 139-155.

9. Benavides-Muñoz, M.E., 1978, Estudio Geológico del Municipio de Cualac, Estado de Guerrero, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, tesis profesional, 71 p.
10. Candy, J. V., Mao, N., 1981, Nuclear waste repository characterization a spatial estimation/ identification approach, Proc. Of the 8th Triennial World Congress IFAC Control Science and Technology, Kyoto, 629-636 p.
11. Carrasco, N., G., 1985, Estudio geológico del volcán Popocatepetl, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis profesional, 138p.
12. Carrillo, N., 1969, El hundimiento de la Ciudad de México, Proyecto Texcoco. Secretaría de Hacienda y Crédito Público. NAFINSA.
13. Carrillo-Martínez, M., 1981, Contribución al estudio geológico del Macizo Calcáreo El Doctor, Querétaro, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 5(1), 25-29 p.
14. Cedillo, A. O., Sepúlveda, R. M. A., Rodríguez, C. F. N., 2008, Estudio de los suelos en la Sierra de Guadalupe. Sitio de estudio: Cañadas La Mora y La Mora 2. Determinación de granulometría, porosidad y permeabilidad, Revista Sistemas Ambientales, 2(1), 1-11p.
15. Cruickshank, C., Herrera, R., Yates, R., Hennart, J. P., Balarezo, D. R., Magaña, R., 1979; Modelo de predicción del hundimiento del Valle de México. Departamento del Distrito Federal.
16. De Cserna, Z., 1978, Notas sobre la geología de la región comprendida entre Iguala, Ciudad Altamirano y Temascaltepec, Estado de Guerrero y México, en Libro guía de la Excursión Geológica a Tierra Caliente, México, Sociedad Geológica Mexicana, 25 p.

17. De Cserna, Z., De la Fuente-Duch, M., Palacios-Nieto, M., Triay, L., Mitre-Salazar, L.M., Mota-Palomino, R., 1988. Estructura geológica, gravimetría, sísmicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología 104, 66 p.
18. Delhomme, J. P., 1978, Kriging in the hydrosciences, *Advances in Resources*, I, 251-266 p.
19. Dell’Arciprete, D., Bersezio, R., Felletti, F., Giudici, M., Comunian, A., Renand, P., 2012, Comparison of three geostatistical methods for hidrofacies simulations: a test on alluvial sediments, *Hydrogeology Journal* 20, 299-311 p.
20. Deutsh, C., Journel, A., 1998, *GSLIB. Geoestatistical software library and user’s guide*. Oxford University Press. 2da edición, New York, 369 p.
21. Departamento del Distrito Federal–Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DDF–DGCOH), 1982, *El sistema hidráulico de Distrito Federal*.
22. Departamento del Distrito Federal–Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DDF–DGCOH), 1992, *Políticas de extracción de agua del subsuelo mediante el modelo matemático de abatimiento-hundimientos*. Elaborado por Lesser y Asociados, S. A de C.V.
23. Departamento del Distrito Federal–Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DDF–DGCOH), 1994, *Fichas de la nivelación de bancos de nivel implantados por la DGCOH en la ciudad de México y área metropolitana: México, D.F., Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, Fichas anuales*.
24. Doherty, J., and Hunt, R.J., 2010, Response to comment on “Two statistics for evaluating parameter identifiability and error reduction”. *Journal of Hydrology*. 380, 489-496.

25. Doherty, J., 2005, PEST. Model-Independent Parameter Estimation, User Manual:5th Edition, Watermark Numerical Computing, 333p.
26. Donoso, G. A., 2010, Simulación multipunto de indicadores para la caracterización de variables continuas, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, tesis profesional, 60 p.
27. Falivene, O., Arbués, P., Gardiner, A., Pickup, G., Muñoz, J. A., Cabrera, L., 2006. Best practice stochastic facies modeling from a channel-fill turbidite sandstone analog (the Quarry outcrop, Eocene Ainsa basin, northeast Spain), The American Association of Petroleum Geologist (AAPG) 90(7), 1003-1009 p.
28. Falivene, O., Cabrera, L., Muñoz, J. A., Fernández, O., Saéz, A., 2007a. Statistical grid-based facies reconstruction and modelling for sedimentary bodies. Alluvial-Palustrine and turbiditic examples, Geologica acta: International Earth Science Journal 5(3), 199-203 p.
29. Falivene, O., Cabrera, L., Saéz, A., 2007b, Large to intermediate-scale aquifer heterogeneity in fine-grain dominated alluvial fans (Cenozoic As Pontes Basin, northwestern Spain): insight based on three-dimensional geostatistical reconstruction, Hydrogeology Journal 15, 861-876 p.
30. Fogg, G.E., 1986, groundwater flow and sand body interconnectedness in a thick, multiple aquifers system Water Resources, 22(5), 679-694p.
31. Fogg, G. E., Noyes, C. D., 1998, Geologically based model heterogeneous hydraulic conductivity in an alluvial setting, Hydrology Journal, 6, 131-143 p.

32. Fries, C. Jr., 1956, Bosquejo geológico de la Región entre México, D.F. y Acapulco, Gro., en Excursiones A-9, Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 19(5-6), 285-330 p.
33. Frías, C. Jr., 1957, Bosquejo geológico de la región entre México D. F., y Acapulco, Guerrero en Benavides G., L. (ed.), Geología a lo largo de la carretera entre México, D. F. y Acapulco, Gro., vía Taxco, Gro. Geología de los alrededores de Acapulco, Gro. Los yacimientos de El Ocotito, Gro, Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 9(5-6), Excursiones A-9 y C12, 287-333.
34. Fries, C. Jr., 1958, Geology of the State of Morelos and contiguous areas in South-Central, Mexico: United States, University of Arizona, tesis doctoral, 329 p.
35. Frías, C. Jr., 1960, Geología del Estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México, Universidad Nacional Autónoma de México: Boletín del Instituto de Geología, 60, 236 p.
36. Frías, C. Jr., 1962, Resumen de la geología de la hoja Pachuca, Estados de Hidalgo y México. Hoja Pachuca 14Q-c (11) escala 1:100 000. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología.
37. Gringarten, E., Deutsch, C. V., 2001, Variogram interpretation and modeling – Teacher's Aide. Mathematical Geol., 33(4), 507–534.
38. Green, B. M., Swift D. J., 2001, Geoestadística y análisis multivariado e la definición de la heterogeneidad física del subsuelo en el acuífero experimental de Oyster, Virginia, US, En: Unión Geofísica Mexicana AC.
39. Guadagnini, L., Guadagnini, A., Tartakovsky, D. M., 2004, Probabilistic reconstruction of geologic facies, Journal of hydrology, 294, 57-67p.

40. Guerrero-Suástegui, M., 2004, Depositional and tectonic history of The Guerrero Terrane, Sierra Madre del Sur; with emphasis on sedimentary successions of the Teloloapan area, southwestern Mexico: Newfoundland, Canada, University of Newfoundland, tesis doctoral, 332 p.
41. Harbaugh, A. W., 2005, MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process. Reston, VA, USA: US Department of the Interior, US Geological Survey, 6-A29.
42. Heinz, J., Kleineidam, S., Teutsch, G., Aigner, T., Heterogeneity patterns of Quaternary glaciofluvial gravel bodies (SW-Germany): application to hydrogeology, *Sedimentary Geology*, 158, 1-23 p.
43. Johnson, N. M., Dreiss, J., 1989, Hydrostratigraphic interpretation using indicator geostatistics, *Water Resources Research* 25(12), 2501-2510 p.
44. Johnson, N. M., 1995, Characterization of alluvial hydrostratigraphy with indicator semivariograms, *Water Resources Research* 31(12), 3217-3227 p.
45. Juárez-Camarena, M., 2001, Aplicación de la geoestadística a la descripción del subsuelo del Valle de México, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, tesis profesional, 180 p.
46. Instituto de Geofísica, 1994, Diagnóstico del estado presente de las aguas subterráneas de la Ciudad de México y determinación de sus condiciones futuras, contrato N° 3-33-1-06-89, Departamento del Distrito Federal, Secretaria General de Obras, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, 110 p.
47. Lee, S. Y., Carle, S. F., Fogg, G. E., 2007, Geologic heterogeneity and a comparison of two geostatistical models: Sequential Gaussian and transition probability-based geostatistical simulation, *Advances in Water Resources*, 30, 1914-1932 p.

48. Lesser, J. M., Cortés, M. A., 1998, Hundimiento del terreno en la Ciudad de México y sus implicaciones de el sistema de drenaje, Ingeniería Hidráulica en México, 13(3), 13-18p.
49. Lesser y Asociados S.A. de C.V., 2000, Hidrología subterránea en el valle de México, Sinopsis de la piezometría del valle de México año 2000, Dirección General de Construcción y Operación hidráulica.
50. Lunt, I.A., Bridge, S. S., Tye, R.S., 2004, A quantitative three-dimensional depositional model of gravelly braided rivers, Sedimentology, 51, 377-414 p.
51. Marsal, R. J., Mazari, M., 1969, El subsuelo de la Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
52. Marsily, G., Delay, F., Teles, V., 1998, Some current methods to represent the heterogeneity of natural media in hydrogeology, Hydrogeology Journal 6, 115-130 p.
53. Matheron, G. 1962, Traite de Geoestatistique Appliquee. Tome 1. Memoires du Bureau de Recherches Geologiques et Minieres. Ed. Technip, París, 333p.
54. McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988, A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 6, Chapter A1, 586 p.
55. Morales-Casique, E., Neuman, S. P., Vesselinov, V. V., 2010, Maximum likelihood Bayesian averaging of airflow models in unsaturated fractured tuff using Occam and variance windows, Stochastic Environ. Res. Risk Assess., 24(6), 863–880 p.

56. Mosser, F., Nairn, M. E., Negendank, F.W., 1974. Paleomagnetic investigations of the Tertiary and Quaternary igneous rocks: VIII a paleomagnetic and petrologic study of volcanic of the Valley of Mexico, *Geologische Rundschau* 63, 451-483 p.
57. Mooser, F., Tamez, E., Santoyo, E., Holguín, E., Gutiérrez, C. E., 1986, Características geológicas y geotécnicas del Valle de México, Departamento del Distrito Federal, comisión de Vialidad y Transporte Urbano, 32p.
58. Mooser, F., 1990; Estratigrafía y estructural del Valle de México en el subsuelo de la cuenca del Valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones, a cinco años del sismo, México, *Revista de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos*.
59. Neuman, S.P., 1984, Role of Geostatistics in subsurface hydrology, En: *Geostatistics for Natural Resources Characterization*, Verly et al (Eds), NATO ASI Series, Reidel, Hingham, Mass., Vol. 2, 787-816 p.
60. Papoulis, A., 1965, *Probability, random variables and stochastic processes*, 2° edición, McGraw-Hill, New York, 576 p.
61. Pérez Cruz, G. A., 1988, Estudio sismológico de reflexión del subsuelo de la Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis de maestría, 83 p.
62. Petróleos Mexicanos (PEMEX), 1988, *Estratigrafía de la República Mexicana Mesozoico*, Coordinación Ejecutiva de Exploración, 228 p.
63. Ritzi, R. W. Jr., Jayne, D. F., Zaheadnik Jr., A. J., Fied, A. A., Fogg, G. E., 1994, Geostatistical modeling of heterogeneity in glaciofluvial, buried-valley aquifers, *Ground Water*, 32(4), 666-674 p.

64. Ritzl, R. W. Jr., 2000, Behavior of indicator variograms and transition probabilities in relation to the variance in lengths of hidrofacies, *Water Resources Research* 36(11), 3375-3381 p.
65. Rathod, K. S., Rushton, K. R., 1991, Interpretation of pumping from two-zone layered aquifers using a numerical model, *Ground Water*, 29(4), 499-509 p.
66. Samper, J., Carrera, J., 1990, *Geoestadística. Aplicaciones a la hidrogeología subterránea*, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería Barcelona, 484 p.
67. Santoyo, E., Gutiérrez, C., 1990, Estratigrafía y muestreo inalterado de los suelos lacustres del Valle de México, En: Obando, E. y González, F. (Eds), *El subsuelo de la cuenca del valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo*. México: Sociedad mexicana de Mecánica de Suelos, 37-55 p.
68. Santoyo, E., Ovando, E., Mooser, F., León, E., 2005, *Síntesis geotécnica de la Cuenca del valle de México*, TGC, México, 171 p.
69. Schlaepfer, J.C., 1968. *Resumen de la Geología de la Hoja México, Distrito Federal y estados de México y Morelos. Hoja México 14Q-h (5) escala 1:100 000*, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología.
70. Segerstrom, K., 1961, *Geología de SW del Edo. de Hidalgo y de NE del Edo. de México*, *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros* 13(3 y 4).
71. Soto, G. E., Mazari, H. M., Bojórquez, T. L. A., 2000, Entidades de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México propensas a la contaminación de agua subterránea, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 43, 60-75 p.

72. Valencia-Cruz, N. I., 2002, Geología y correlación litoestratigráfica del subsuelo de la porción sur sureste del Valle de México, Universidad Nacional autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 85p.
73. Vargas, C., Ortega-Guerrero, A., 2004, Fracture hydraulic conductivity in the Mexico City clayey aquitard: Field piezometer rising-headtest, *Hydrology Journal*, 12, 336-344 p.
74. Vazqu ez-Sanch ez, E., Jaimes-Palomera, R., 1989, Geología de la Cuenca de México, Universidad Nacional Autónoma de México, *Geofísica Internacional* 28(2), 133-190 p.
75. Vesselinov, V. V., Neuman, S. P., Illman, W. A., 2001a, Three-dimensional numerical inversion of pneumatic cross-hole tests in unsaturated fractured tuff: 1. Methodology and borehole effects, *Water Resour. Res.*, 37(12), 3001 – 3018 p.
76. Vesselinov, V. V., Neuman, S. P., Illman, W. A., 2001b, Three-dimensional numerical inversion of pneumatic cross-hole tests in unsaturated fractured tuff: 2. Equivalent parameters, high-resolution stochastic imaging and scale effects, *Water Resour. Res.*, 37(12), 3019 – 3042p.
77. Webster, R., Oliver, M., 2000, *Geostatistics for environmental scientists*, John Wiley & Sons, LTD, 271 p.
78. Weissmann, G. S., Carle , S. F., Fogg, E.G., 1999, Three-dimensional hidrofacies modeling based on soil surveys and transition probability geostatistics, *Water resources research*, 35(6), 1761-1770 p.
79. Wilson, B. W., Hernández, P., Meave, T., 1955, Un banco calizo del Cretácico en la parte oriental del estado de Querétaro, México, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 18, 1-10 p.

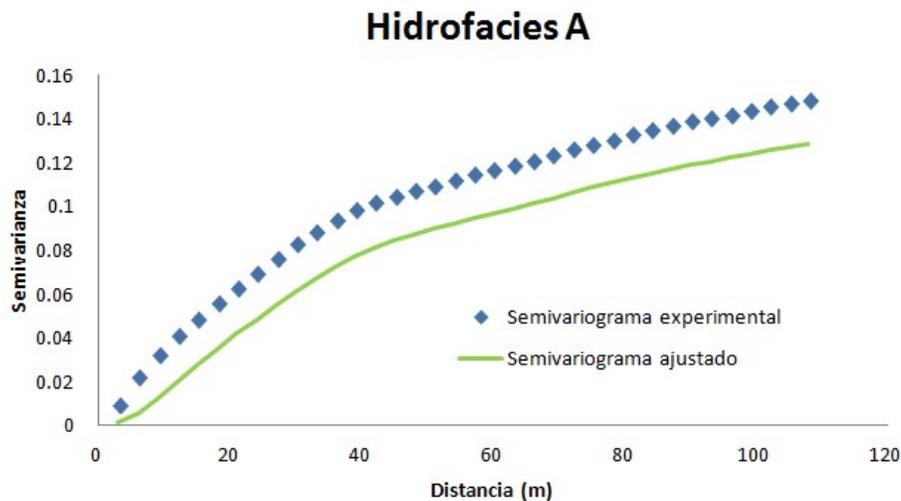
80. Zamudio-Ángeles, D.J., 2005, Análisis litoestratigráfico y biogeocronológico del Cretácico en el área Mayanalán-Tulimán, Guerrero Nororiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, tesis de Maestría, 103 p.

ANEXOS

Modelación de variogramas de la Zona I

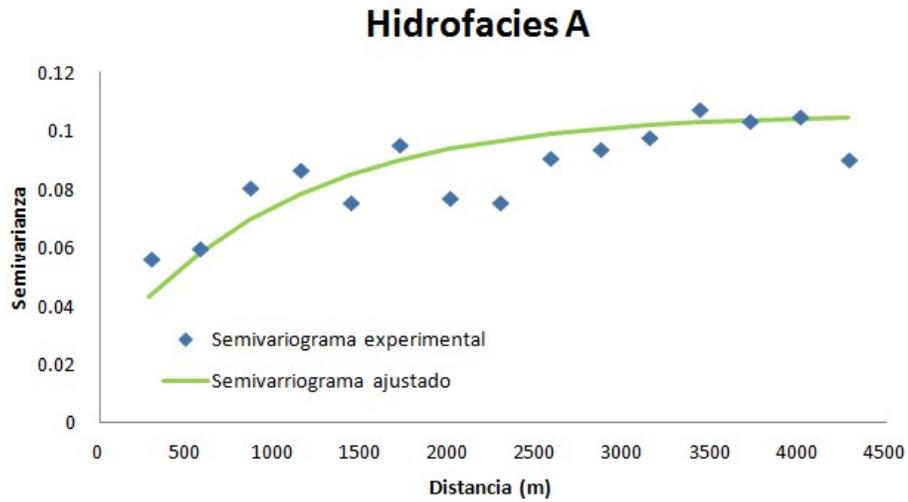
El ajuste presentado en este anexo se basó en el ajuste mediante de PEST por validación cruzada y el variograma experimental de cada hidrofacies quedando los siguientes ajustes.

	A	B	C	D
Nugget	2.315E-02	2.331E-02	2.840E-02	2.341E-02
Meseta	8.280E-02	1.744E-01	2.000E-01	1.997E-01
Distancia integral horizontal	1.044E+03	3.969E+02	8.973E+02	8.656E+02
Distancia integral vertical	8.856E+01	2.638E+01	6.727E+01	4.883E+01

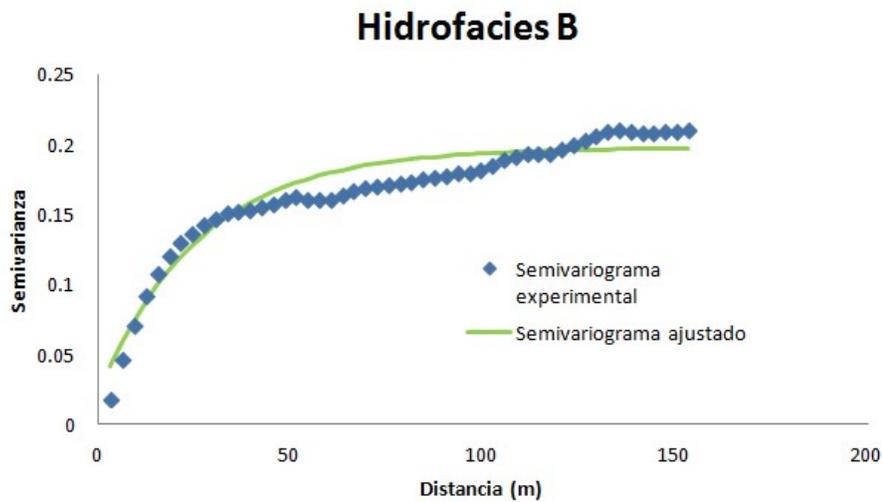


Variograma experimental y teórico ajustado vertical para minimizar el error por medio de validación cruzada y variograma experimental de la hidrofacies A de la zona I.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

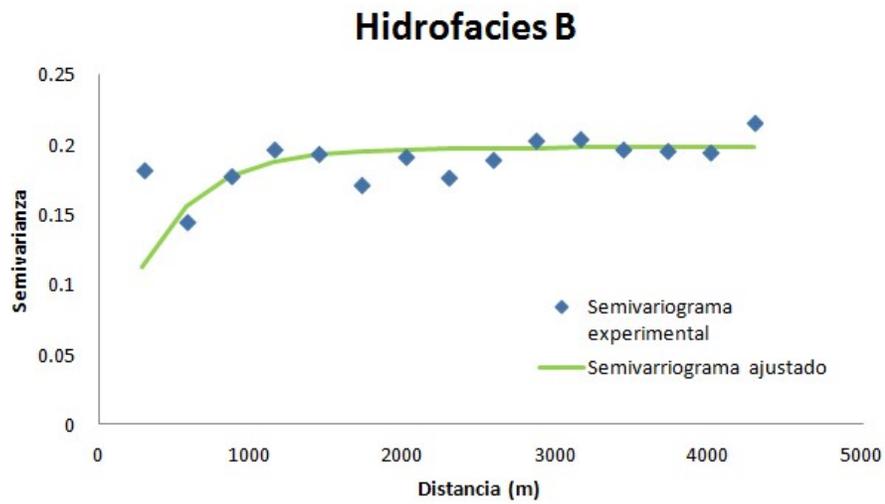


Variograma experimental y teórico ajustado horizontal para minimizar el error por medio de validación cruzada y variograma experimental de la hidrofacies A de la zona I.

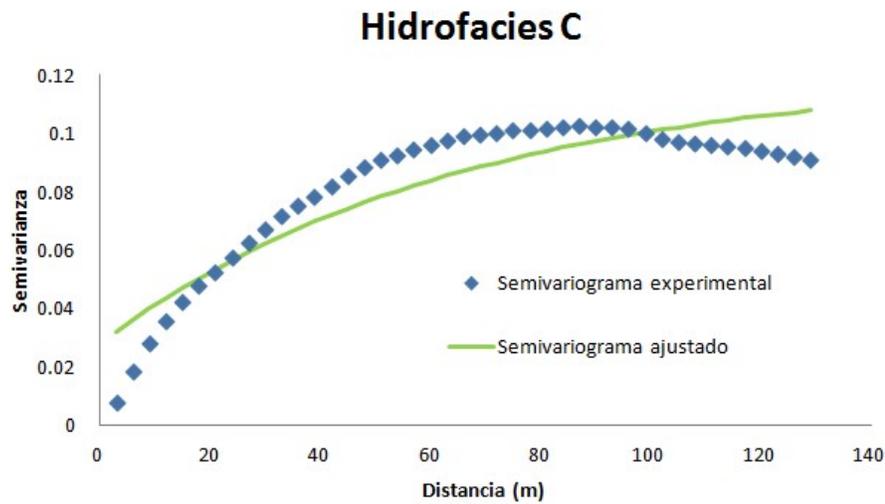


Variograma experimental y teórico ajustado vertical para minimizar el error por medio de validación cruzada y variograma experimental de la hidrofacies B de la zona I.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México



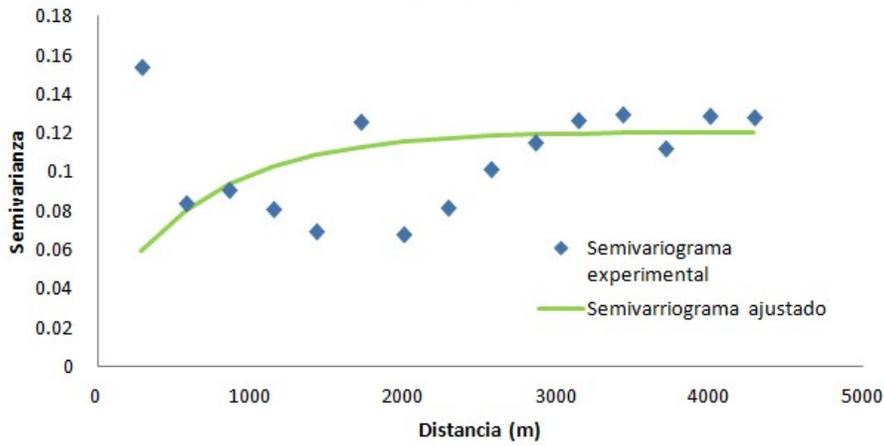
Variograma experimental y teórico ajustado horizontal para minimizar el error por medio de validación cruzada y variograma experimental de la hidrofacies B de la zona I.



Variograma experimental y teórico ajustado vertical para minimizar el error por medio de validación cruzada y variograma experimental de la hidrofacies C de la zona I.

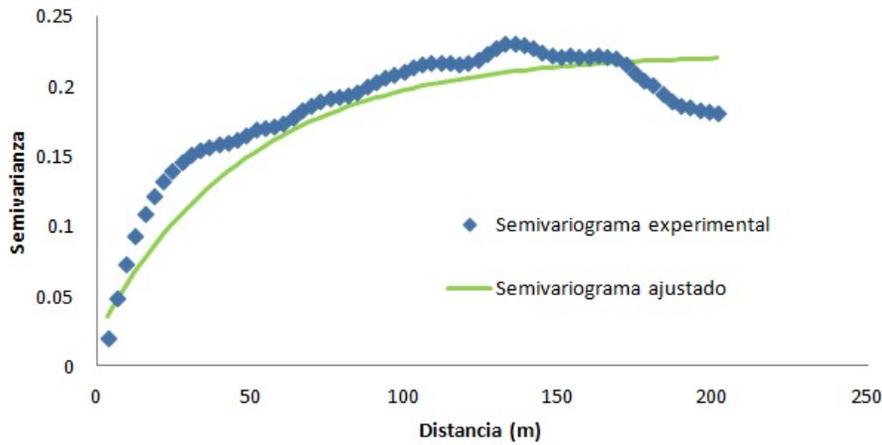
Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Hidrofacies C



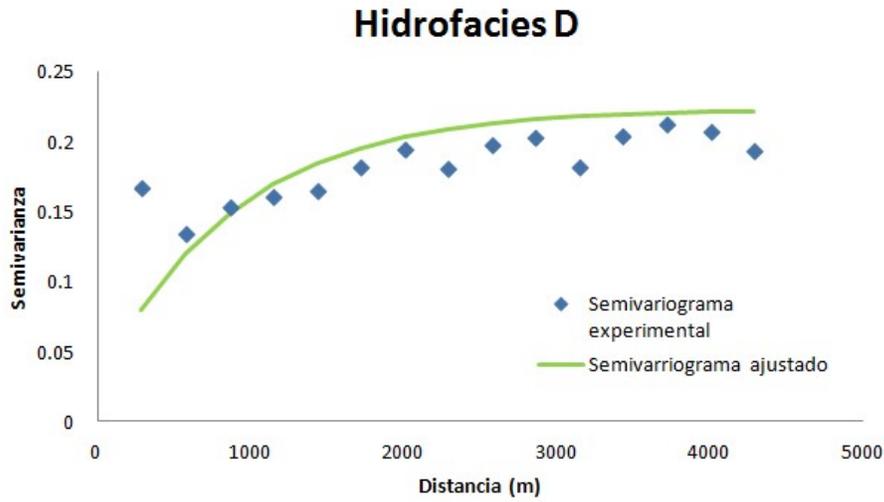
Variograma experimental y teórico ajustado horizontal para minimizar el error por medio de validación cruzada y variograma experimental de la hidrofacies C de la zona I.

Hidrofacies D



Variograma experimental y teórico ajustado vertical para minimizar el error por medio de validación cruzada y variograma experimental de la hidrofacies D de la zona I.

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México



Variograma experimental y teórico ajustado horizontal para minimizar el error por medio de validación cruzada y variograma experimental de la hidrofacies D de la zona I.

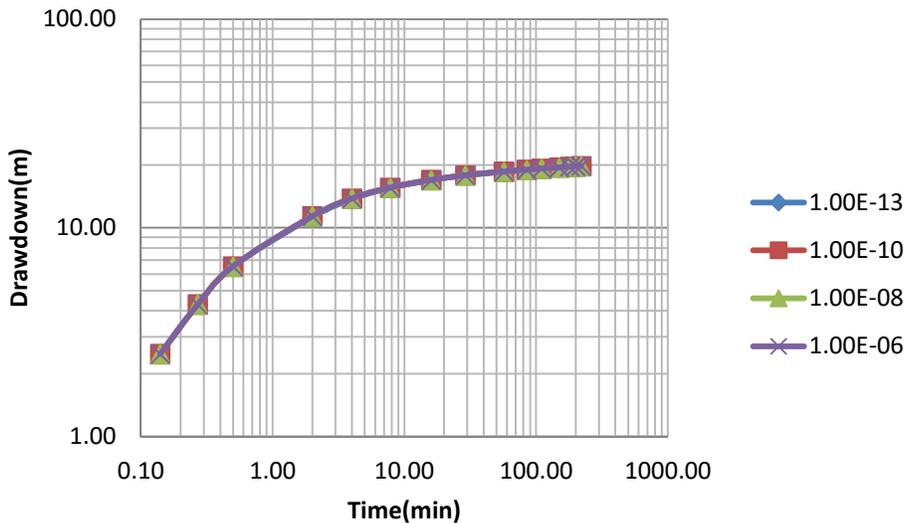
Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

Análisis de sensibilidad de las hidrofacies A

En la prueba de bombeo de Ciudad Deportiva N°2 con los valores obtenidos se realizó un análisis de sensibilidad con los valores de 1E-13, 1E-10, 1E-8 y 1E-6 (m/min) para observar si existe una relación. Los resultados de la variación de los valores de las hidrofacies A, dentro del rango reportado no modifican los resultados; por lo que se concluye que este modelo es poco sensible a este parámetro.

Tiempo (min)	Abatimiento Real (m)	Conductividad hidráulica (Ka)			
		1.00E-13	1.00E-10	1.00E-08	1.00E-06
0.14	8.13	2.48	2.48	2.48	2.48
0.27	8.75	4.29	4.29	4.29	4.29
0.50	9.38	6.52	6.52	6.52	6.52
2.00	11.25	11.25	11.36	11.36	11.36
4.00	13.31	13.70	13.80	13.80	13.80
7.80	15.63	15.56	15.56	15.56	15.56
16.00	16.75	16.94	16.94	16.94	16.94
29.00	17.50	17.83	17.83	17.83	17.83
57.00	17.81	18.57	18.57	18.57	18.57
85.00	18.13	18.96	18.97	18.97	18.97
110.00	18.13	19.19	19.20	19.20	19.20
150.00	18.75	19.43	19.45	19.45	19.45
180.00	19.88	19.56	19.60	19.60	19.60
200.00	19.88	19.64	19.68	19.68	19.68
220.00	19.88	19.70	19.76	19.76	19.76

Análisis de sensibilidad de la conductividad hidráulica de la hidrofacies A (Ka)



Parámetros hidráulicos (Instituto de Geofísica, 1994)

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

No de Prueba	Pozo	Unidad Geológica	Kh(m/s)	Kv(m/s)	S	Sy	b(m)	Ss(1/m)	**K(m/s)	**S
1	SUR-19	Qal	2.00E-04	2.00E-05		2.00E-01				
1	SUR-19	TQp	1.70E-05	1.70E-06	1.00E-03		160	6.25E-06		
2	SUR-1	Qal	2.10E-04	2.10E-05	5.00E-03		275	1.82E-05		
2	SUR-1	Tppc	1.00E-07	1.00E-08	1.00E-04					
3	MSC-1	Qla		5.00E-09						
3	MSC-1	Qal	1.70E-05	1.70E-06	4.60E-04		90	5.11E-06		
4	MSC-13	Qla		5.00E-09						
4	MSC-13	Qal	0.000081	8.10E-06	0.00047		102	4.61E-06		
5	TLA-1	Qb	0.029	0.0029		0.1				
6	SC-12	Qb	0.000098	0.0000098		0.1				
7	CP-203	TQp	5.80E-06	5.80E-07		0.05				
8	CP-251	TQp	8.10E-06	8.10E-07		0.04				
9	SL-15	Qb	0.0014	0.00014		0.15			0.0017	
10	SC-1	Qb	0.0017	0.0017		0.07			0.0017	
11	N-6	Qal	0.000081	0.0000081		0.2			0.00079	
12	38	Qla		5.00E-09						
12	38	Qal	0.000014	0.0000014	0.0025		221	0.000011312	0.00049	
12	38	Tppc	1.00E-07	1.00E-08	0.0001					
13	8	Qla		1.00E-07						
13	8	Qb	0.00058	0.000058	0.0033		80	0.00004125		
14	170	Qla		5.00E-09						
14	170	Qb	0.0017	0.0017	0.005		136	0.000036765	0.0011	
14	170	Tppc	1.00E-07	1.00E-08	0.0001					
15	174	Qla		5.00E-09						
15	174	Qal	0.00014	0.000014	0.003		171	0.000017544	0.00011	
16	45	Qla		5.00E-09						
16	45	Qal	0.000041	4.10E-06	0.001		151	6.62E-06	0.000025	
17	141	Qal	0.00017	0.000017		0.2			0.00059	
18	118	Qla		5.00E-09						
18	118	Qal	0.00026	2.60E-05	0.005	0.15	307	0.000016287	0.00039	
18	118	Tppc	1.00E-07	1.00E-08	0.0001					
19	93	TQp	0.00001	1.00E-06		0.07			0.000029	
20	12	Qal	0.000049	4.90E-06		0.15			0.000077	
20	12	Tppc	1.00E-07	1.00E-08	0.0001					
21	PER-19	Tpba	0.00038	0.000038		0.2			0.00026	
21	PER-19	Tppc	1.00E-07	1.00E-08	0.0001					
22	21	Qal	0.000081	8.10E-06		0.2			0.00001	

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

23	76	TQp	0.000069	6.90E-06		0.07			0.00018
24	148	TQp	0.000034	3.40E-06		0.08			4.12E-06
25	18	TQp	0.000021	2.10E-06		0.085			0.000017
26	E-53	Tpba	0.00093	0.000093		0.08			
27	CP-224	TQp	4.00E-06	4.00E-07		0.1			
27	CP-224	Tpv	3.50E-06	3.50E-07	0.0007		35	0.00002	
28	CO-324	Tpv	2.70E-06	2.70E-07		0.05			
29	CO-334	Qal	4.10E-06	4.10E-07		0.15			
29	CO-334	Tpv	0.000081	8.10E-06	0.0003		130	2.31E-06	
30	CO-322	Tpba	0.0069	0.00069		0.1			
31	CO-328	Qla		5.00E-09					
31	CO-328	Qal	6.40E-06	6.40E-07	0.004		16	0.00025	
31	CO-328	Tpba	0.00012	0.000012	0.0008		194	4.12E-06	
32	TX-337	TQp	0.000021	2.10E-06		0.06			0.000014
33	E-86	Tpba	0.000013	1.30E-06		0.06			
34	E-3	TQp	4.60E-06	4.60E-07		0.07			1.82E-06
35	E-84	TQp	5.80E-06	5.80E-07		0.085			2.70E-06 0.004
36	E-92	Tpba	0.000069	6.90E-06		0.1			0.000035
37	PER-17	Qla		5.00E-09					
37	PER-17	Qal	8.70E-06	8.70E-07	0.005	0.1	268	0.000018657	0.000025
37	PER-17	Tppc	1.00E-07	1.00E-08	0.0001				0.00039
38	PER-9	Qal	0.00031	0.000031		0.18			
38	PER-9	TQp	0.000069	6.90E-07	0.001		71	0.000014085	
39	69	TQp	0.000069	6.90E-07		0.05			0.00005
40	75	Qal	0.00013	0.000013		0.2			0.00016
40	75	Tpv	4.60E-06	4.70E-07	0.001		34	0.000029412	
41	PER-3	Qal	0.000034	3.40E-06		0.17			0.000034
41	PER-3	Tppc	0.000012	1.20E-06	0.0007				
42	197	Qal	0.00035	0.000035		0.2			
42	197	TQp	0.000023	2.30E-06	0.003		250	0.000012	0.000033
43	150	Qla		5.00E-09					
43	150	Qal	0.0001	0.00001	0.005		142	0.000035211	0.00012
43	150	Tppc	1.00E-07	1.00E-08	0.0001				
44	193	Qal	0.000081	8.10E-06		0.12			0.000045
44	193	Tppc	1.00E-07	1.00E-08	0.0001				
45	PER-14	Qal	0.000046	4.60E-06		0.2			
45	PER-14	Tppc	1.00E-07	1.00E-08	0.0001				
46	E-155	Qal	0.0036	0.00036		0.2			0.00074
46	E-155	Tpba	0.0036	0.00036		0.2			0.00074
47	SUR-12	Qal	0.000043	4.30E-06		0.15			

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

47	SUR-12	TQp	5.80E-06	5.80E-07	0.005	50	0.0001		
48	2967	TQp	0.000093	9.30E-06		0.08		0.000093	0.0031
48	2967	Tppc	1.00E-07	1.00E-08	0.001				
49	125	Qb	0.0015	0.00015		0.08		0.001	
50	XOT-3B	Qal	0.000035	3.50E-06		0.15		0.00002	0.0005
50	XOT-3B	Tppc	1.00E-07	1.00E-08	0.0001				
51	24	Qal	0.000093	9.30E-06		0.2		0.000009	
52	92	Qal	0.0001	0.00001		0.15		0.000014	0.01
52	92	Tppc	1.00E-07	1.00E-08					
53	SA-1	Qb	0.000017	1.70E-06		0.1			
54	PA-2	Qla		5.00E-09					
54	PA-2	Qal	0.00023	0.000023	0.0025	81	0.000030864	0.00012	
55	190	Qla		5.00E-09					
55	190	Qal	0.000012	1.20E-06	0.00085	145	5.86E-06	0.000041	

** Valores de referencia

Qla Arcillas lacustres del Cuaternario

Qla Depósitos aluviales del Cuaternario

TQp Formación Tarango

Qb Rocas Volcánicas del Cuaternario

Tpba Rocas Volcánicas basálticas y andesíticas del Plioceno Superior

Tppc Secuencia estratificada

Tpv Rocas volcánicas andesíticas del Plioceno Inferior

Tabla 1. Valores de parámetros hidráulicos interpretados a 55 pruebas de bombeo en la Ciudad de México (Instituto de Geofísica, 1994).

Análisis de los parámetros hidráulicos (Instituto de Geofísica, 1994)

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

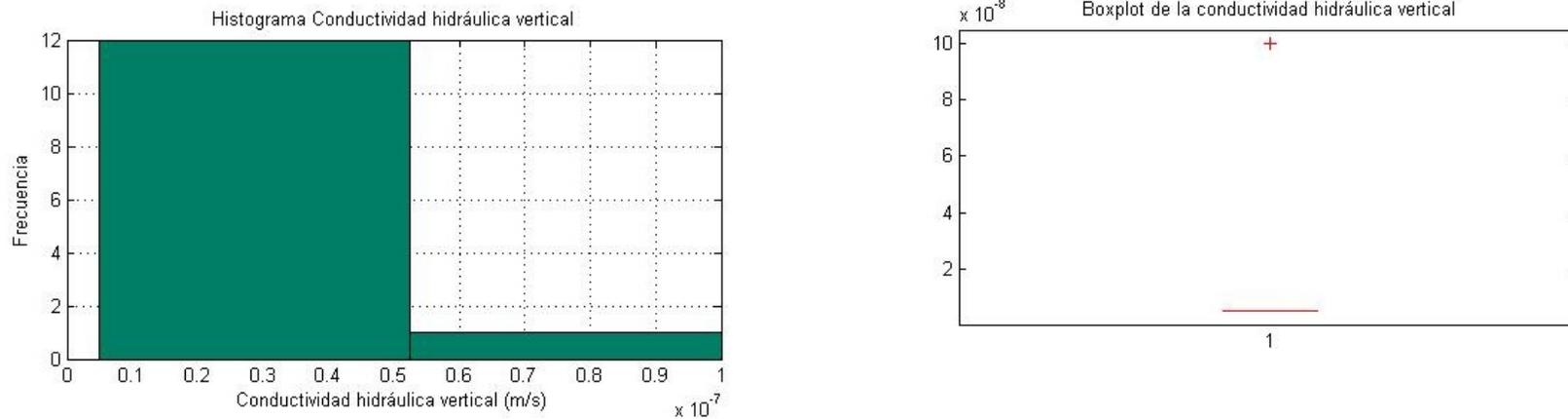


Figura 1. Histogramas y boxplots de las conductividades hidráulicas vertical de los Depósitos lacustres (Q1a).

Estadísticos	Kv(m/s)
Media	1.2308E-08
Desviación Estándar	2.6348E-08
Varianza	6.9423E-16
Mediana	5.0000E-09
Curtosis	1.3000E+01
Coficiente de asimetría	3.6056E+00

Tabla 1. Resumen de los estadísticos de las propiedades hidráulicas de los depósitos lacustres (Q1a).

Modelo geostatístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

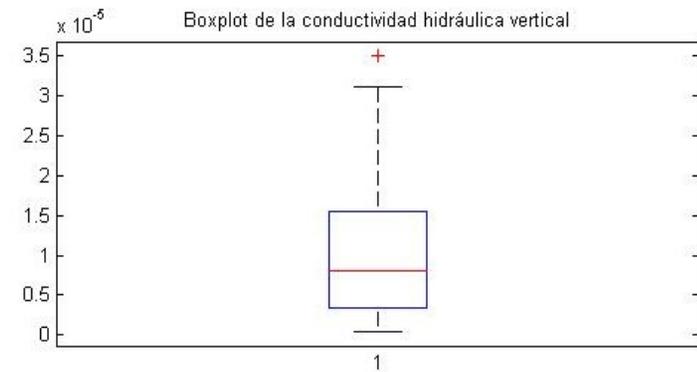
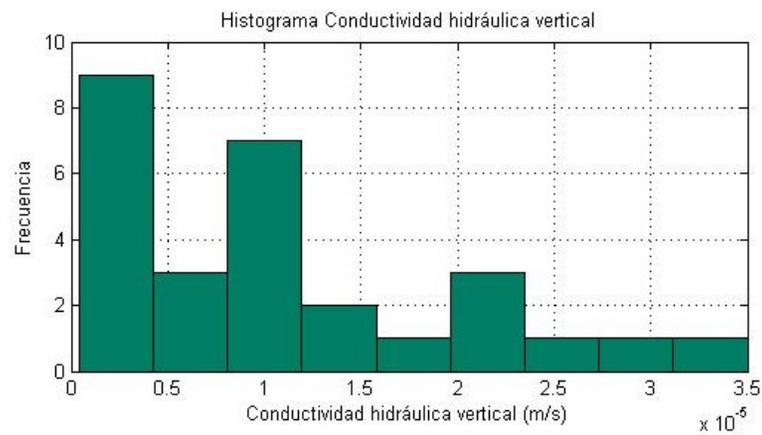
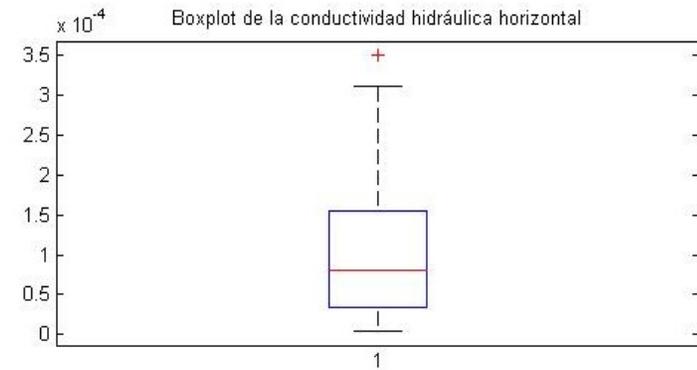
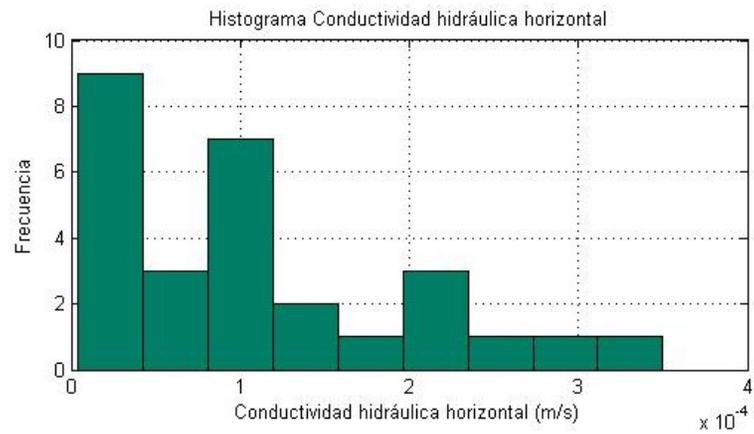


Figura 2. Histogramas y boxplots de las conductividades hidráulicas horizontal y vertical de los Depósitos aluviales (Qal).

Modelo geostatístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

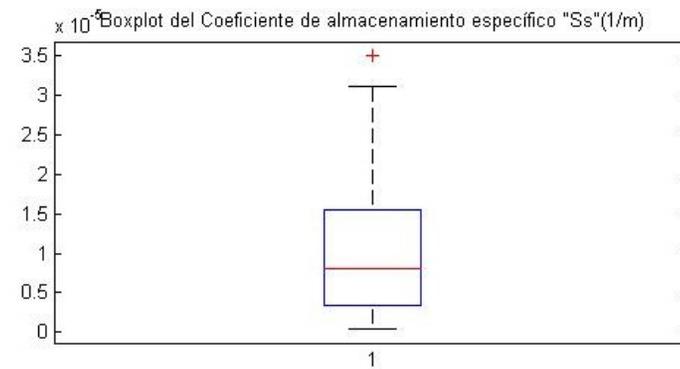
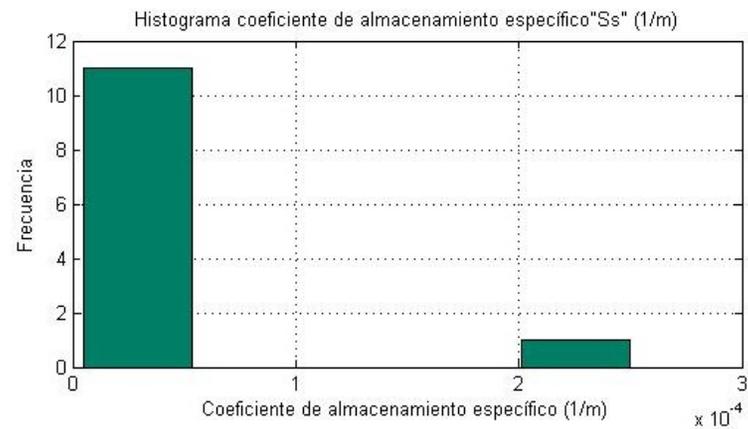
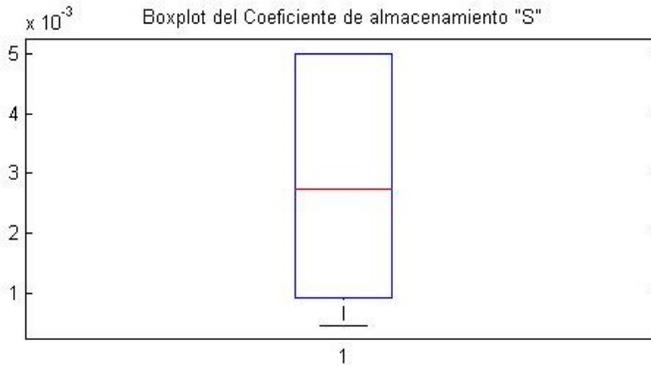
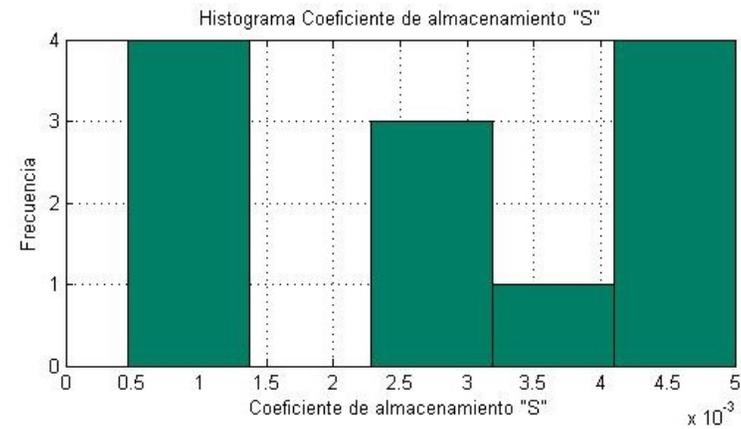


Figura 3. Histogramas y boxplots de los Coeficientes de almacenamiento (S) y Coeficiente de almacenamiento específico (Ss) de los Depósitos aluviales (Qal).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

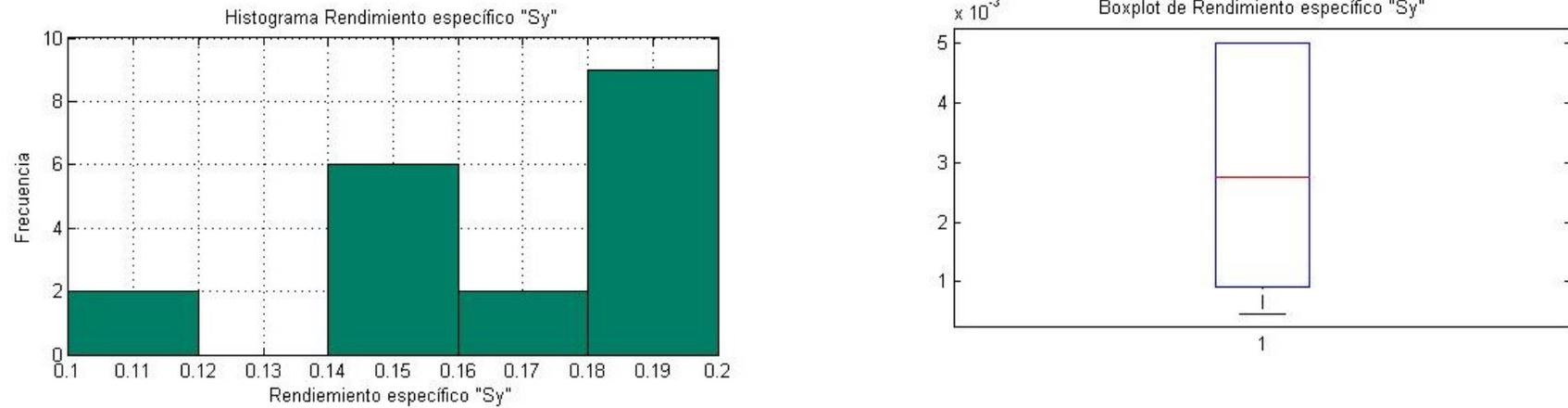


Figura 4. Histograma y boxplot de Rendimiento Específico (Sy) de los Depósitos aluviales (Qal).

Estadísticos	Kh(m/s)	Kv(m/s)	S	Sy	Ss(1/m)
Media	2.2508E-04	2.2508E-05	2.8983E-03	1.7211E-01	3.5022E-05
Desviación Estándar	6.5590E-04	6.5590E-05	1.8793E-03	3.1549E-02	6.8410E-05
Varianza	4.3020E-07	4.3020E-09	3.5319E-06	9.9532E-04	4.6799E-09
Mediana	8.1000E-05	8.1000E-06	2.7500E-03	1.8000E-01	1.6916E-05
Curtosis	2.7682E+01	2.7682E+01	-1.7561E+00	-3.3879E-01	1.1360E+01
Coefficiente de asimetría	5.2104E+00	5.2104E+00	-9.7092E-02	-7.6194E-01	3.3387E+00

Tabla 2. Resumen de los estadísticos de las propiedades hidráulicas de los depósitos aluviales (Qal).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

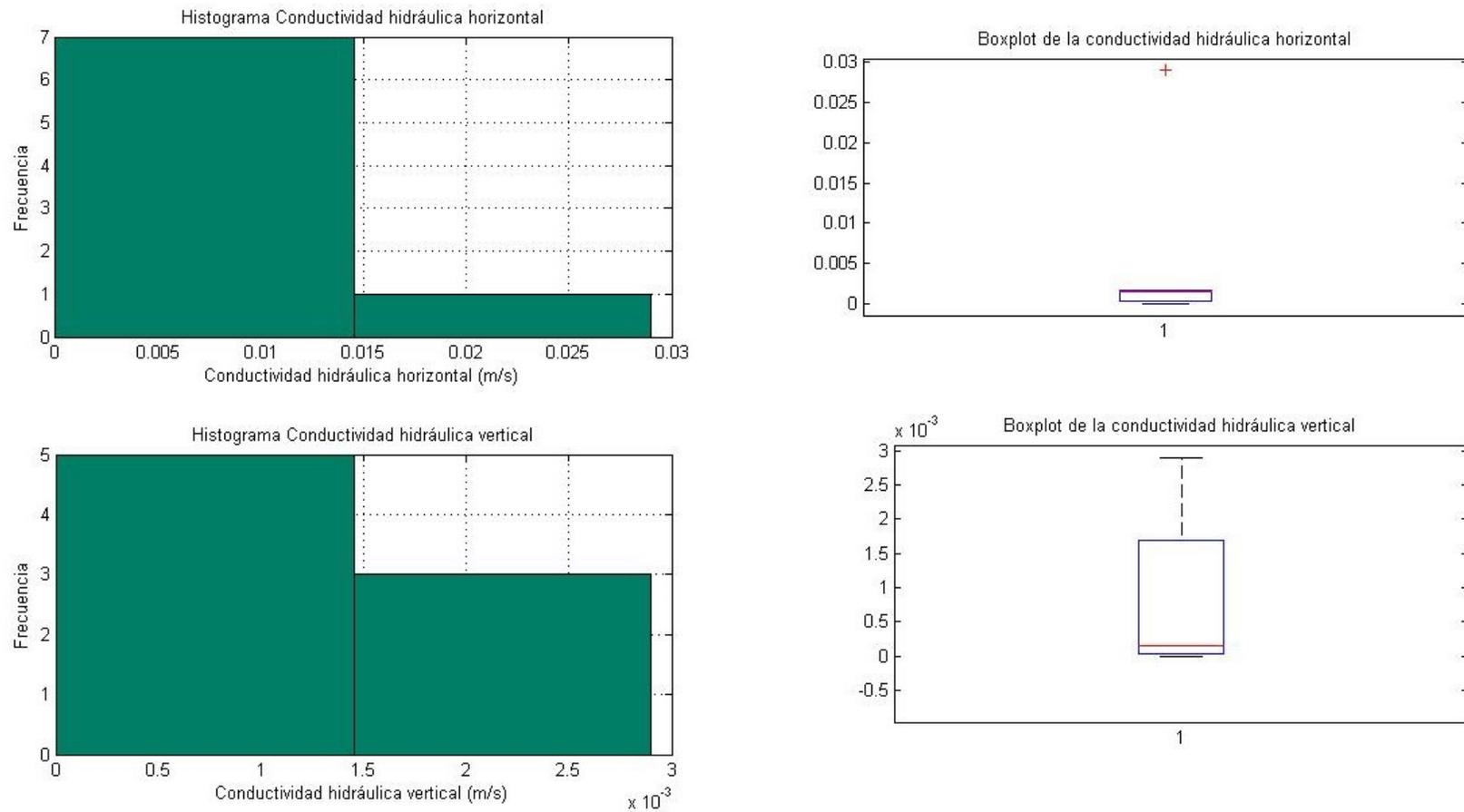


Figura 5. Histogramas y boxplots de las conductividades hidráulicas horizontal y vertical de las Rocas volcánicas del Cuaternario (Qb).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

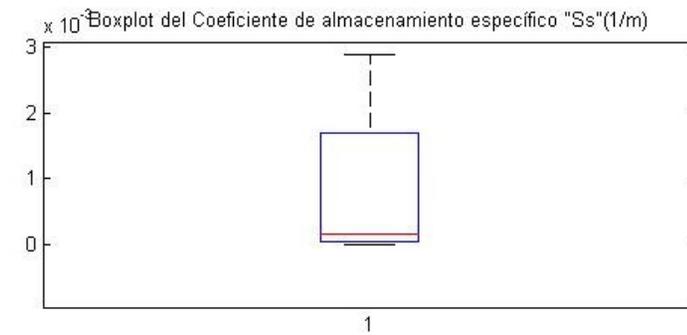
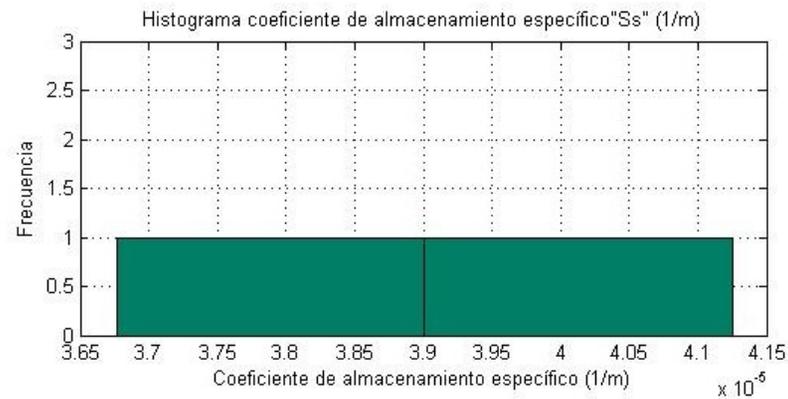
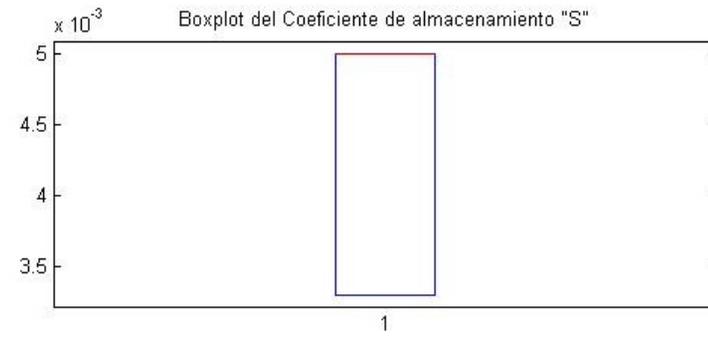
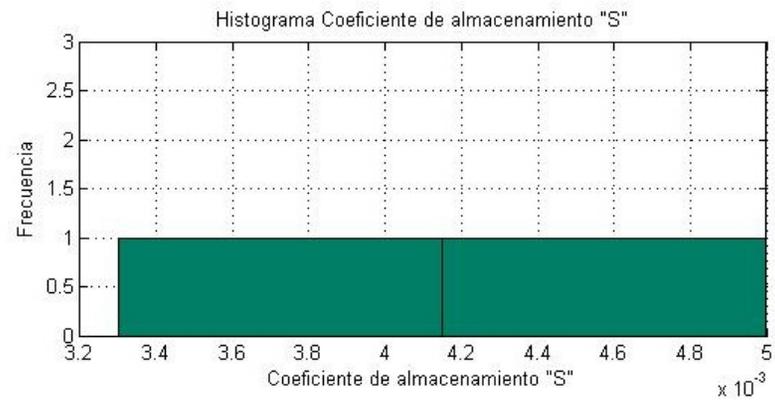


Figura 6. Histogramas y boxplots de los Coeficientes de almacenamiento (S) y Coeficiente de almacenamiento específico (Ss) de las Rocas volcánicas del Cuaternario (Qb).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

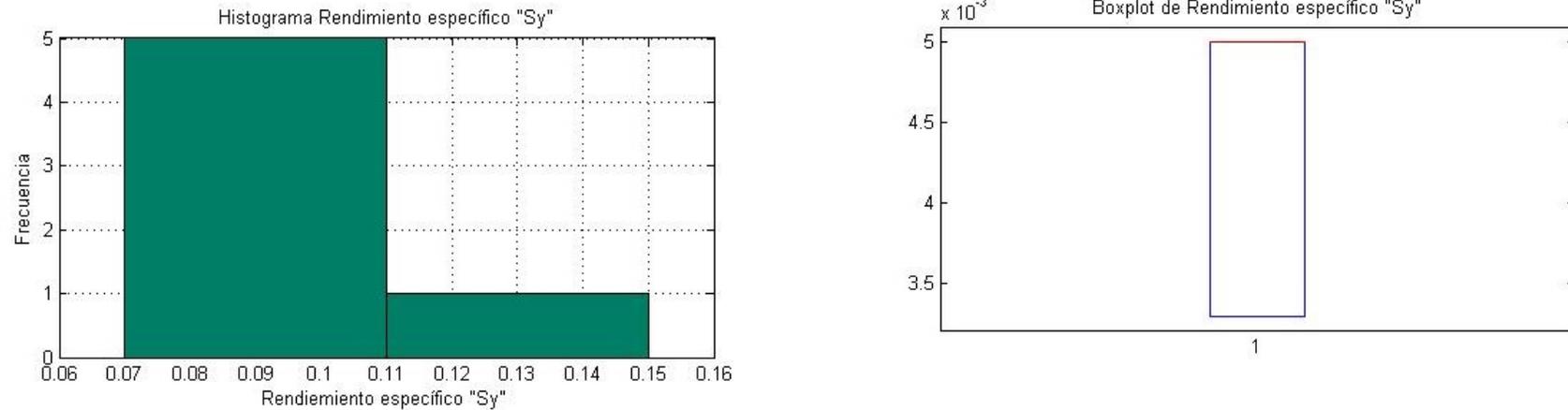


Figura 7. Histograma y boxplot de Rendimiento Específico (Sy) de las Rocas volcánicas del Cuaternario (Qb).

Estadísticos	Kh(m/s)	Kv(m/s)	S	Sy	Ss(1/m)
Media	4.4994E-03	8.3244E-04	4.1500E-03	1.0000E-01	1.0800E+02
Desviación Estándar	9.9239E-03	1.1143E-03	1.2021E-03	2.7568E-02	3.9598E+01
Varianza	9.8483E-05	1.2417E-06	1.4450E-06	7.6000E-04	1.5680E+03
Mediana	1.4500E-03	1.4500E-04	4.1500E-03	1.0000E-01	1.0800E+02
Curtosis	7.8843E+00	-1.9738E-01	****	2.5000E+00	****
Coficiente de asimetría	2.8008E+00	1.0875E+00	****	1.2887E+00	****

Tabla 3. Resumen de los estadísticos de las propiedades hidráulicas de las Rocas volcánicas del Cuaternario (Qb).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

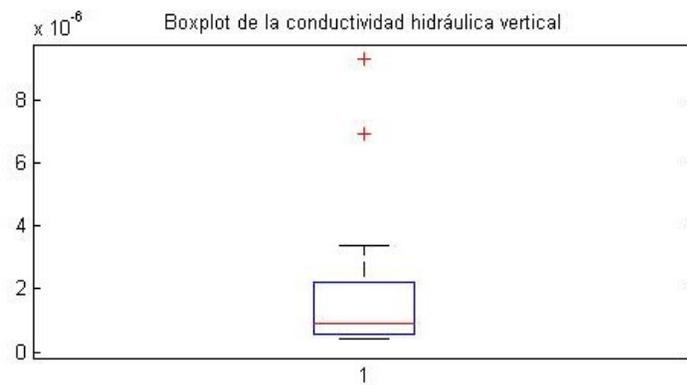
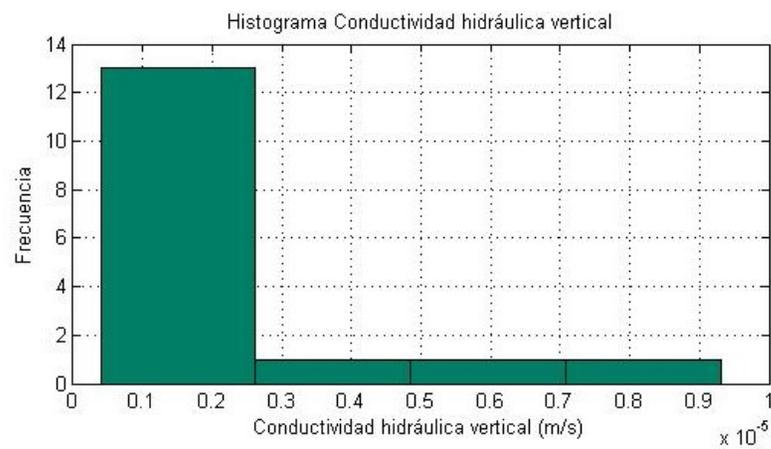
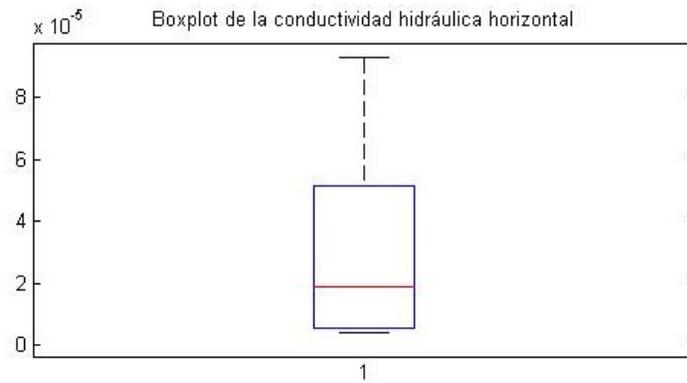
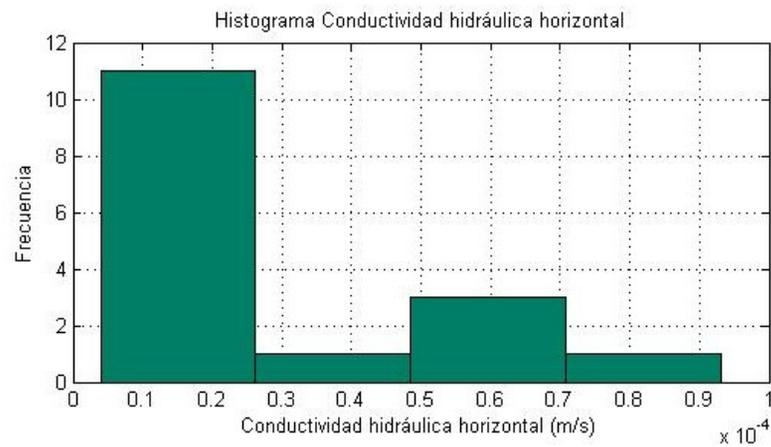


Figura 8. Histogramas y boxplots de las conductividades hidráulicas horizontal y vertical de la Formación Tarango (TQp).

Modelo geostatístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

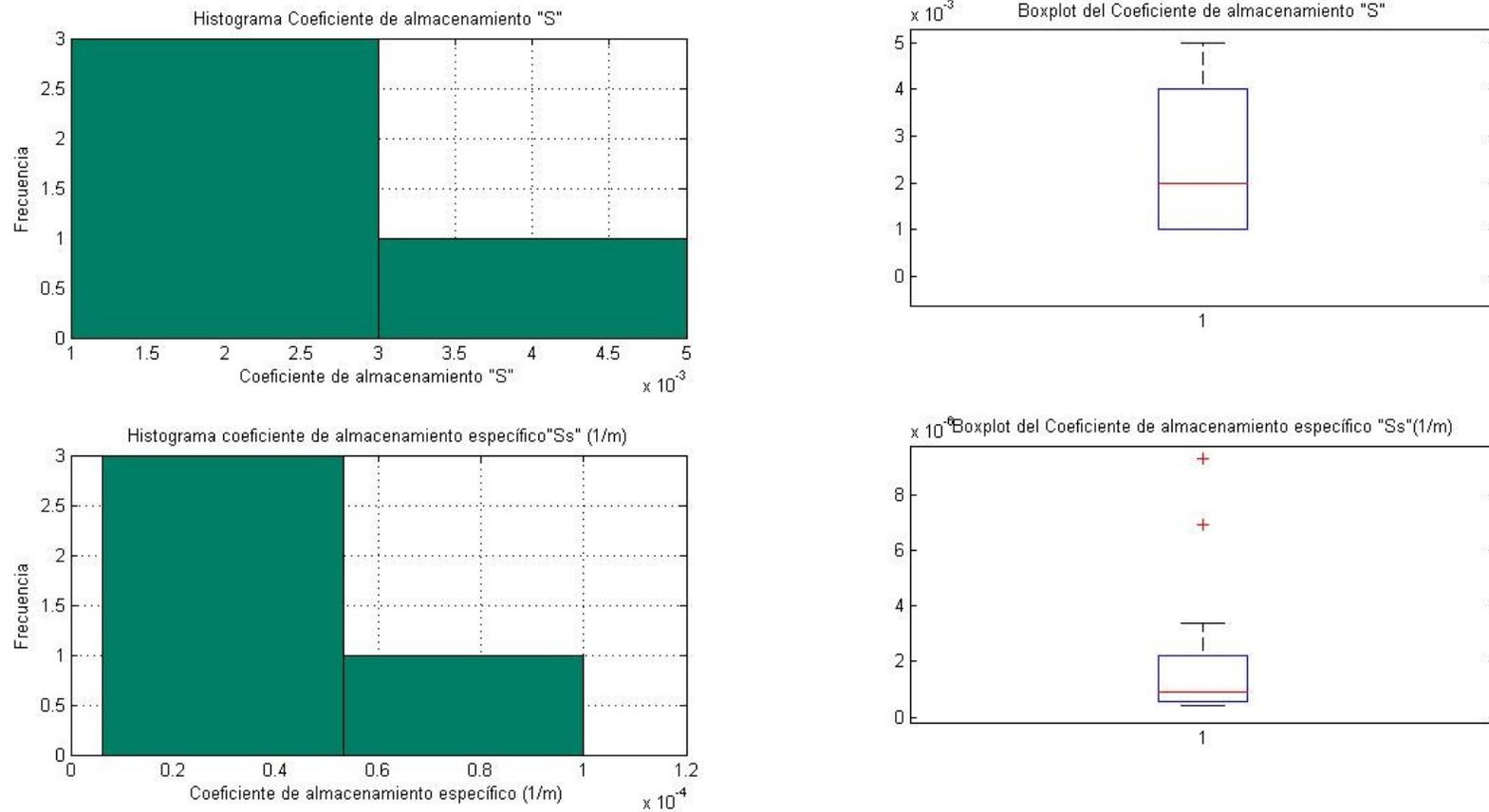


Figura 9. Histogramas y boxplots de los Coeficientes de almacenamiento (S) y Coeficiente de almacenamiento específico (Ss) de la Formación Tarango (TQp).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

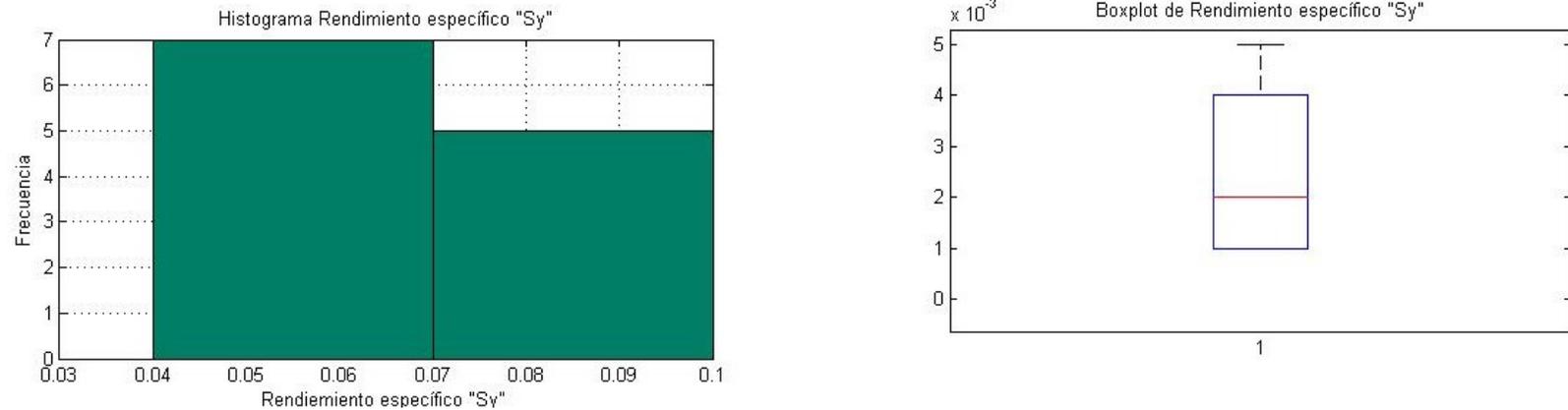


Figura 10. Histograma y boxplot de Rendimiento Específico (Sy) de la Formación Tarango (TQp).

Estadísticos	Kh(m/s)	Kv(m/s)	S	Sy	Ss(1/m)
Media	2.8756E-05	2.0994E-06	2.5000E-03	7.0000E-02	3.3084E-05
Desviación Estándar	2.9281E-05	2.5315E-06	1.9149E-03	1.7451E-02	4.4734E-05
Varianza	8.5740E-10	6.4087E-12	3.6667E-06	3.0455E-04	2.0011E-09
Mediana	1.9000E-05	9.0500E-07	2.0000E-03	7.0000E-02	1.3043E-05
Curtosis	-7.8355E-02	4.2140E+00	-1.2893E+00	-5.1435E-01	3.8949E+00
Coficiente de asimetría	1.1444E+00	2.1472E+00	8.5456E-01	-1.6934E-01	1.9667E+00

Tabla 4. Resumen de los estadísticos de las propiedades hidráulicas de la Formación Tarango (TQp).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

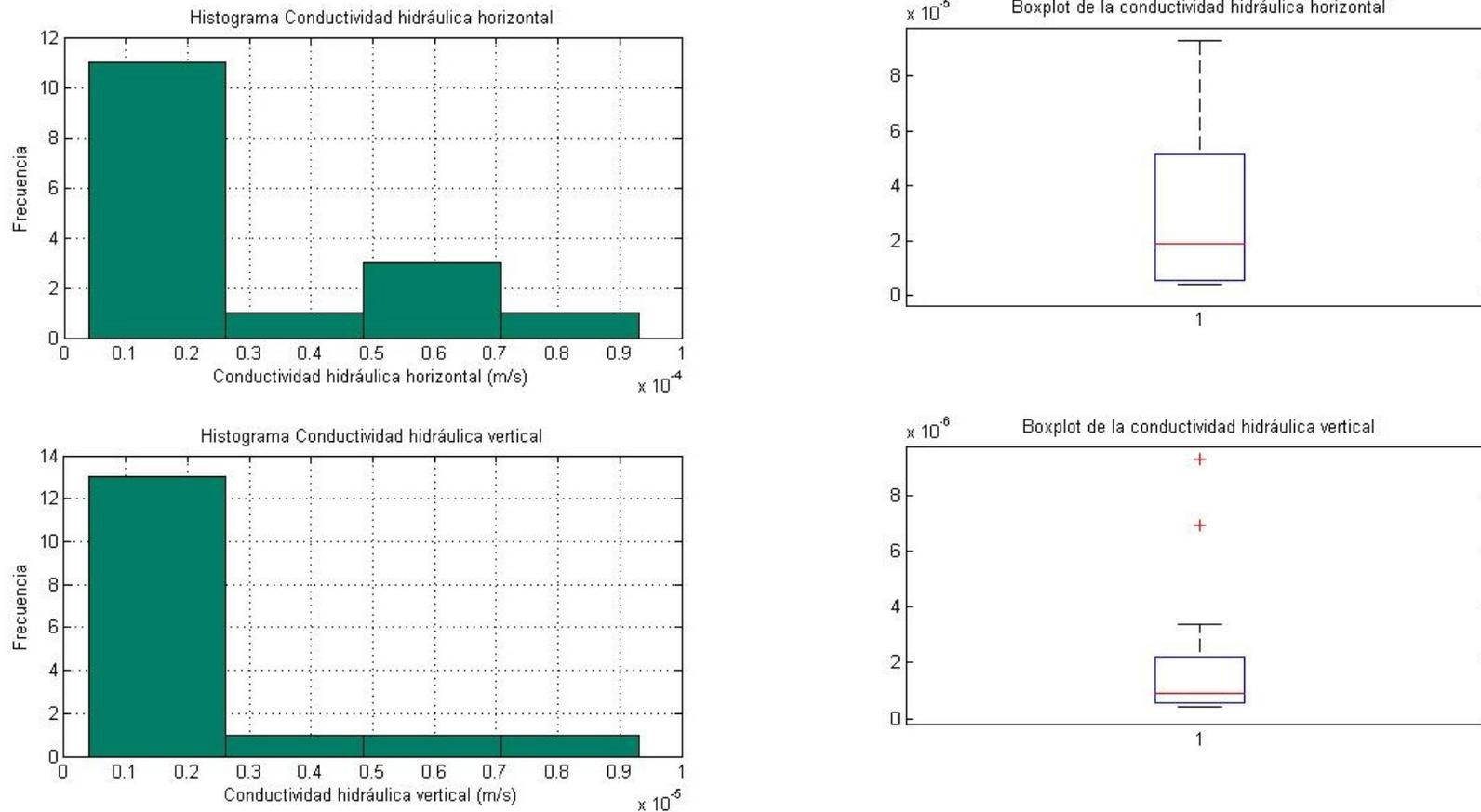


Figura 11. Histogramas y boxplots de las conductividades hidráulicas horizontal y vertical de las Rocas volcánicas basálticas y andesíticas del Plioceno Superior (Tpba).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

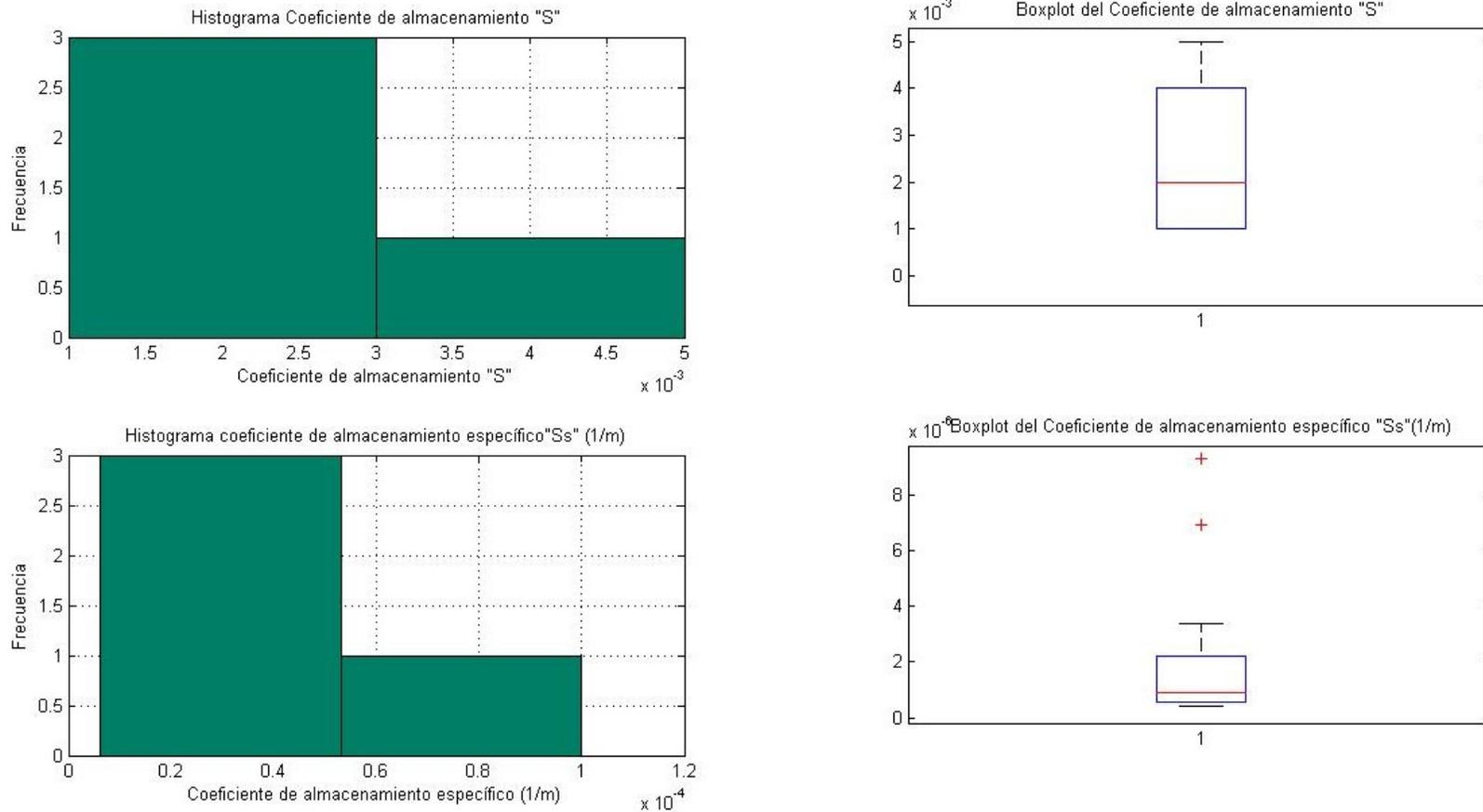


Figura 12. Histogramas y boxplots de los Coeficientes de almacenamiento (S) y Coeficiente de almacenamiento específico (Ss) de las Rocas volcánicas basálticas y andesíticas del Plioceno Superior (Tpba).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

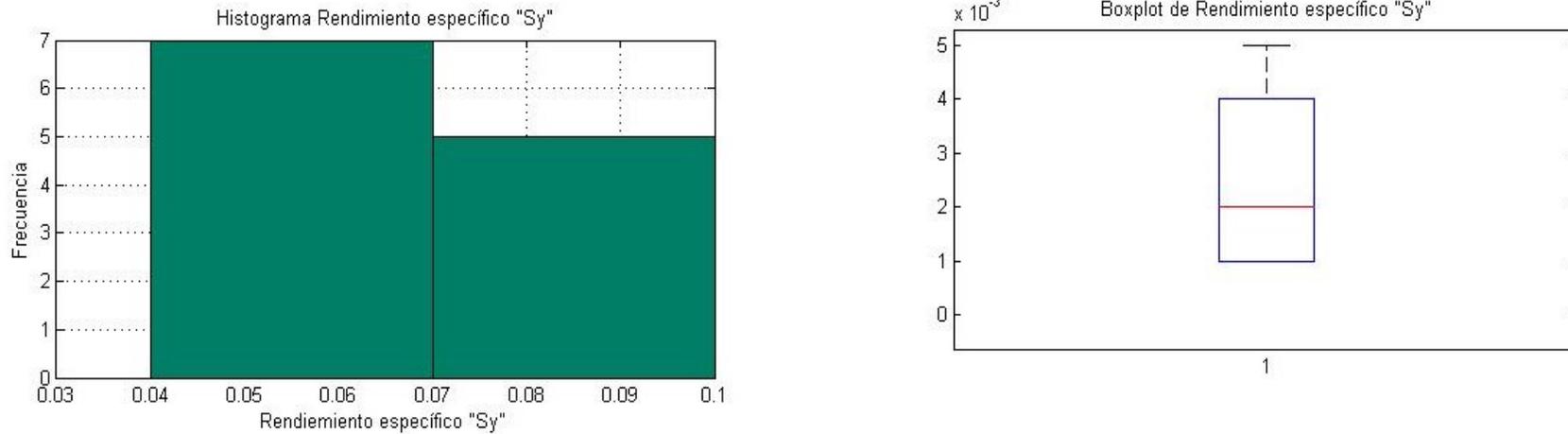


Figura 13. Histograma y boxplot de Rendimiento Específico (Sy) de las Rocas volcánicas basálticas y andesíticas del Plioceno Superior (Tpba).

Estadísticos	Kh(m/s)	Kv(m/s)	S	Sy	Ss(1/m)
Media	1.7160E-03	1.7160E-04	8.0000E-04	1.2333E-01	4.1237E-06
Desviación Estándar	2.6136E-03	2.6136E-04	**	6.1210E-02	**
Varianza	6.8310E-06	6.8310E-08	**	3.7467E-03	**
Mediana	3.8000E-04	3.8000E-05	8.0000E-04	1.0000E-01	4.1237E-06
Curtosis	2.2069E+00	2.2069E+00	**	-1.7967E+00	**
Coefficiente de asimetría	1.6945E+00	1.6945E+00	**	7.0698E-01	**

Tabla 5. Resumen de los estadísticos de las propiedades hidráulicas de las Rocas volcánicas basálticas y andesíticas del Plioceno Superior (Tpba).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

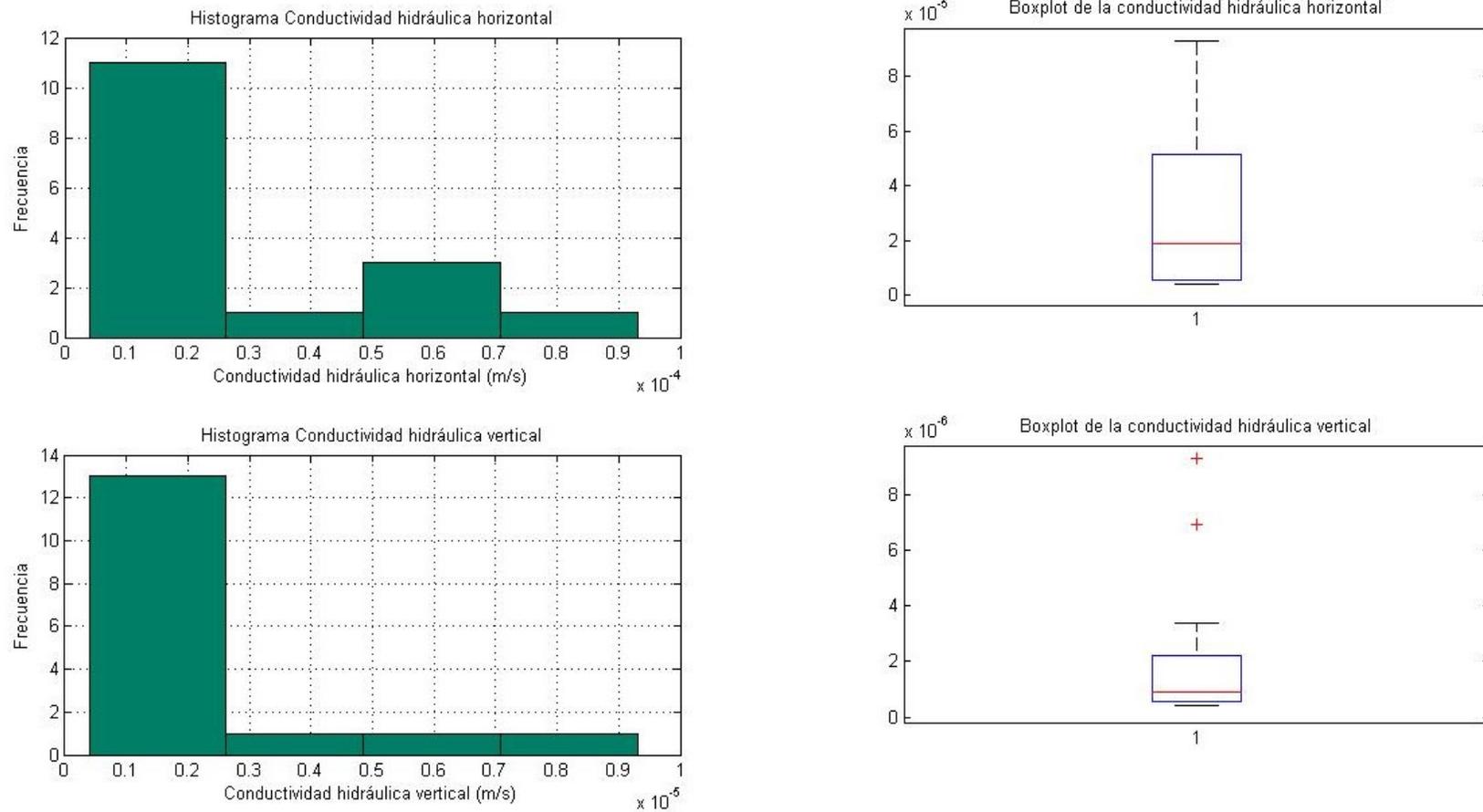


Figura 14. Histogramas y boxplots de las conductividades hidráulicas horizontal y vertical de las rocas volcánicas andesíticas del Plioceno Inferior (Tpv).

Modelo geostatístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

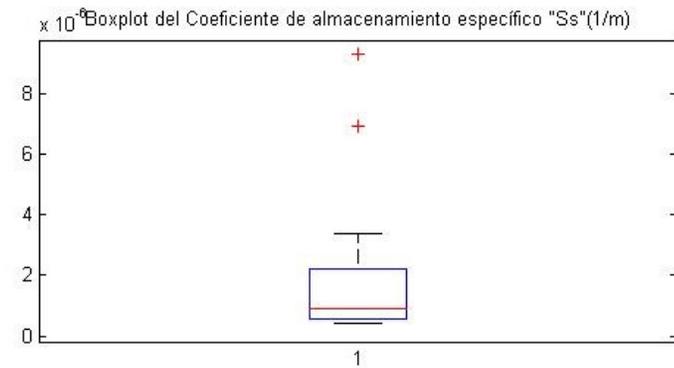
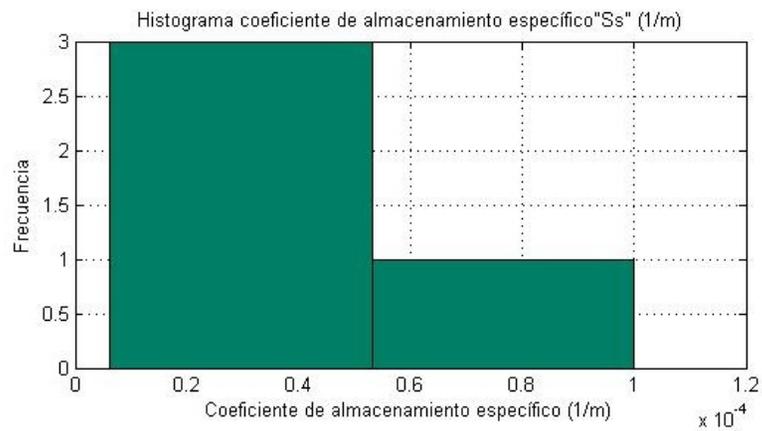
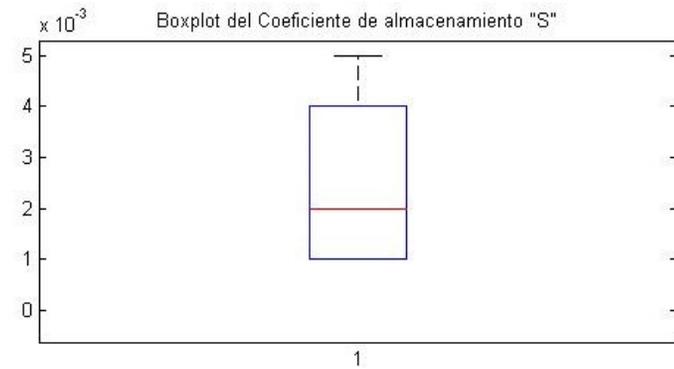
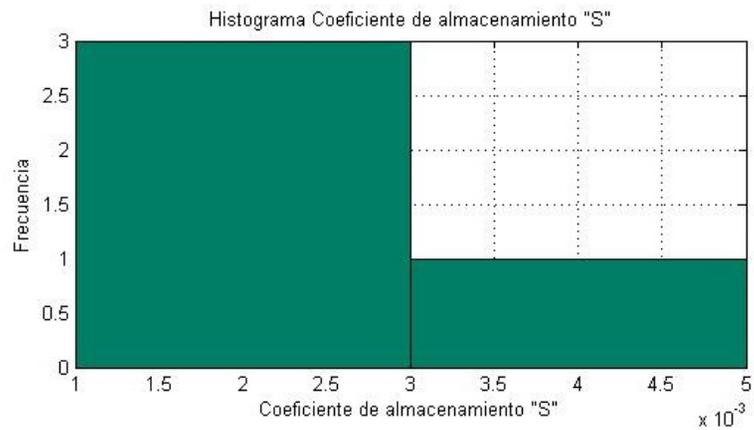


Figura 15. Histogramas y boxplots de los Coeficientes de almacenamiento (S) y Coeficiente de almacenamiento específico (Ss) de las rocas volcánicas andesíticas del Plioceno Inferior (Tpv).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

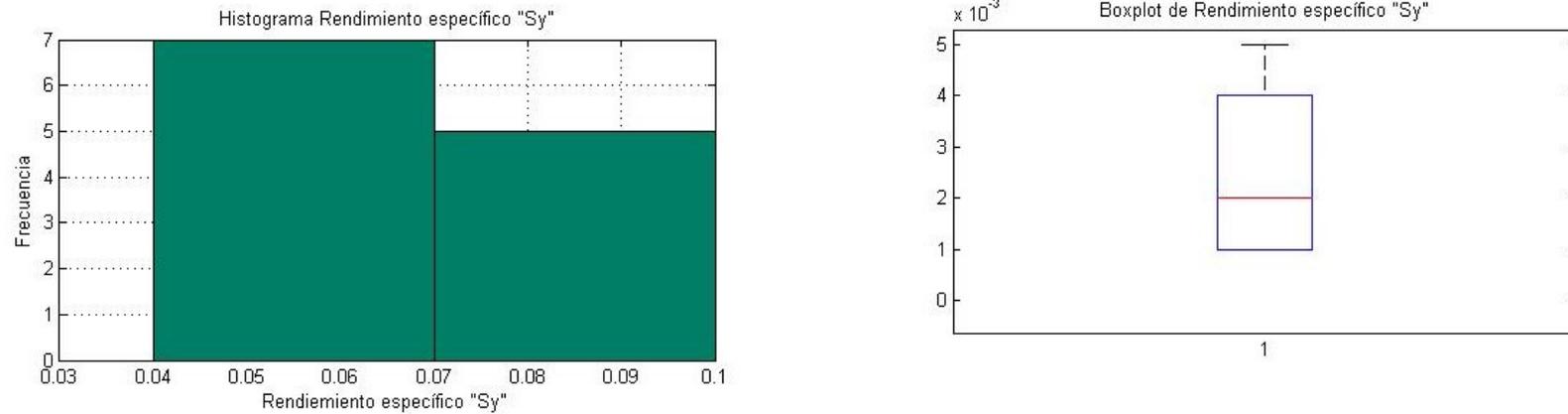


Figura 16. Histograma y boxplot de Rendimiento Específico (Sy) de las rocas volcánicas andesíticas del Plioceno Inferior (Tpv).

Estadísticos	Kh(m/s)	Kv(m/s)	S	Sy	Ss(1/m)
Media	2.2950E-05	2.2975E-06	6.6667E-04	5.0000E-02	1.7240E-05
Desviación Estándar	3.8708E-05	3.8692E-06	3.5119E-04	**	1.3761E-05
Varianza	1.4983E-09	1.4971E-11	1.2333E-07	**	1.8937E-10
Mediana	4.0500E-06	4.1000E-07	7.0000E-04	5.0000E-02	2.0000E-05
Curtosis	3.9919E+00	3.9909E+00	**	**	**
Coefficiente de asimetría	1.9976E+00	1.9973E+00	-4.2327E-01	**	-8.6625E-01

Tabla 5. Resumen de los estadísticos de las propiedades hidráulicas de las rocas volcánicas andesíticas del Plioceno Inferior (Tpv).

Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

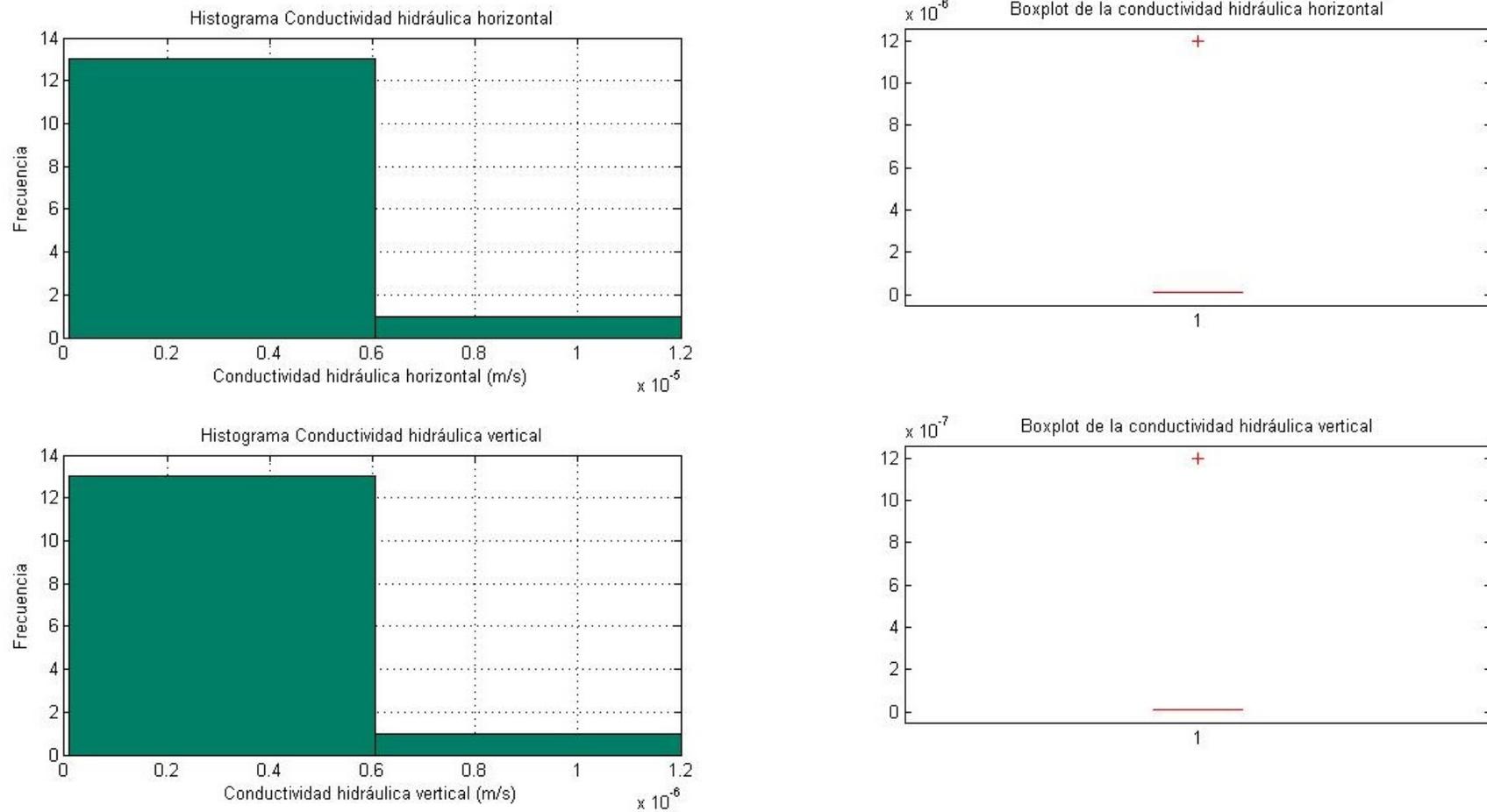


Figura17. Histogramas y boxplots de las conductividades hidráulicas horizontal y vertical de la Secuencia estratificada (Tppc).

Modelo geostatístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México

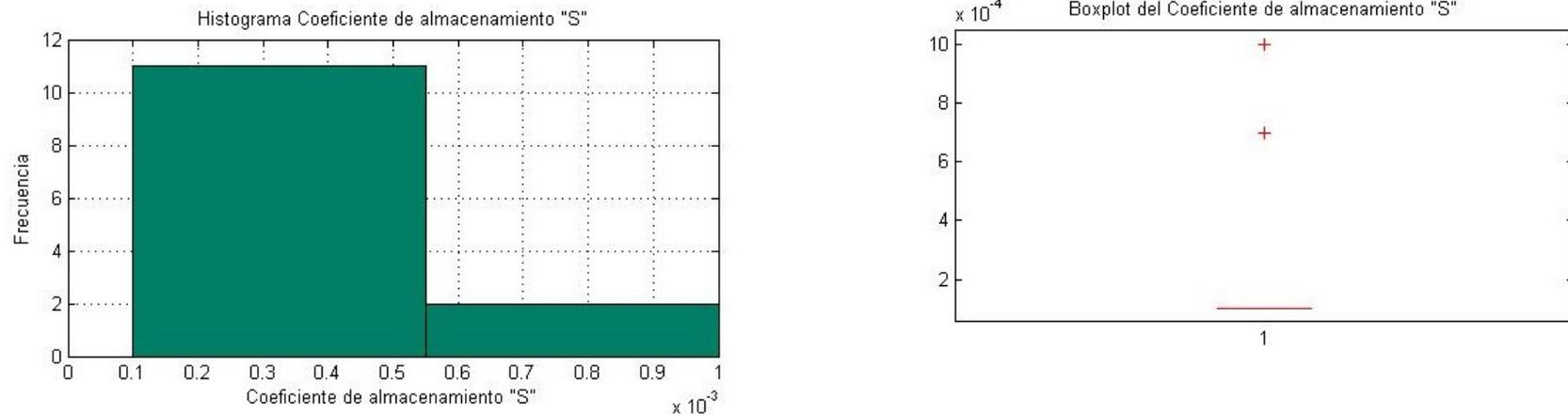


Figura 18. Histogramas y boxplots de los Coeficientes de almacenamiento (S) de la Secuencia estratificada (Tppc).

Estadísticos	Kh(m/s)	Kv(m/s)	S
Media	9.5000E-07	9.5000E-08	2.1538E-04
Desviación Estándar	3.1804E-06	3.1804E-07	2.8823E-04
Varianza	1.0115E-11	1.0115E-13	8.3077E-08
Mediana	1.0000E-07	1.0000E-08	1.0000E-04
Curtosis	1.4000E+01	1.4000E+01	4.7847E+00
Coeficiente de asimetría	3.7417E+00	3.7417E+00	2.3852E+00

Tabla 6. Resumen de los estadísticos de las propiedades hidráulicas de la Secuencia estratificada (Tppc).