



## 5.f Caracterización geotécnica y modelos estratigráficos

### 5.f.1 Antecedentes sobre la caracterización del subsuelo de la zona oriente del Valle de México

Con el propósito de contar con un conocimiento general de las condiciones estratigráficas del subsuelo para el presente proyecto **previo a la exploración particular realizada para el proyecto**, en este apartado, se presentan los resultados hasta ahora obtenidos por el grupo de trabajo del Laboratorio de Geoinformática del II-UNAM, sobre los análisis de distribución espacial de las propiedades del subsuelo en la zona oriente del Valle de México (Rodríguez, 2010). **Más adelante, se presenta el análisis de detalle que se realizó empleando exclusivamente la información de la campaña de exploración geotécnica realizada entre 2012 y 2013 en la zona de estudio.**

El análisis se realizó con base en los perfiles geotécnicos contenidos en el Sistema de Información Geográfico para sondeos Geotécnicos, SIG-SG (Laboratorio de Geoinformática, II-UNAM), el cual almacena más de 10,000 sondeos geotécnicos de diferente tipo. **Para el presente proyecto se construyó un SIG-SG particular que incluye los sondeos de la campaña de exploración geotécnica realizada entre 2012 y 2013.**

Se ha recurrido a las técnicas geoestadística para la caracterización del subsuelo. Los análisis se realizaron empleando la misma metodología descrita en el capítulo precedente. Por tanto, en este apartado únicamente se presentan los resultados.

Asimismo, debe señalarse que estos sondeos han sido proporcionados por diferentes empresas y dependencias para fines de investigación y actualizar la zonificación geotécnica del subsuelo del Valle de México, por tanto, no son de dominio público.

#### 5.f.1.1 Distribución espacial del contenido de agua

Para este análisis se consideran 193 sondeos, realizados entre 1995 y 2009, su ubicación se muestra en la Fig 5.f.1. **Estos análisis se realizaron antes de contar con la información de la exploración geotécnica realizada entre 2012 y 2013 en la zona de estudio.**

Empleando la técnica del *Kriging Simple*, se estimaron perfiles de contenido de agua,  $w(\%)$ , a cada 250m a lo largo de los ejes preferenciales “A, B, C, D” y “1, 2, 3, 4 y 5”, definidos en la Fig 5.f.1. La propiedad se estimó puntualmente a lo largo de la profundidad con un paso de cálculo de 25cm, hasta una profundidad de 40m. Asimismo, empleando la técnica de simulación condicional se elaboraron perfiles simulados de contenido de agua,  $w(\%)$ , a lo largo de los mismos ejes preferenciales.



En las Fig 5.f.2 a 5.f.10 se presentan las secciones transversales estimadas a lo largo de los ejes preferenciales definidos, así como la desviación estándar de estimación, estos modelos representan de forma sencilla la distribución espacial del contenido de agua a lo largo de cada eje. En las mismas figuras se presentan tres simulaciones (posibles configuraciones) de la distribución de contenido de agua a lo largo de los mismos ejes.

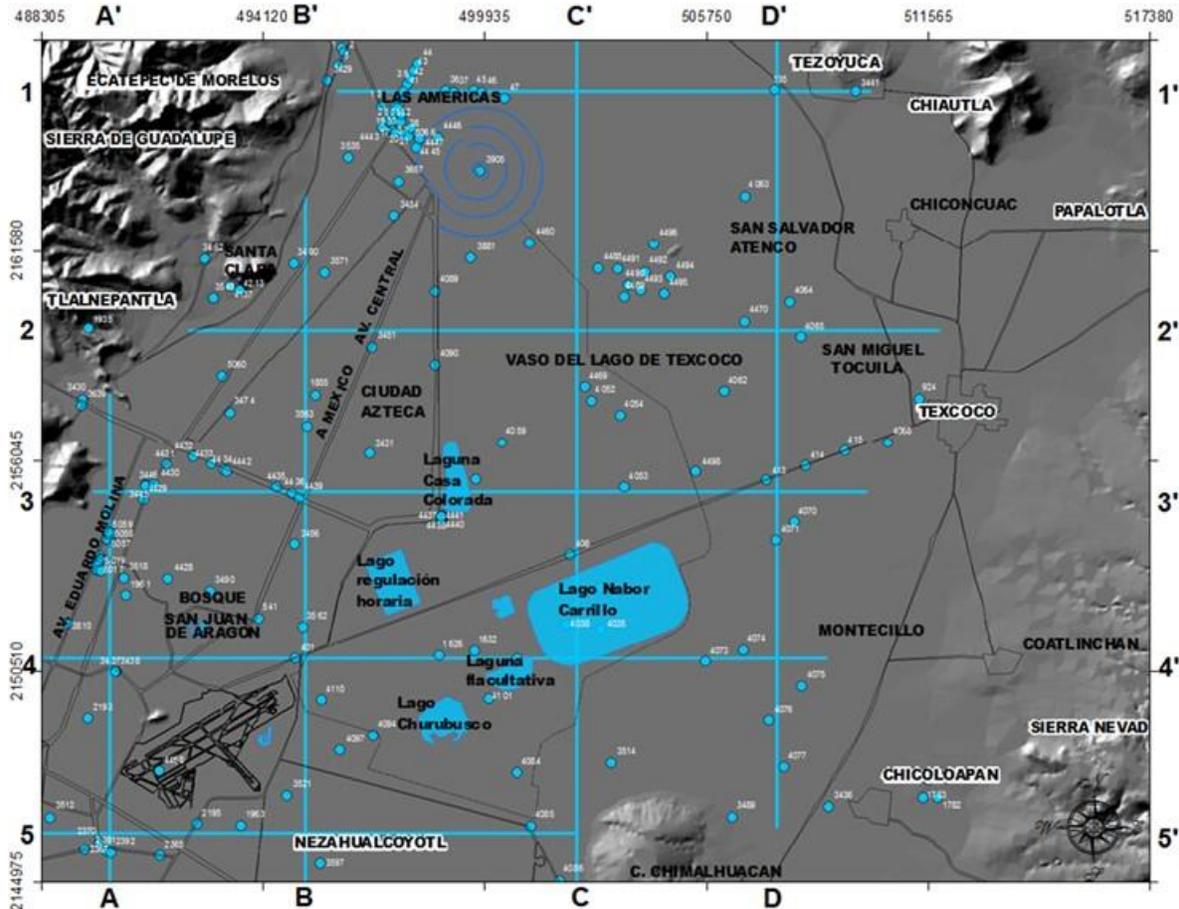
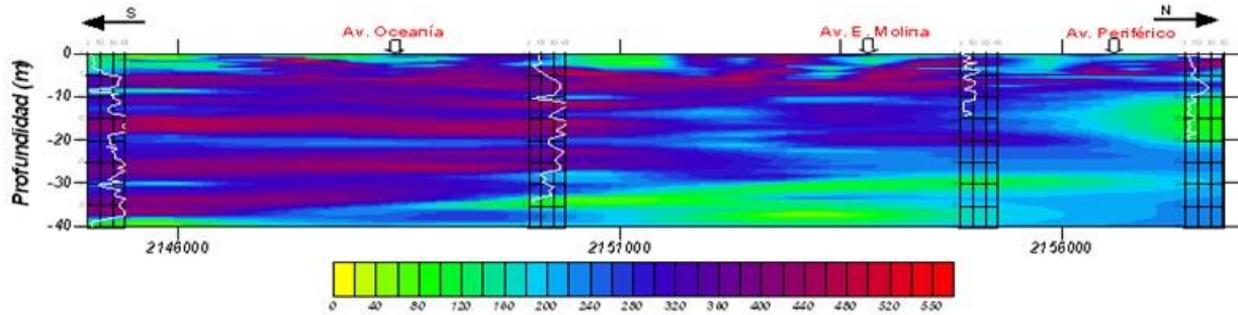
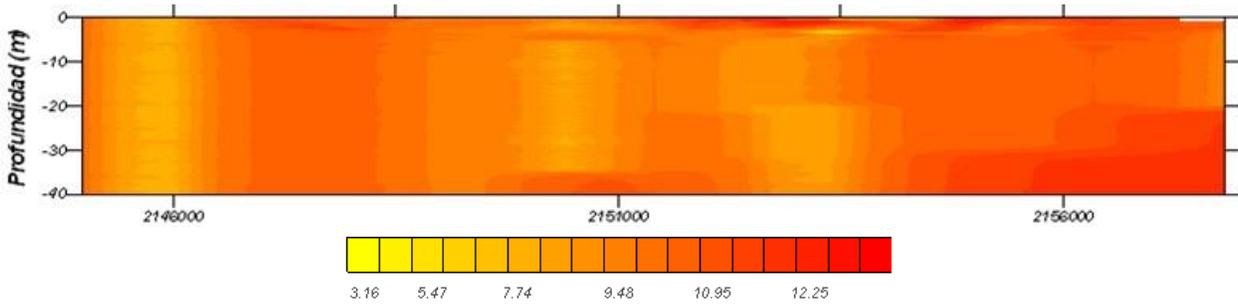


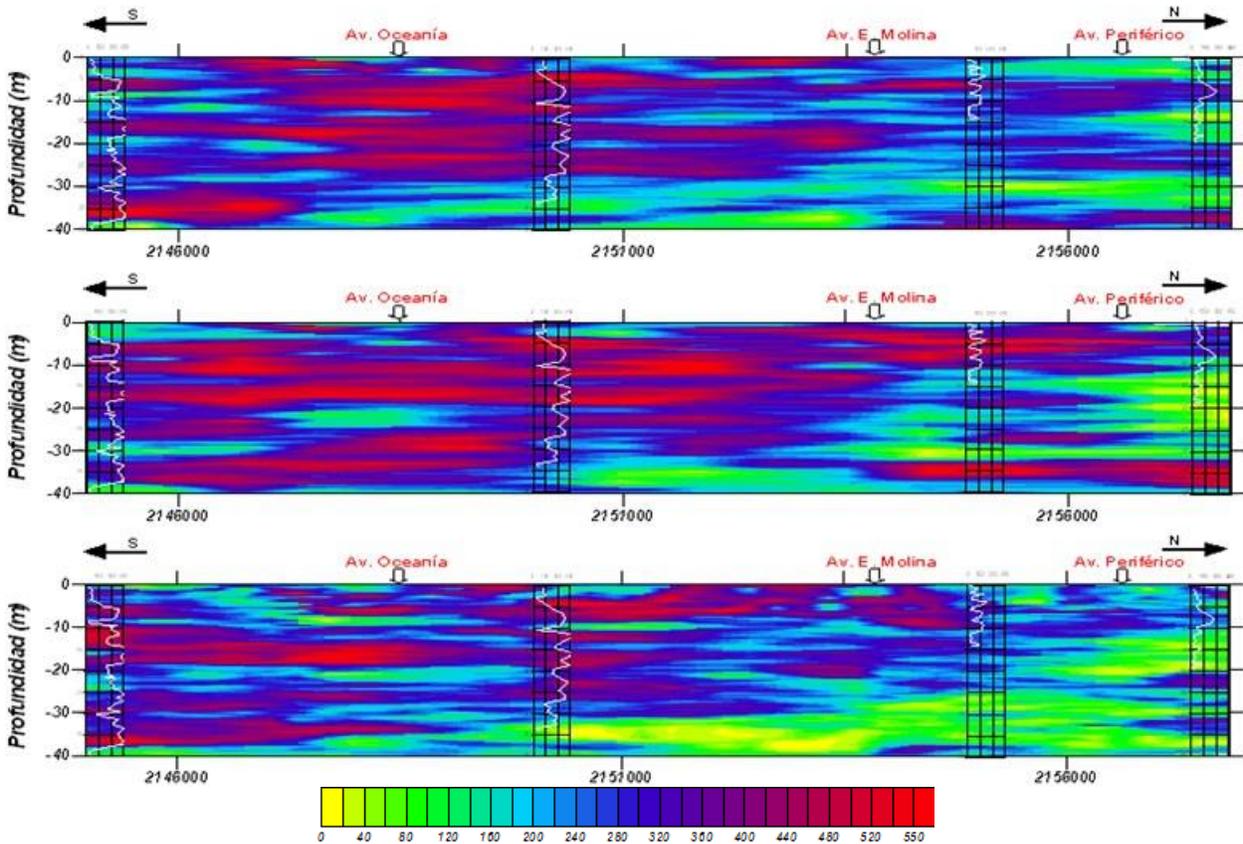
Fig 5.f.1 Distribución de sondeos disponibles, zona oriente.



a) Sección transversal estimada del contenido de agua

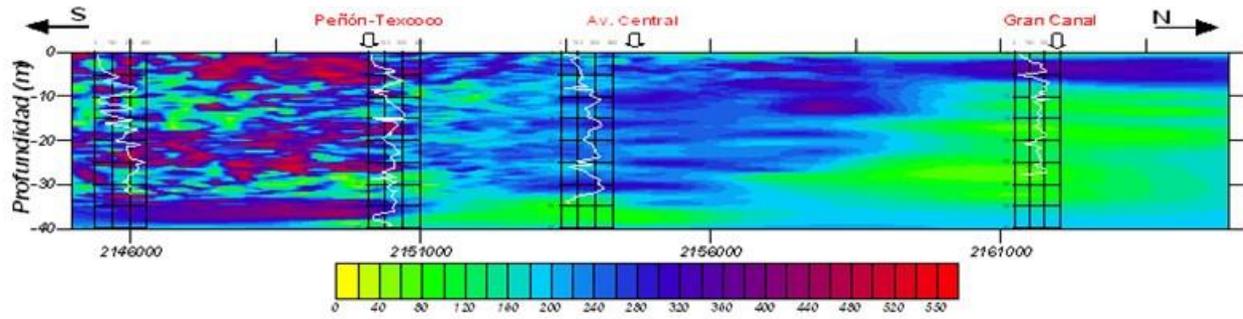


b) Desviación estándar de estimación

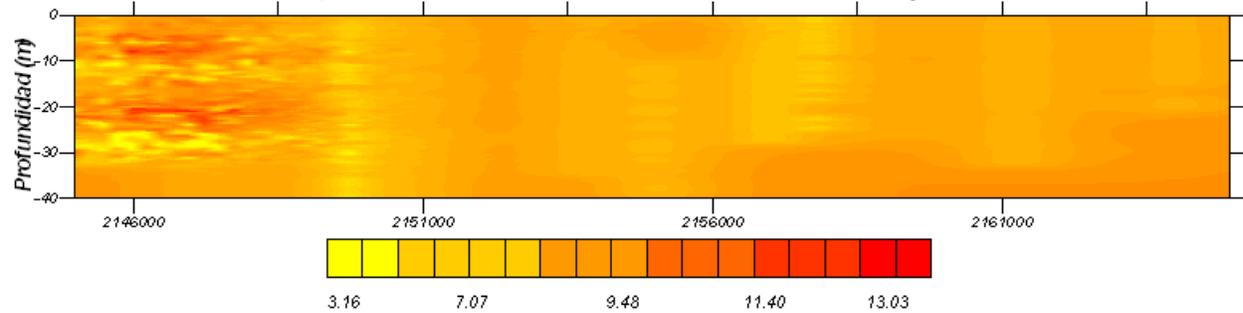


c) Secciones transversales simuladas del contenido de agua

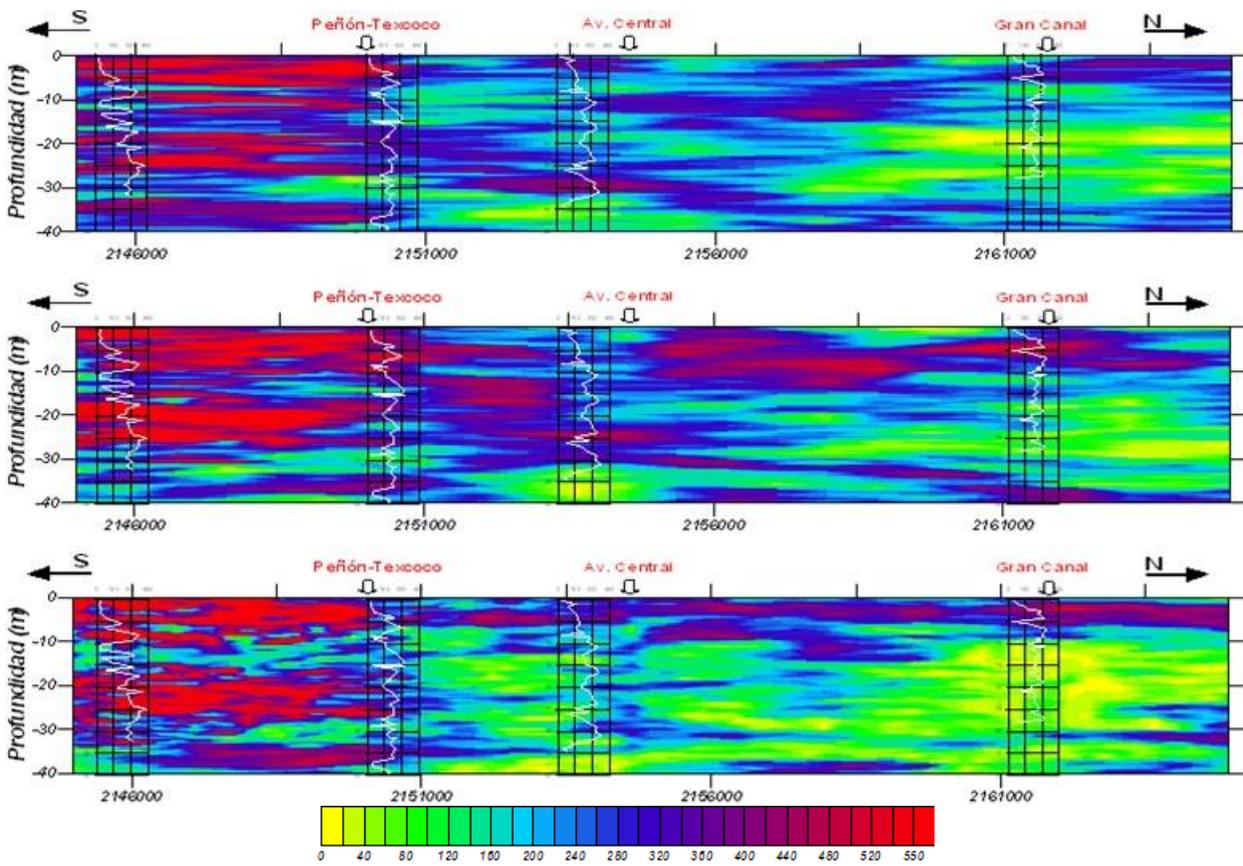
Fig 5.f.2 Distribución espacial del contenido de agua sobre el eje A, zona oriente.



a) Sección transversal estimada del contenido de agua

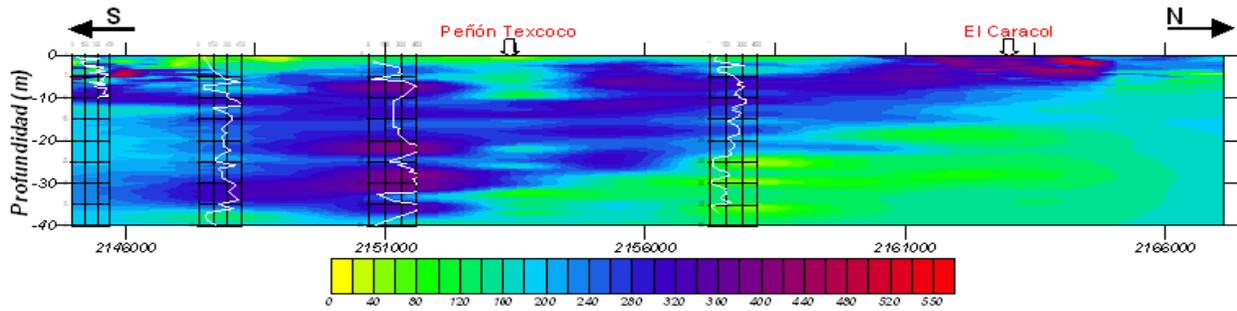


b) Desviación estándar de estimación

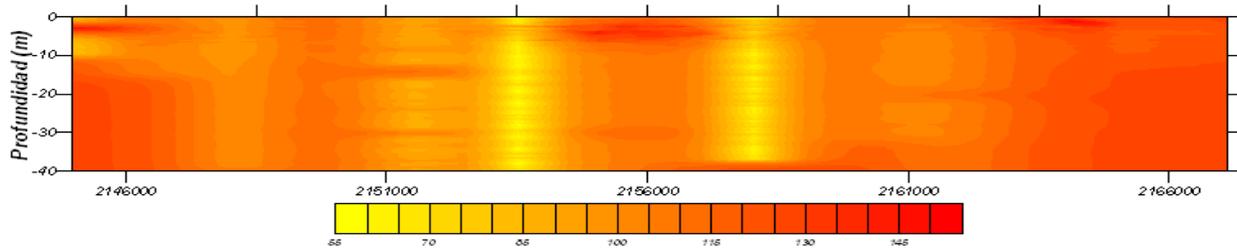


c) Secciones transversales simuladas del contenido de agua

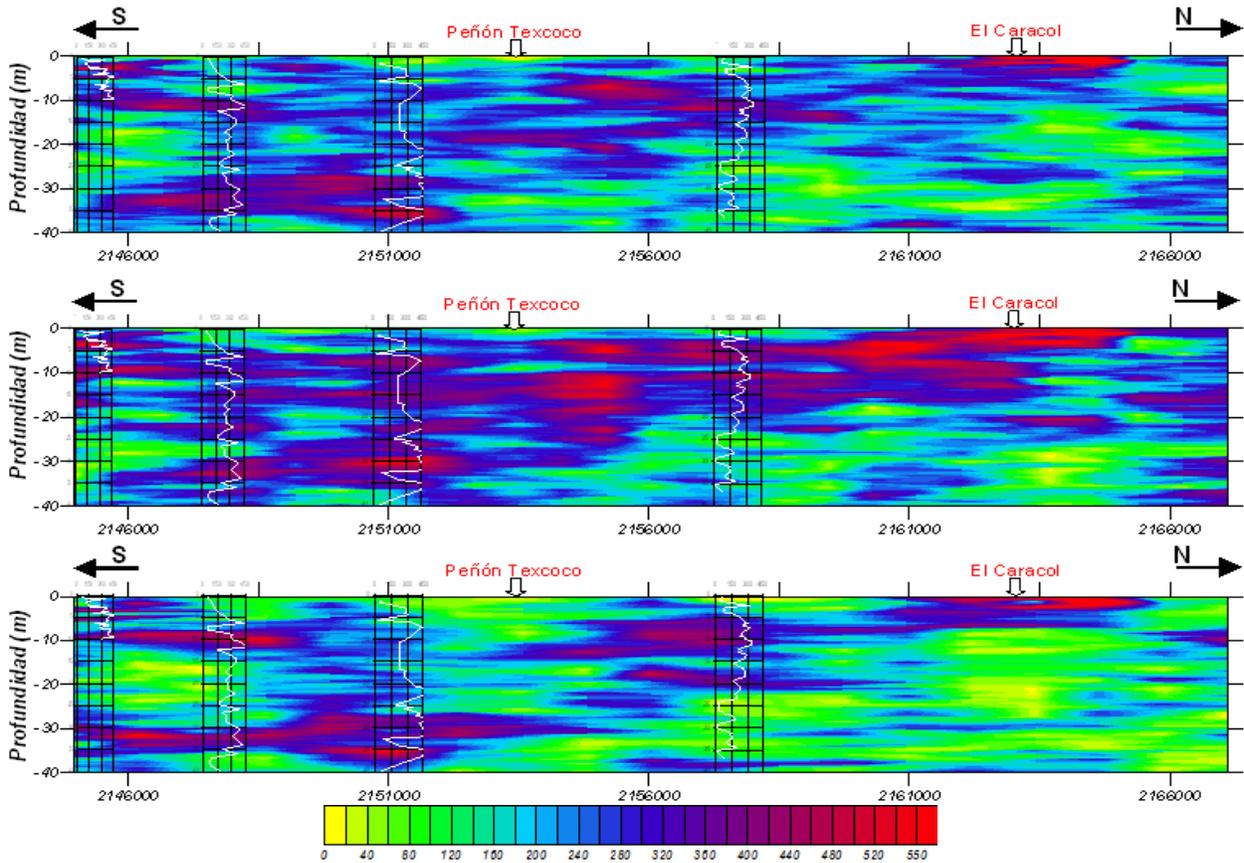
Fig 5.f.3 Distribución espacial del contenido de agua sobre el eje B, zona oriente.



a) Sección transversal estimada del contenido de agua

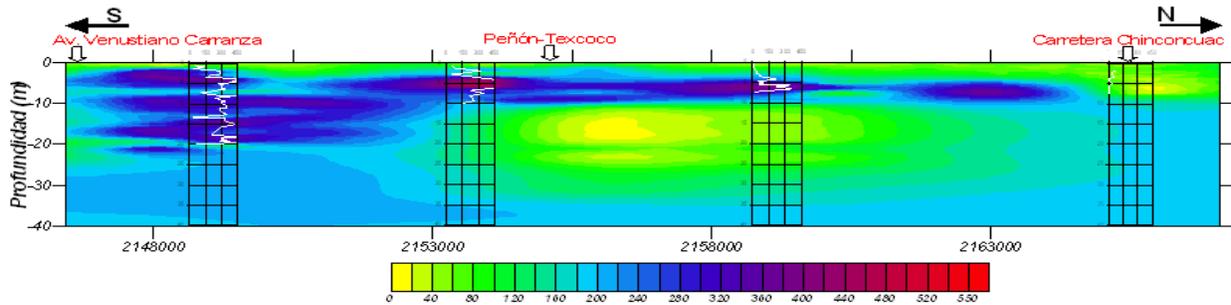


b) Desviación estándar de estimación

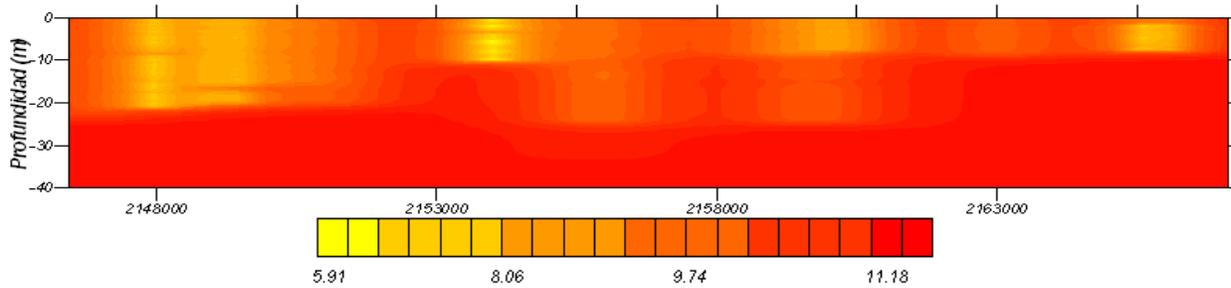


c) Secciones transversales simuladas del contenido de agua

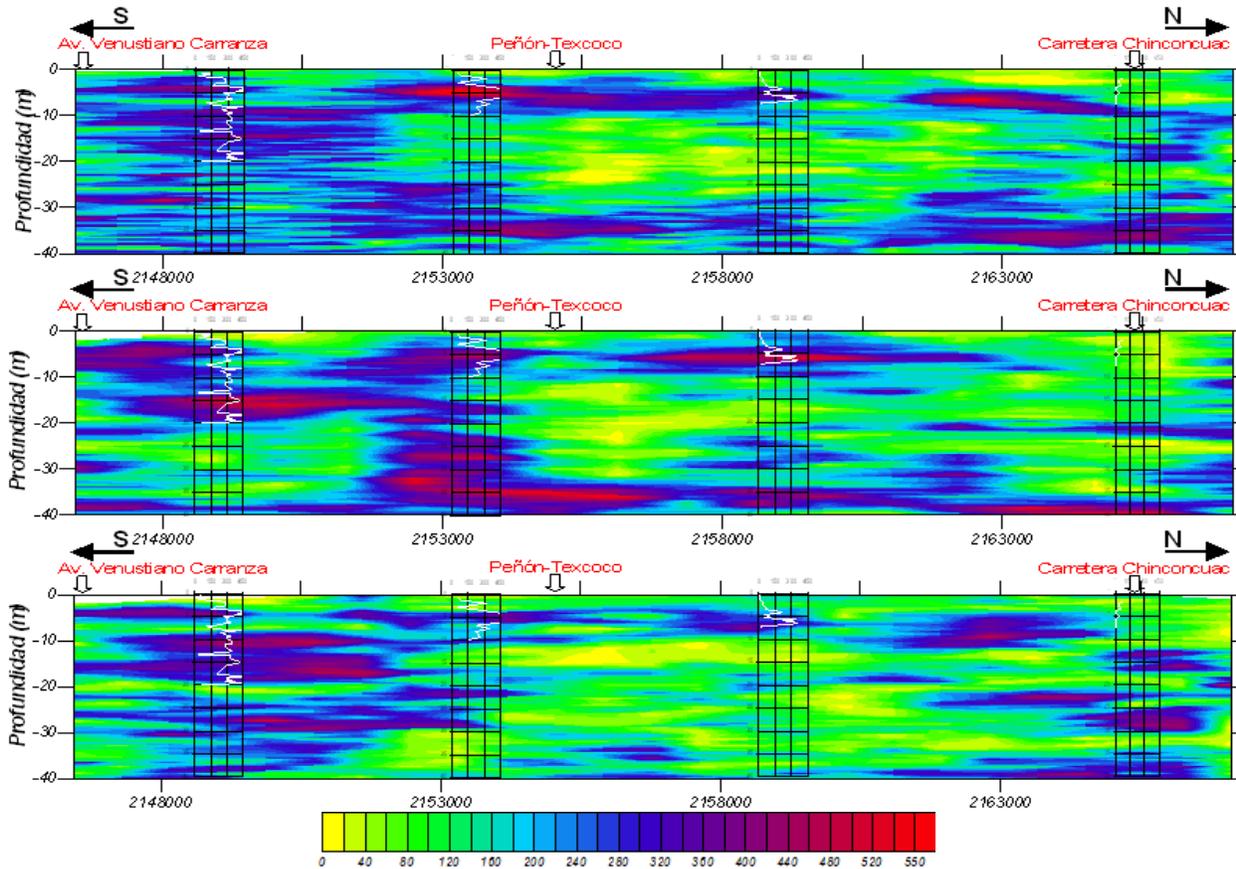
Fig 5.f.4 Distribución espacial del contenido de agua sobre el eje C, zona oriente.



a) Sección transversal estimada del contenido de agua



b) Desviación estándar de estimación



c) Secciones transversales simuladas del contenido de agua

Fig 5.f.5 Distribución espacial del contenido de agua sobre el eje D, zona oriente.

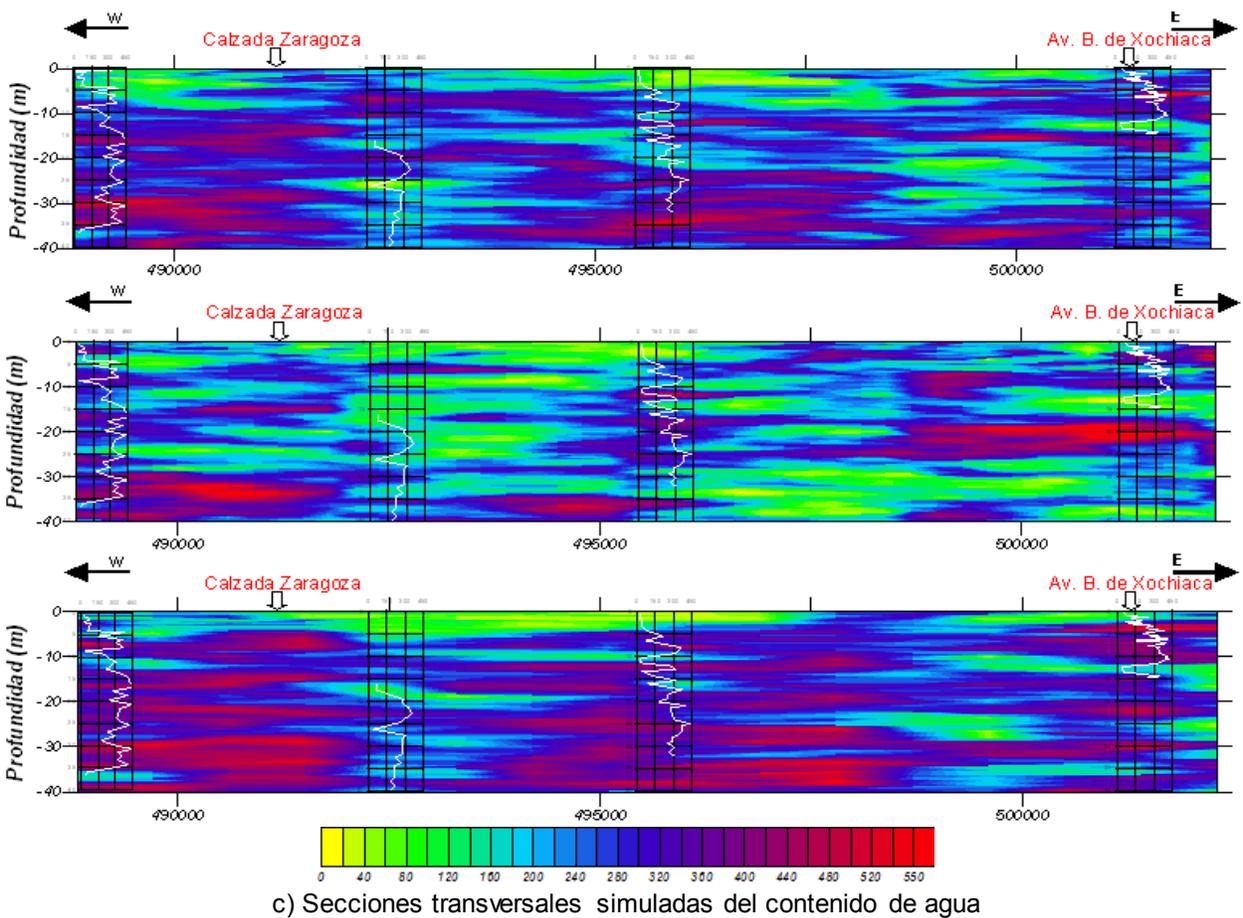
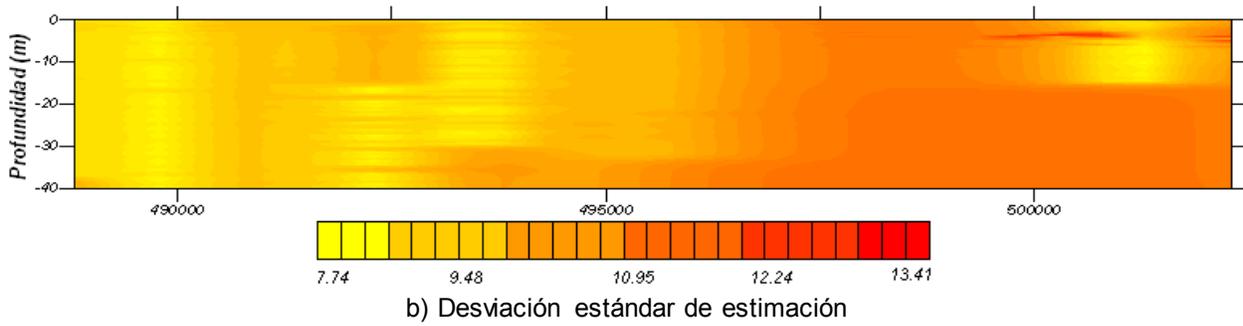
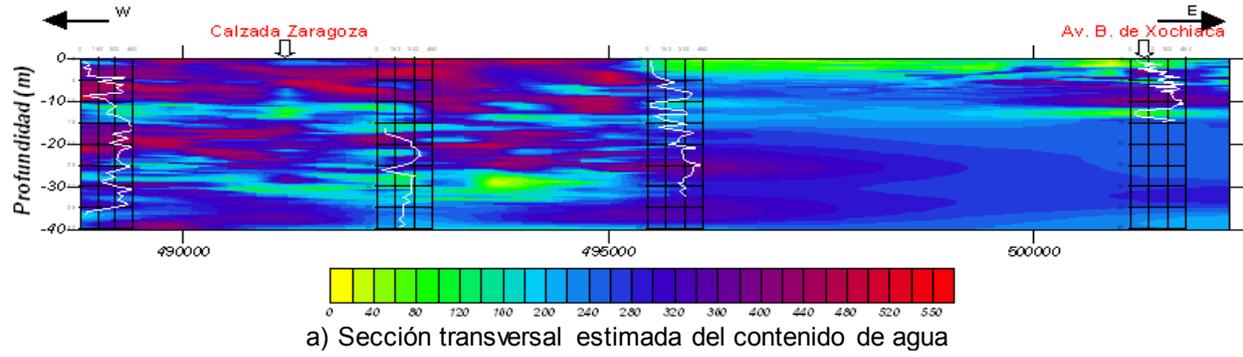
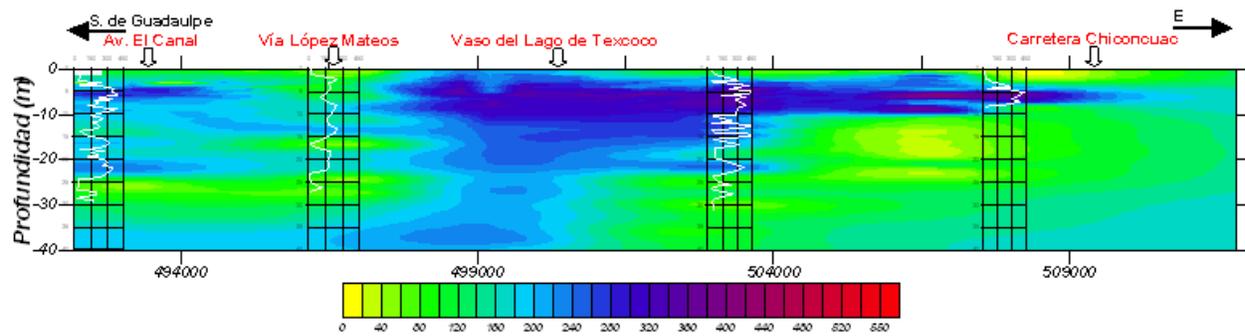
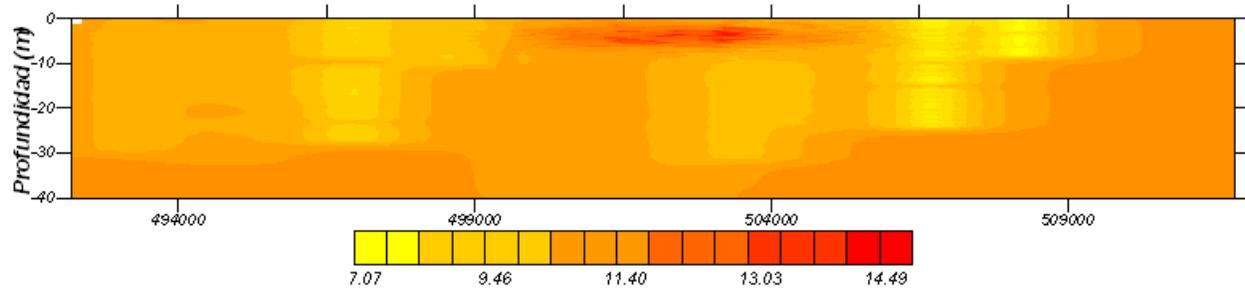


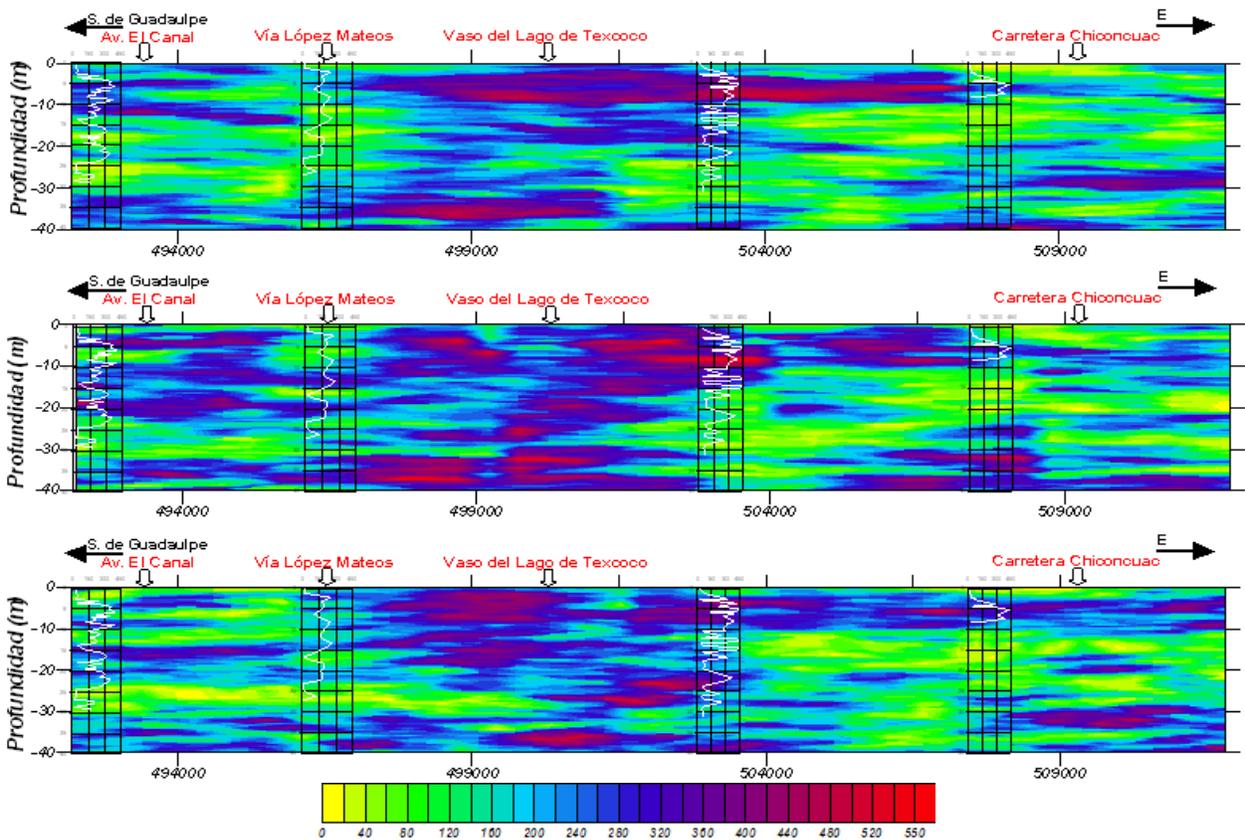
Fig 5.f.6 Distribución espacial del contenido de agua sobre el eje 1, zona oriente.



a) Sección transversal estimada del contenido de agua



b) Desviación estándar de estimación



c) Secciones transversales simuladas del contenido de agua

Fig 5.f.7 Distribución espacial del contenido de agua sobre el eje 2, zona oriente.

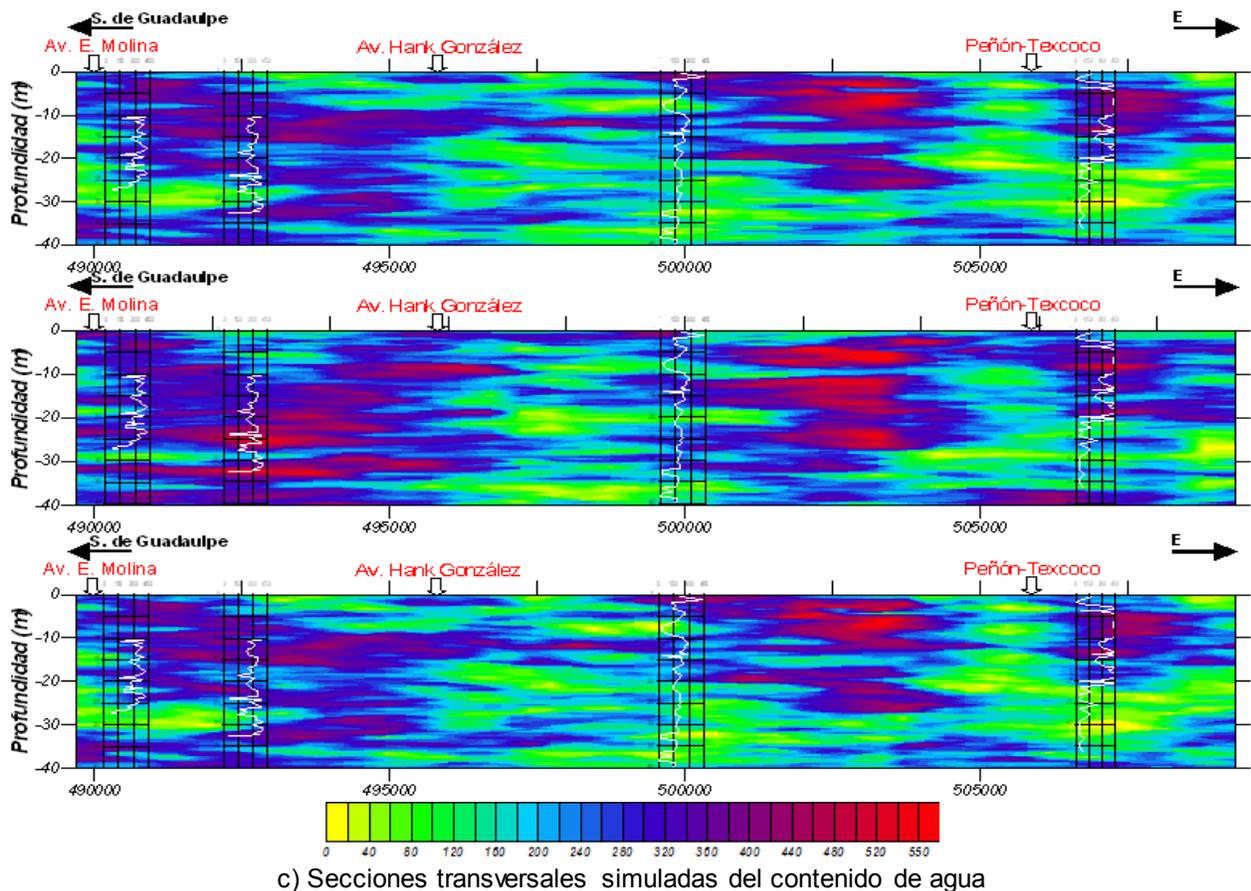
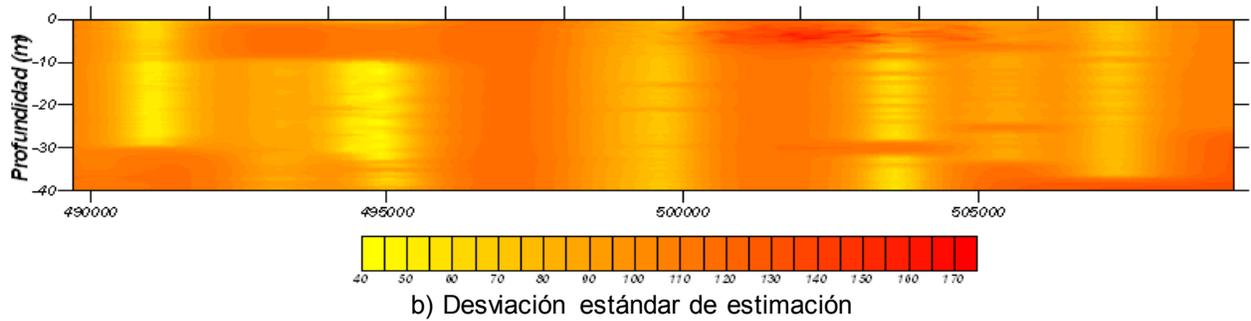
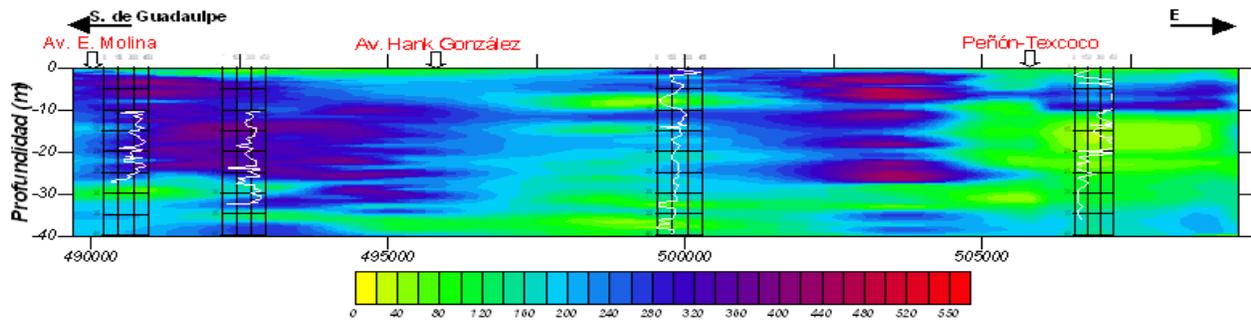


Fig 5.f.8 Distribución espacial del contenido de agua sobre el eje 3, zona oriente.

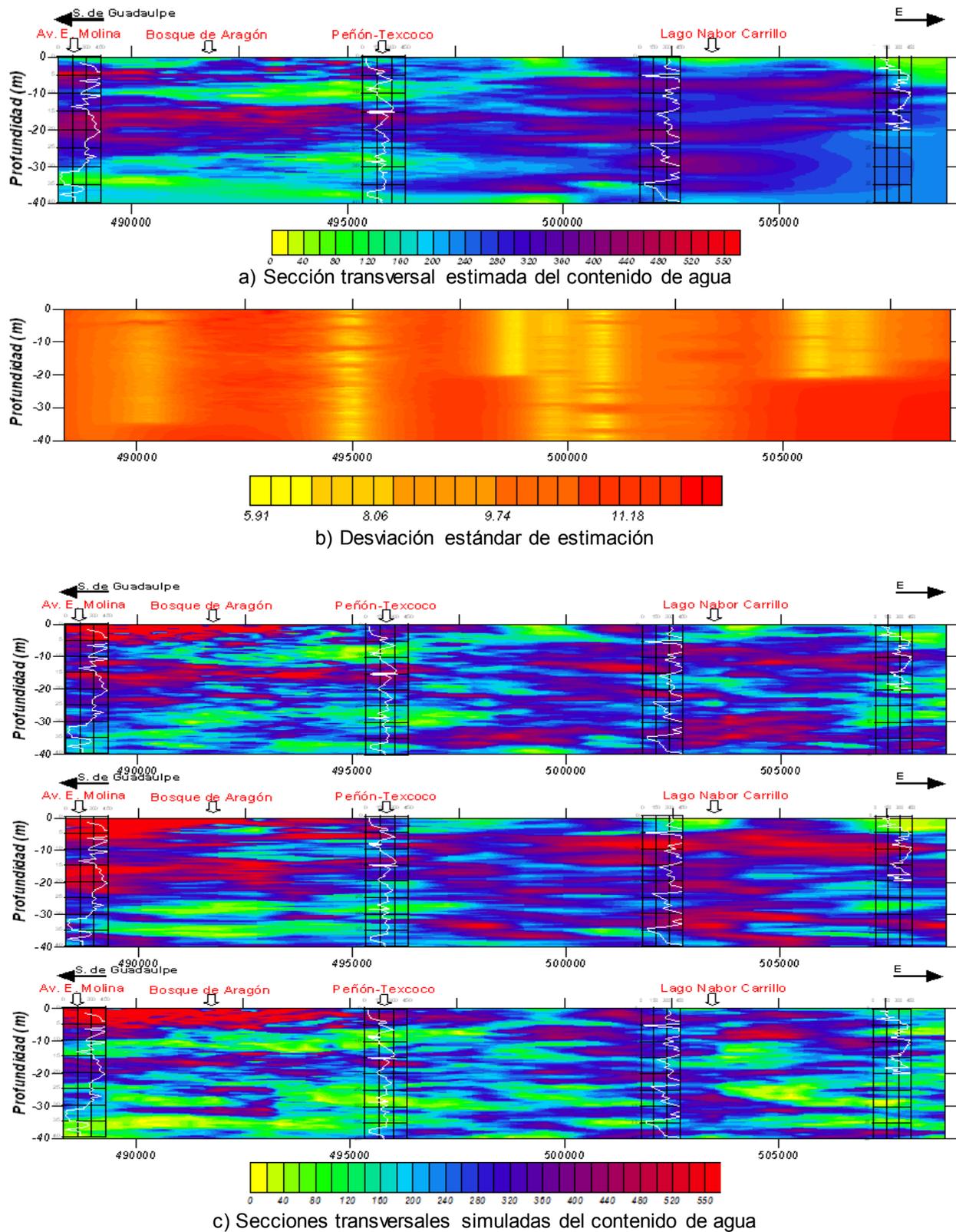
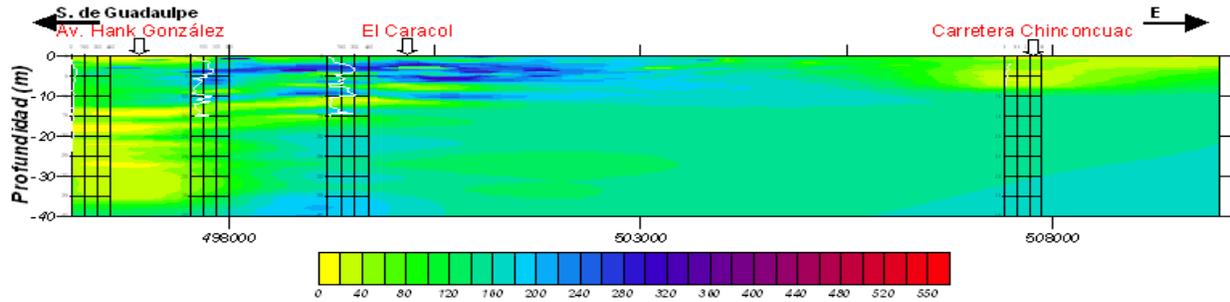
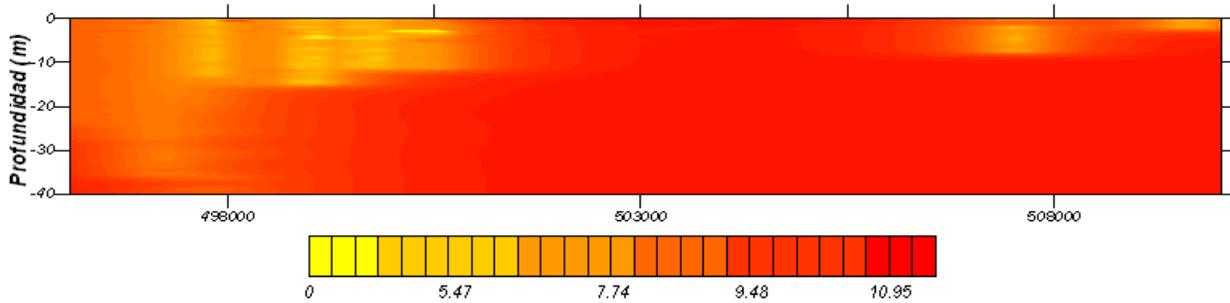


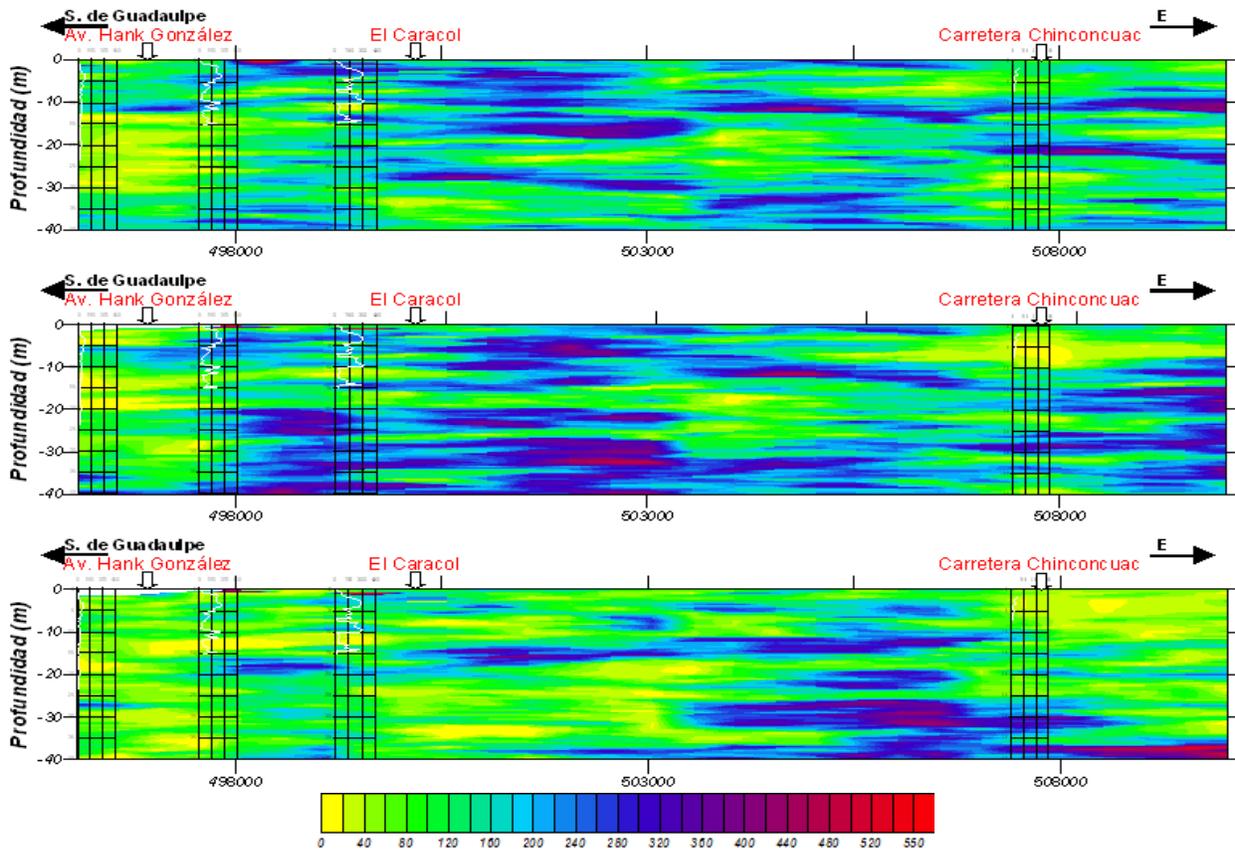
Fig 5.f.9 Distribución espacial del contenido de agua sobre el eje 4, zona oriente.



a) Sección transversal estimada del contenido de agua



b) Desviación estándar de estimación



c) Secciones transversales simuladas del contenido de agua

Fig 5.f.10 Distribución espacial del contenido de agua sobre el eje 5, zona oriente.

Así también, se construyó un modelo 3D con las secciones transversales estimadas (Fig 5.f.11), este modelo permite observar en conjunto la distribución espacial del contenido de agua dentro de la zona de estudio.

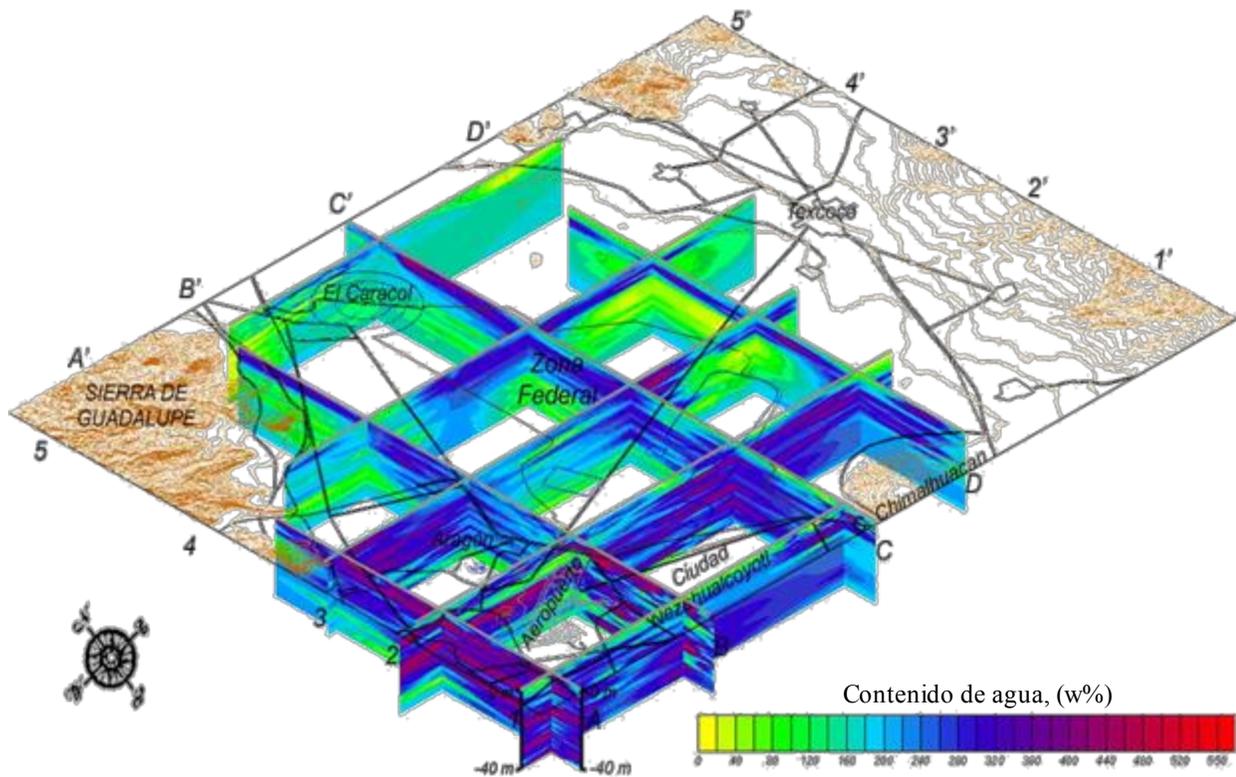


Fig 5.f.11 Modelo 3D de la distribución espacial del contenido de agua, zona oriente.

### *Interpretación de resultados*

De acuerdo con los resultados del análisis de distribución espacial del contenido de agua, representados en las Figs 5.f.2 a 5.f.11, se tiene que:

Los valores altos de contenido de agua se localizan en la zona del aeropuerto internacional de la ciudad de México y el ex *Lago de Texcoco*.

En las inmediaciones de la *Sierra de Guadalupe*, el municipio de *Ecatepec* y la carretera a *Chinconcuac* se registraron valores bajos de contenidos de agua.

La magnitud del contenido de agua decrece hacia el norte de la zona oriente.

La desviación estándar de estimación de las secciones transversales señala las zonas de mayor incertidumbre donde convendría contar en el futuro con exploraciones geotécnicas adicionales.

### 5.f.1.2 Distribución espacial de la resistencia de punta de cono eléctrico

Para este análisis se consideran 198 sondeos distribuidos como se muestra en la Fig 5.f.12, los cuales fueron realizados entre 1995 y 2009.

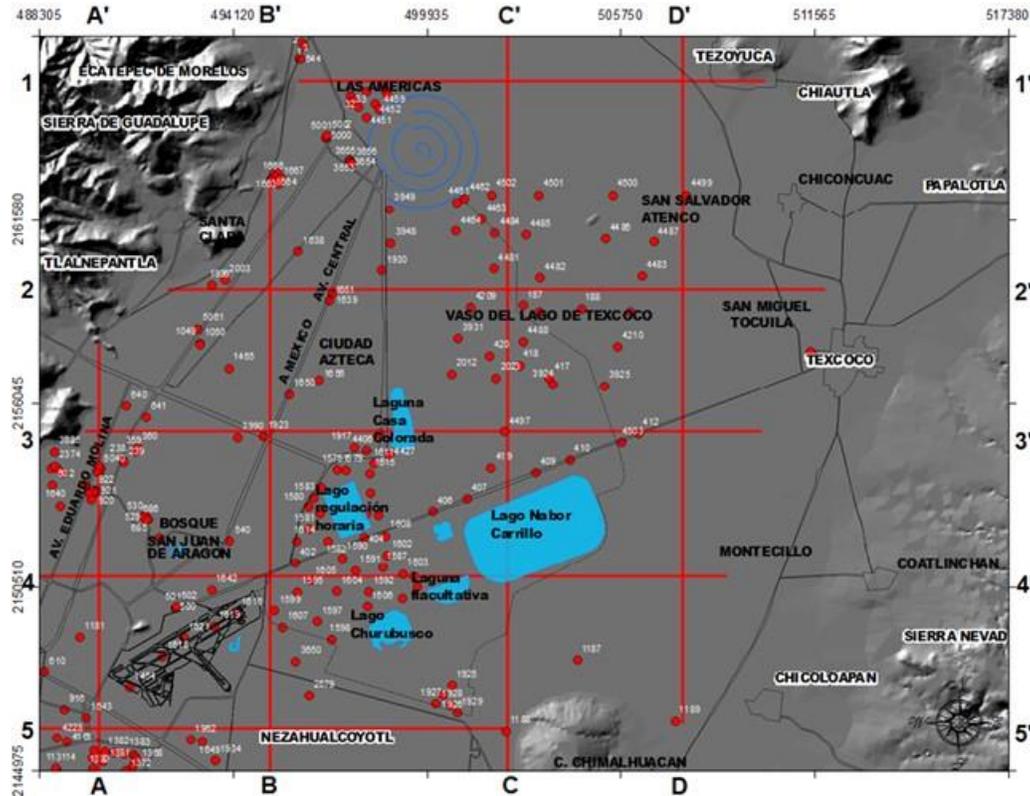


Fig 5.f.12 Distribución de sondeos CPT disponibles, zona oriente.

Empleando la técnica del *Kriging Simple*, se estimaron perfiles de resistencia de punta de cono eléctrico,  $q_c$  ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ), a cada 250m a lo largo de los ejes preferenciales “A, B, C, D” y “1, 2, 3, 4 y 5”, definidos en la Fig 5.f.12. La propiedad se estimó puntualmente a lo largo de la profundidad con un paso de cálculo de 25cm, hasta una profundidad de 40m. Asimismo, con la finalidad de ilustrar la variabilidad de la resistencia de punta de cono eléctrico, empleando la técnica de simulación condicional se elaboraron perfiles simulados de resistencia de punta de cono eléctrico a lo largo de los mismos ejes preferenciales.

Con el fin de evaluar visualmente la variación espacial la propiedad ( $q_c$ ), se construyeron secciones transversales estimadas y simuladas lo largo de los ejes preferenciales definidos, así como la desviación estándar de estimación, estos modelos representan de forma sencilla la distribución espacial de la resistencia de punta de cono eléctrico a lo largo de cada eje (Figs 5.f.13 a 5.f.21). En las mismas figuras se presentan tres simulaciones (posibles configuraciones) de la distribución de resistencia de punta de cono eléctrico a lo largo de los mismos ejes.

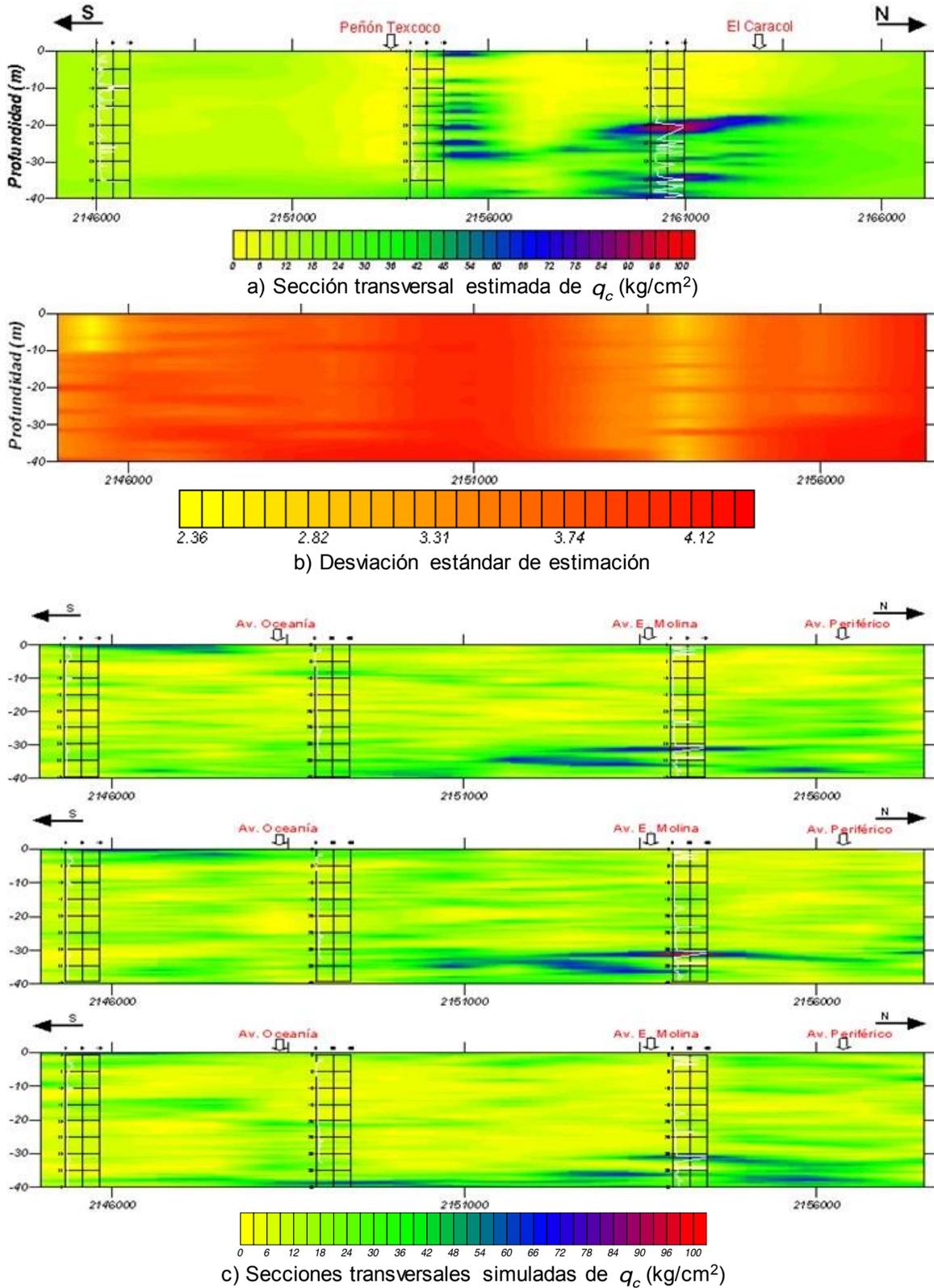


Fig 5.f.13 Distribución espacial de la resistencia de  $q_c$  sobre el eje A, zona oriente.

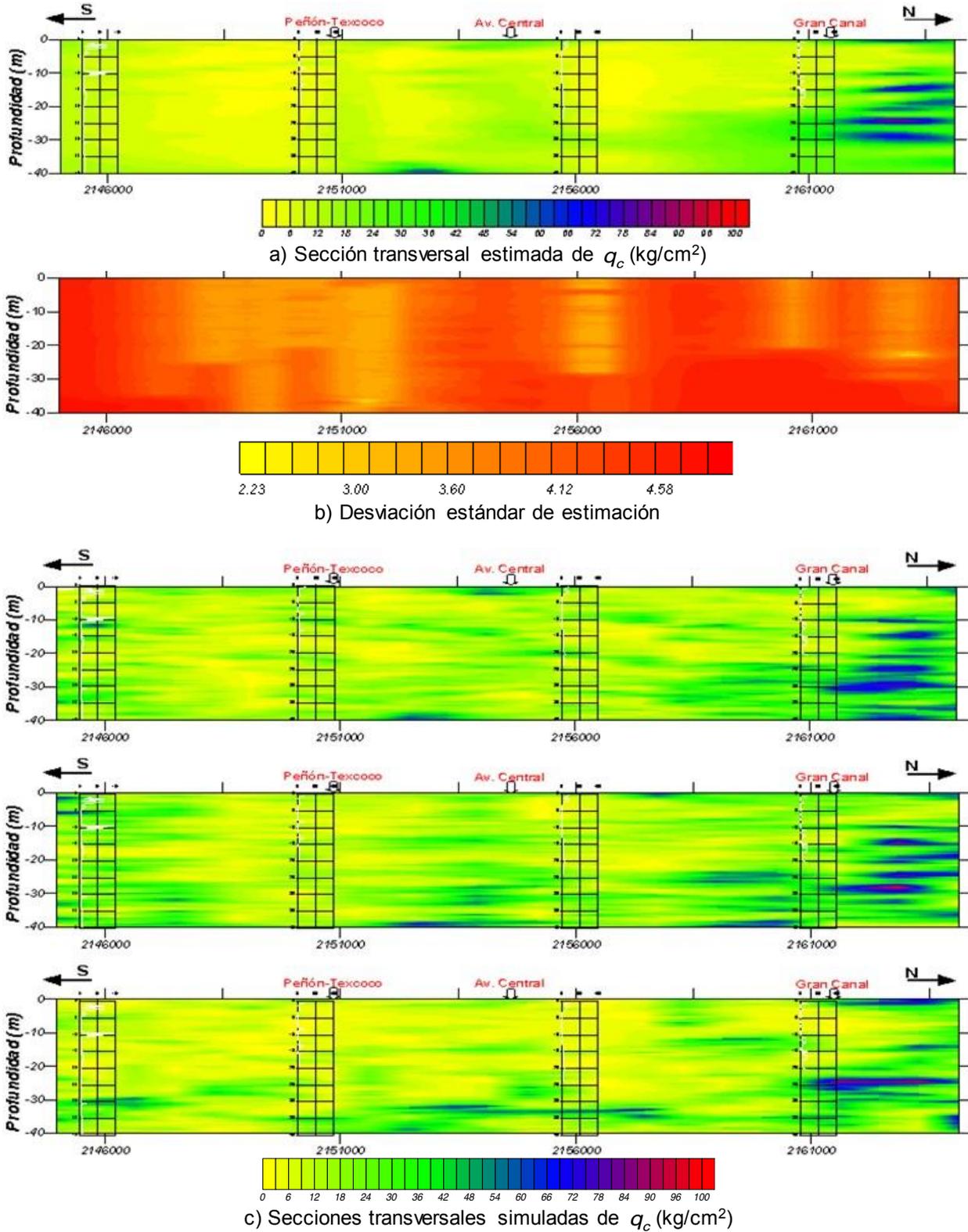


Fig 5.f.14 Distribución espacial de la resistencia de  $q_c$  sobre el eje B, zona oriente.

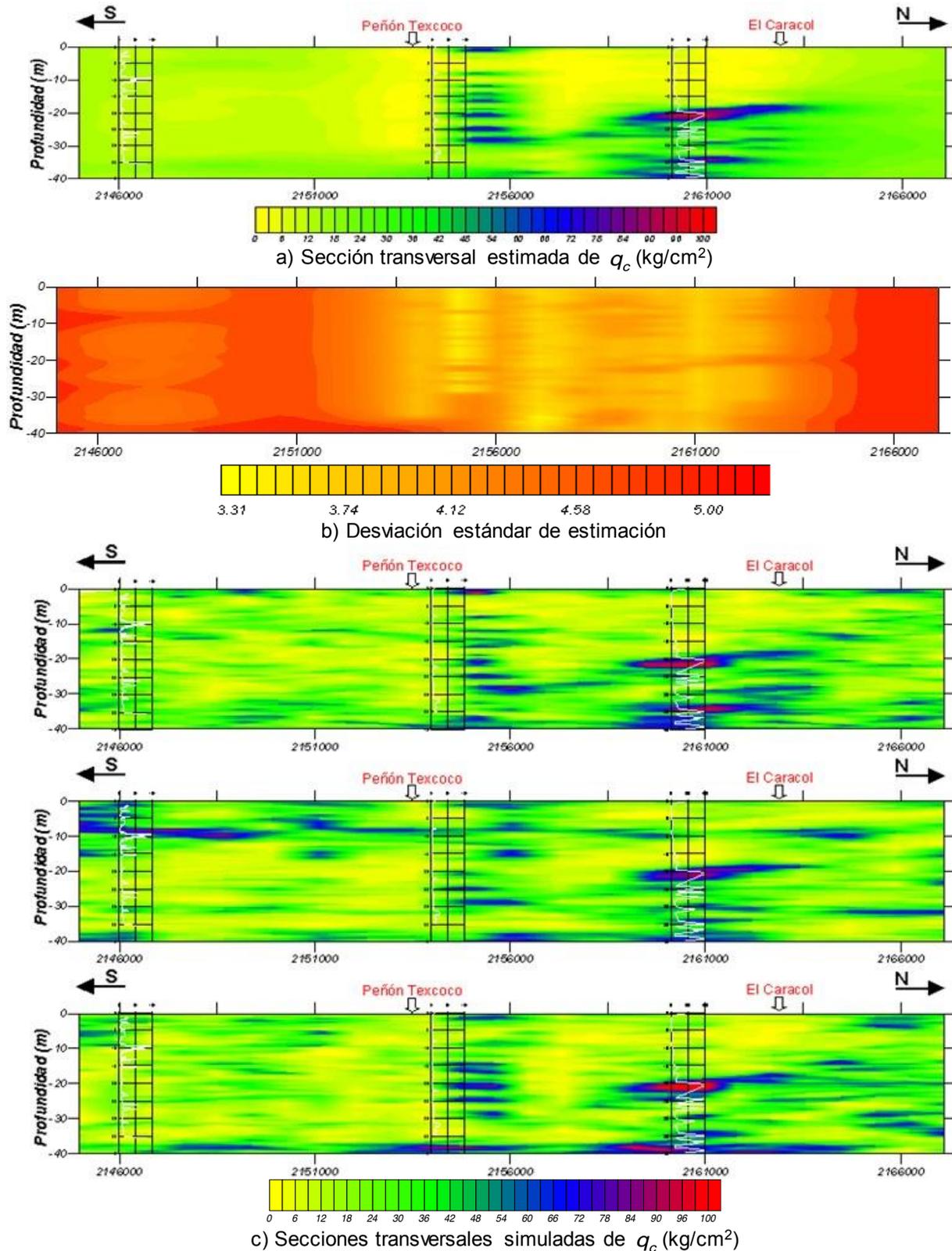


Fig 5.f.15 Distribución espacial de la resistencia de  $q_c$  sobre el eje C, zona oriente.

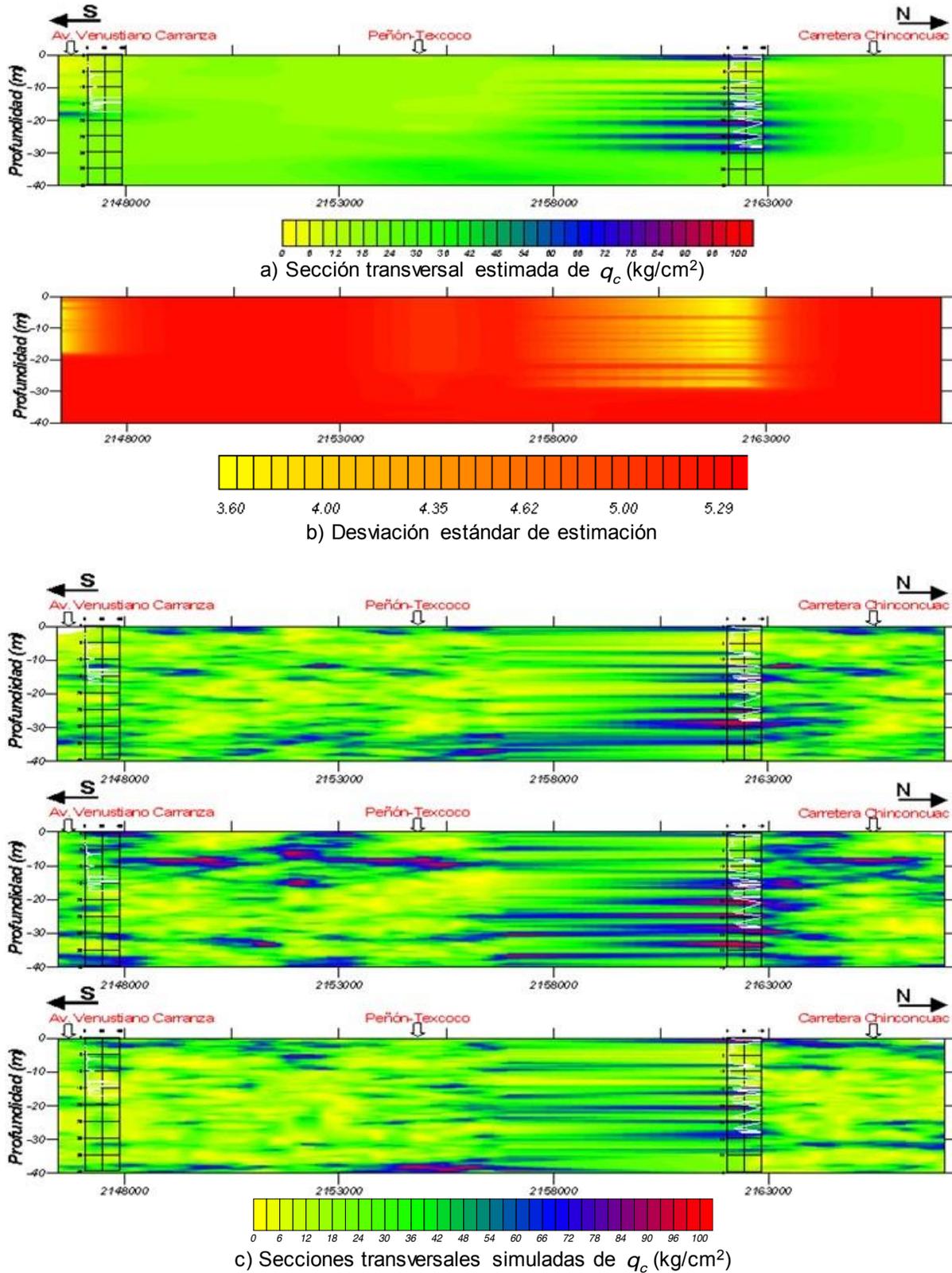


Fig 5.f.16 Distribución espacial de  $q_c$  sobre el eje D, zona oriente.

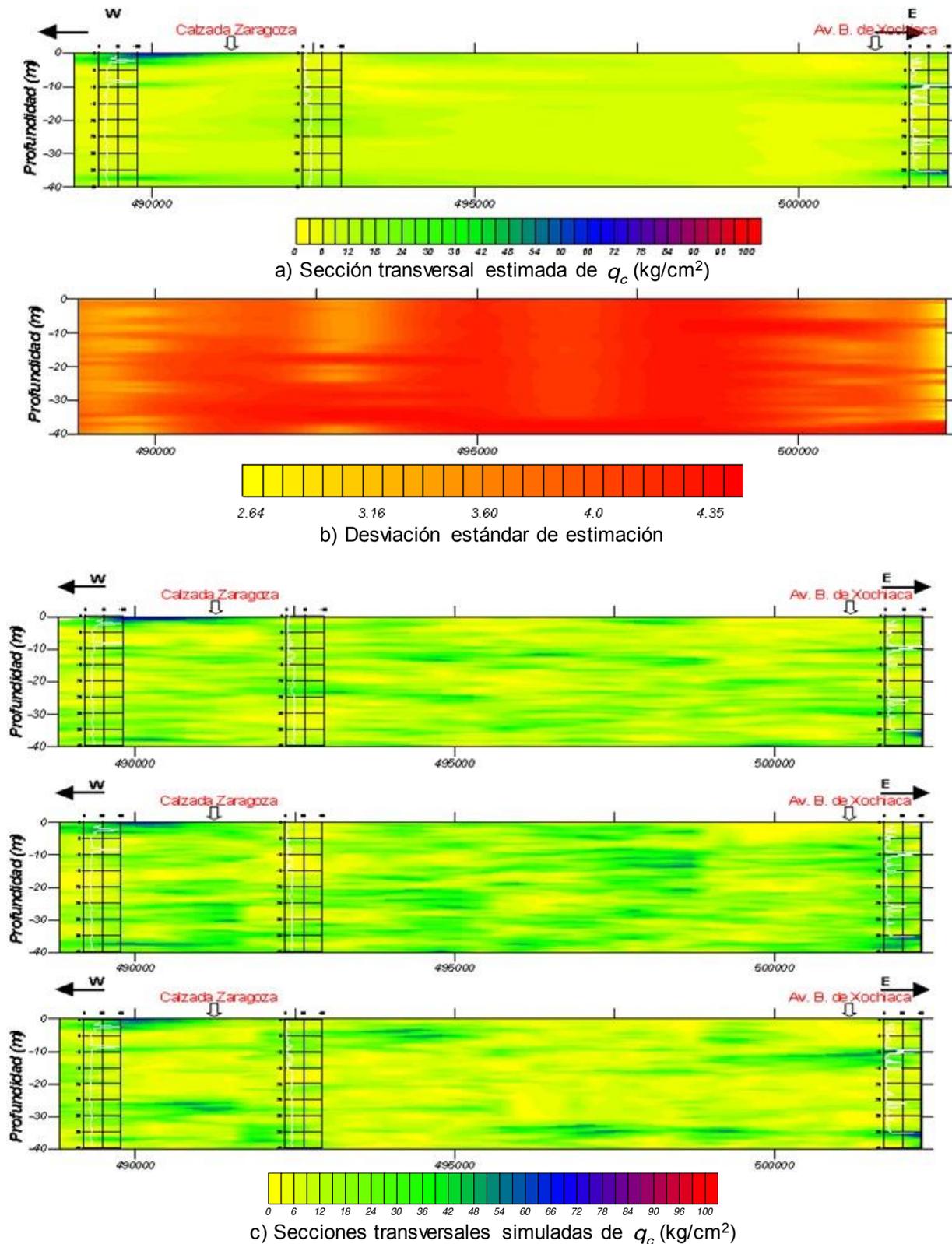


Fig 5.f.17 Distribución espacial de la resistencia de  $q_c$  sobre el eje 1, zona oriente.

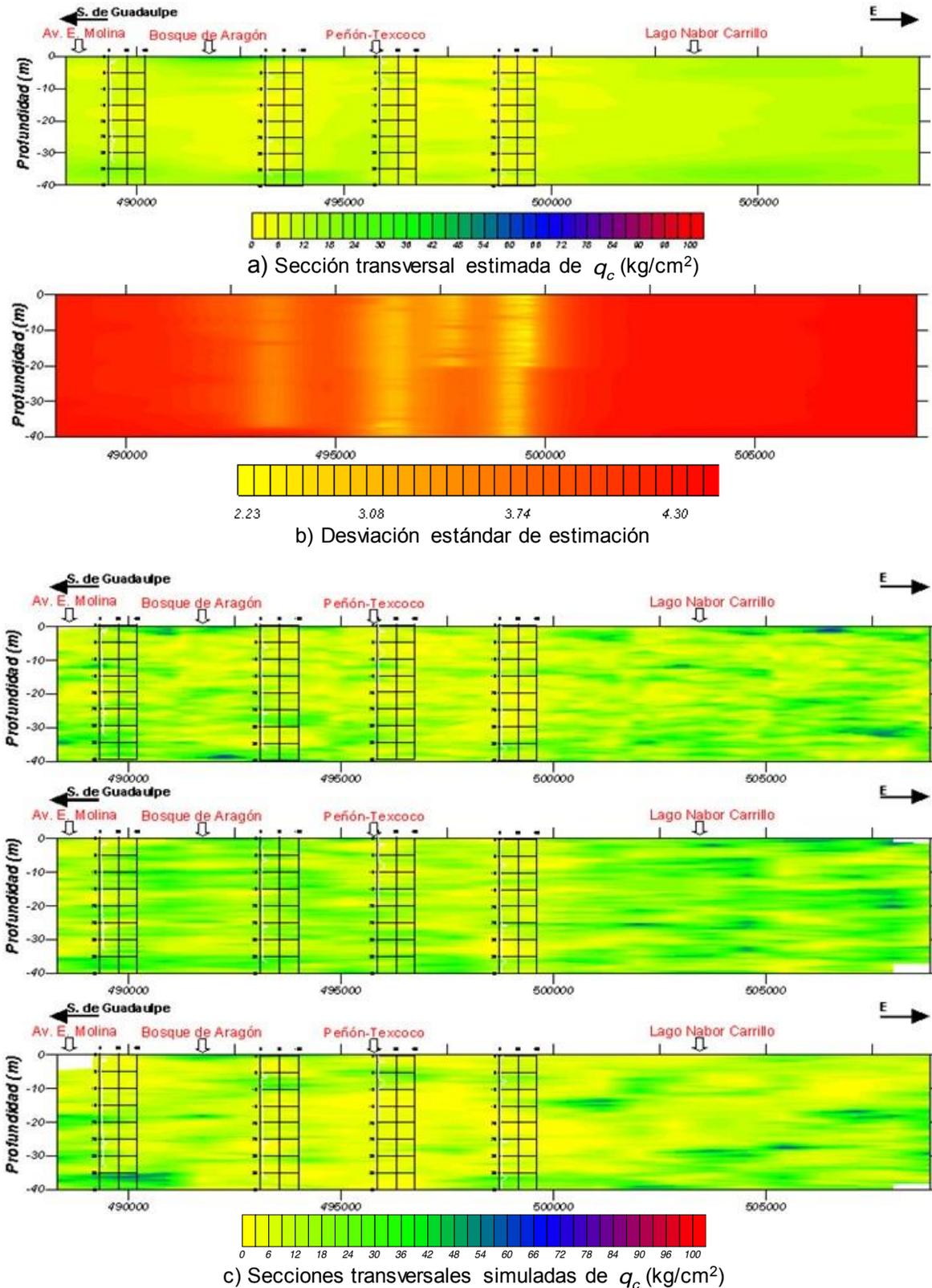


Fig 5.f.18 Distribución espacial de la resistencia de  $q_c$  sobre el eje 2, zona oriente.

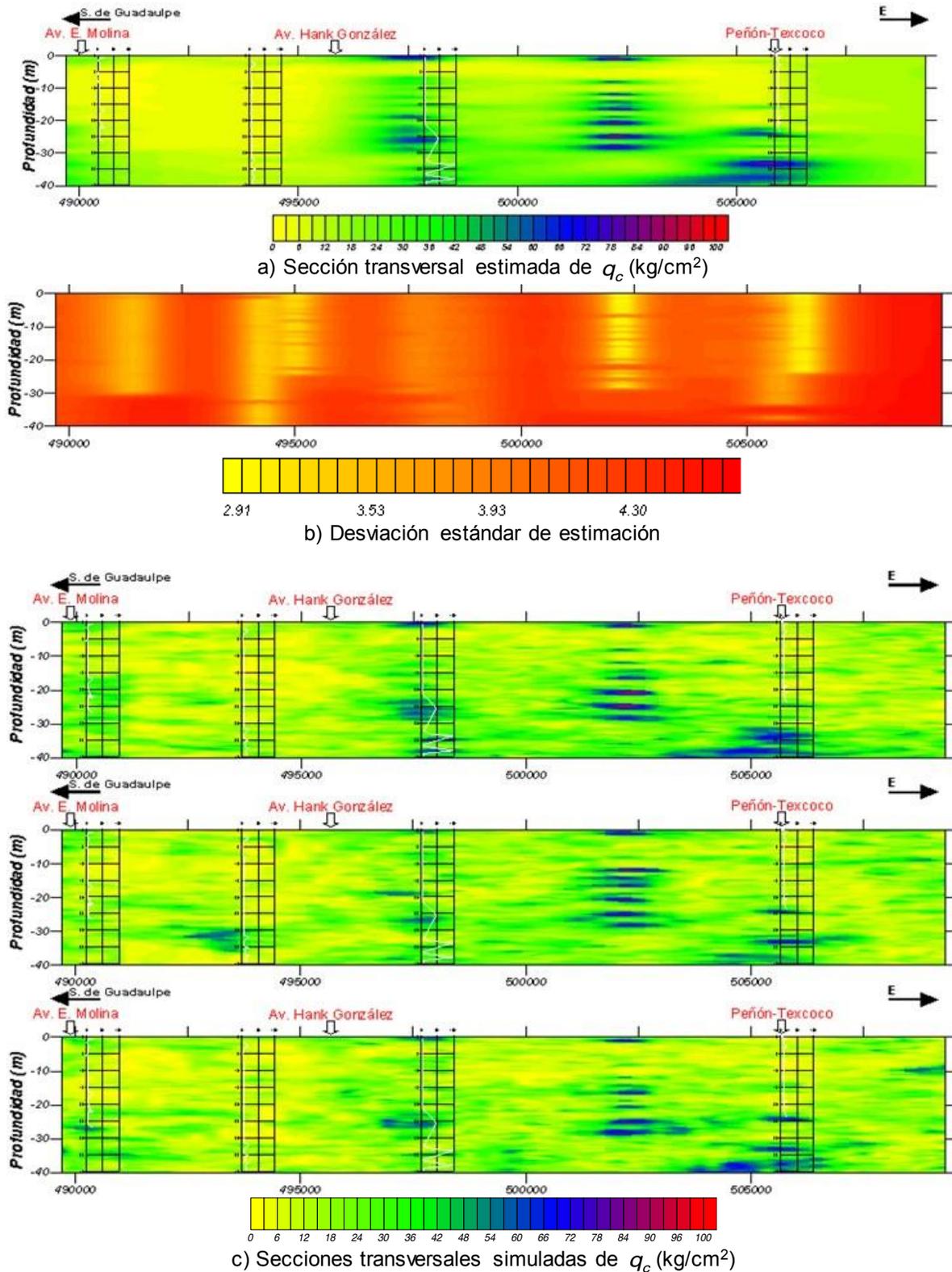


Fig 5.f.19 Distribución espacial de la resistencia de  $q_c$  sobre el eje 3, zona oriente.

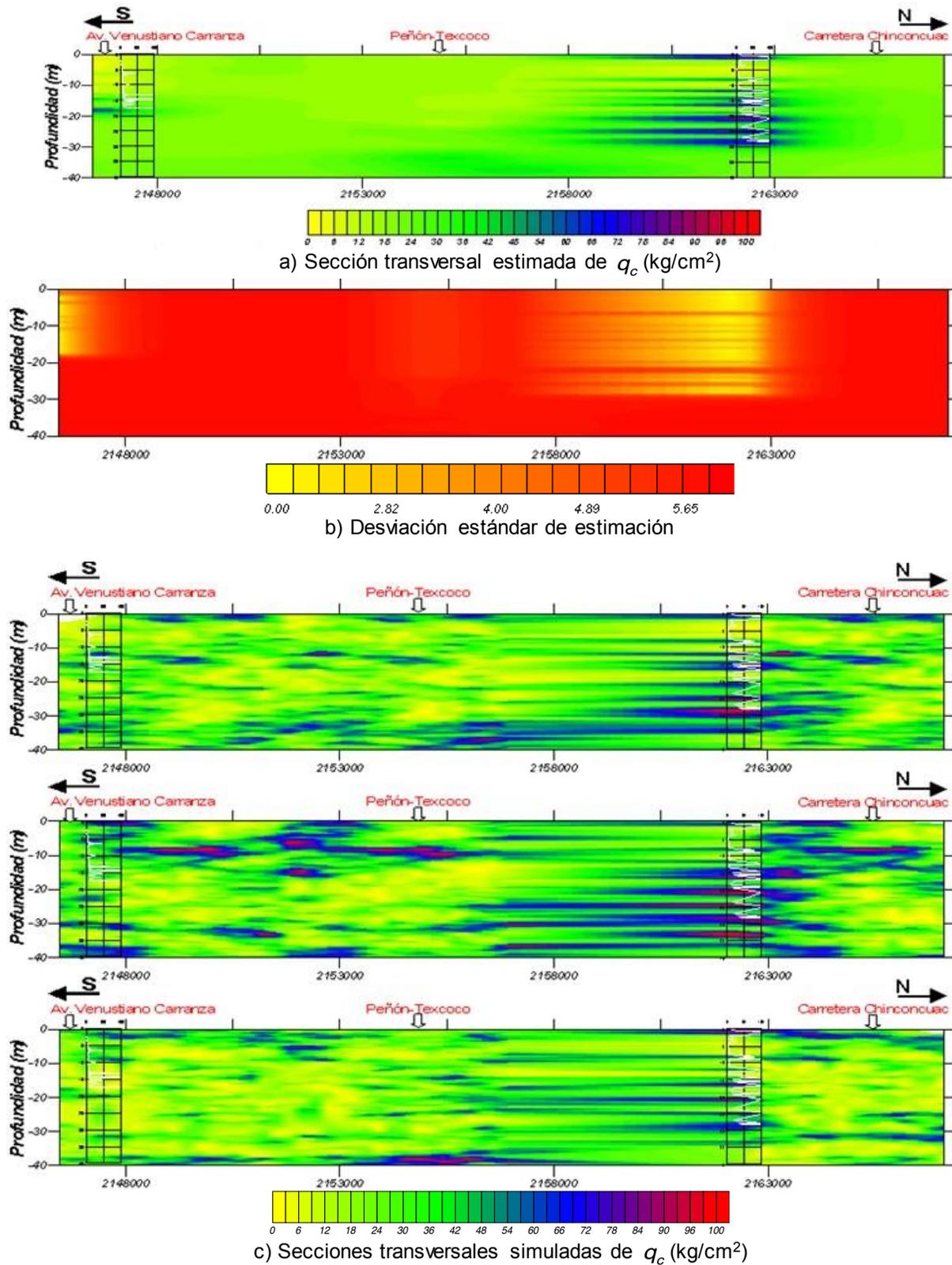


Fig 5.f.20 Distribución espacial de la resistencia de  $q_c$  sobre el eje 4, zona oriente.

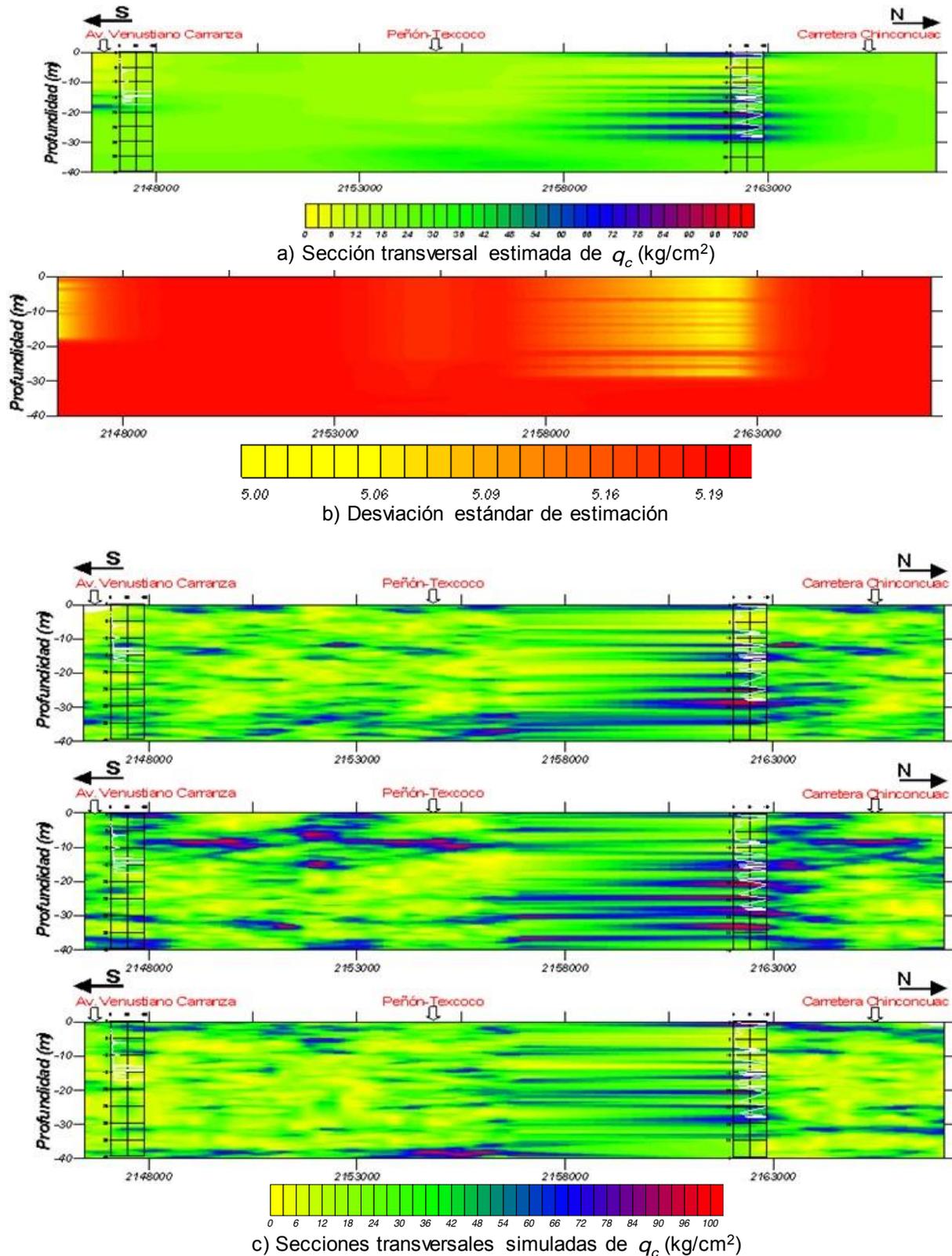


Fig 5.f.21 Distribución espacial de la resistencia de  $q_c$  sobre el eje 5, zona oriente.

Así también, se construyó un modelo 3D con las secciones transversales estimadas (Fig 5.f.22), este modelo permite observar en conjunto la distribución espacial del contenido de agua dentro de la zona de estudio.

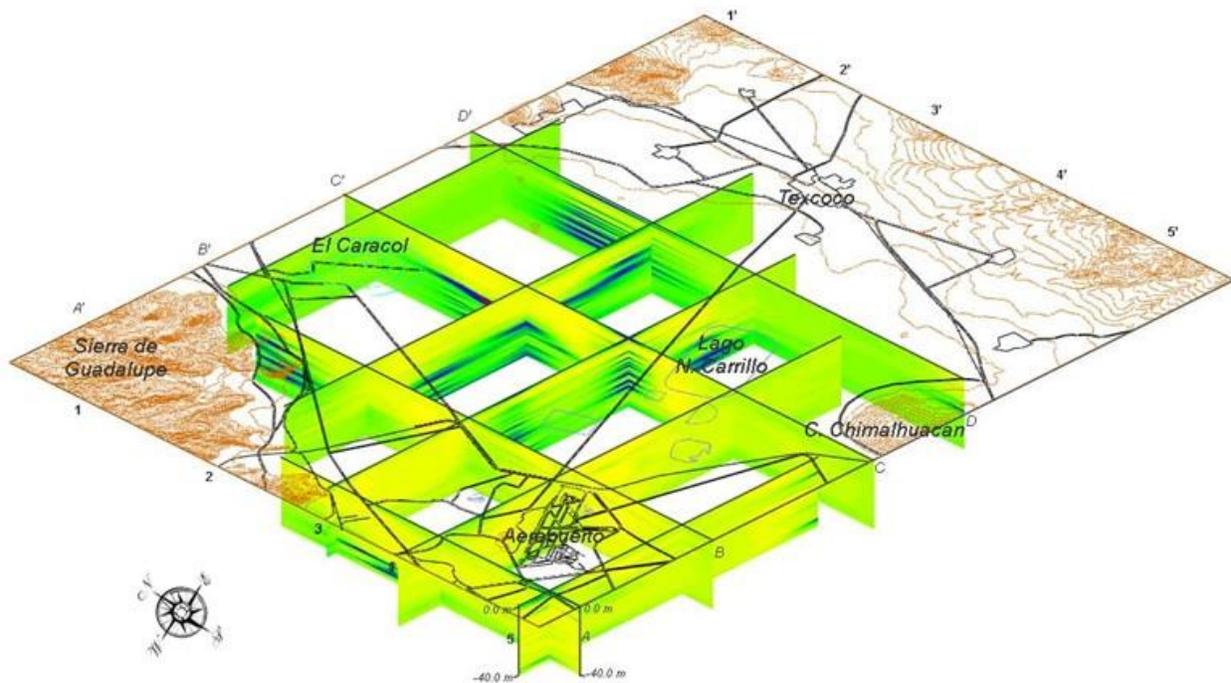


Fig 5.f.22 Modelo 3D de la distribución espacial de  $q_c$ , zona oriente.

De acuerdo con los resultados del análisis de distribución espacial mostrado en las Figs 5.f.13 a 5.f.22, se tiene que:

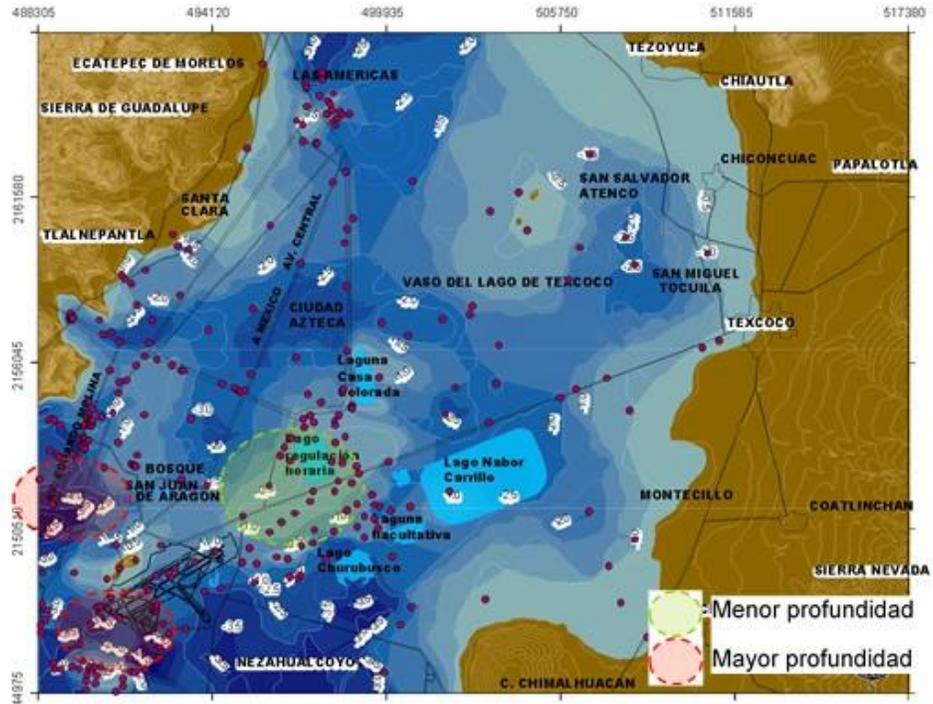
En la zona cercana al Aeropuerto y Aragón, la profundidad de la FAS es mayor, variando de 3.00 a 4.50 m.

La menor profundidad de la FAS se registra en la Zona Federal, presentándose de forma prácticamente superficial.

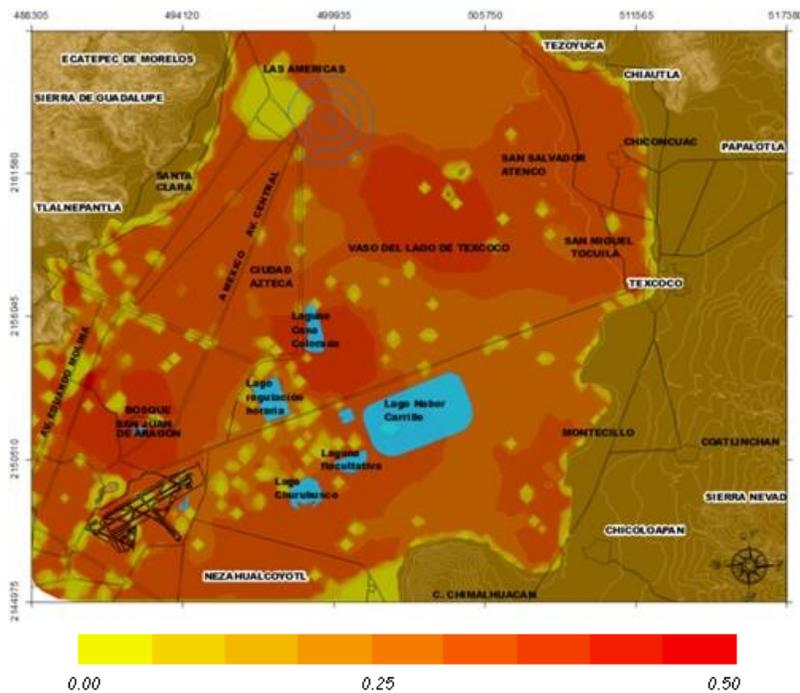
Debe subrayarse que los sondeos se realizan frecuentemente en terraplenes, rellenos o calzadas donde existen rellenos superficiales. La profundidad medida de la FAS refleja estas anomalías locales.

### 5.f.1.3 Distribución espacial de la profundidad y espesor de las capas típicas

En esta sección se presenta un conjunto de mapas que ilustran la configuración de las principales formaciones del subsuelo en la zona oriente del Valle de México.



a) Contornos de la estimación



b) Contornos de la desviación estándar de estimación

Fig 5.f.23 Mapa de contornos de la profundidad estimada de la frontera superior FAS, zona oriente.

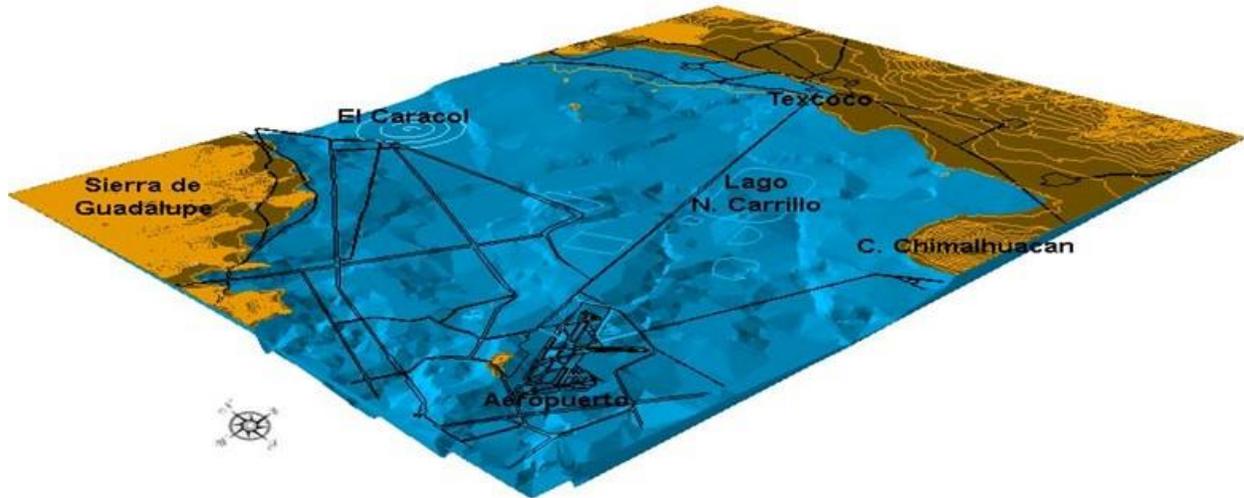
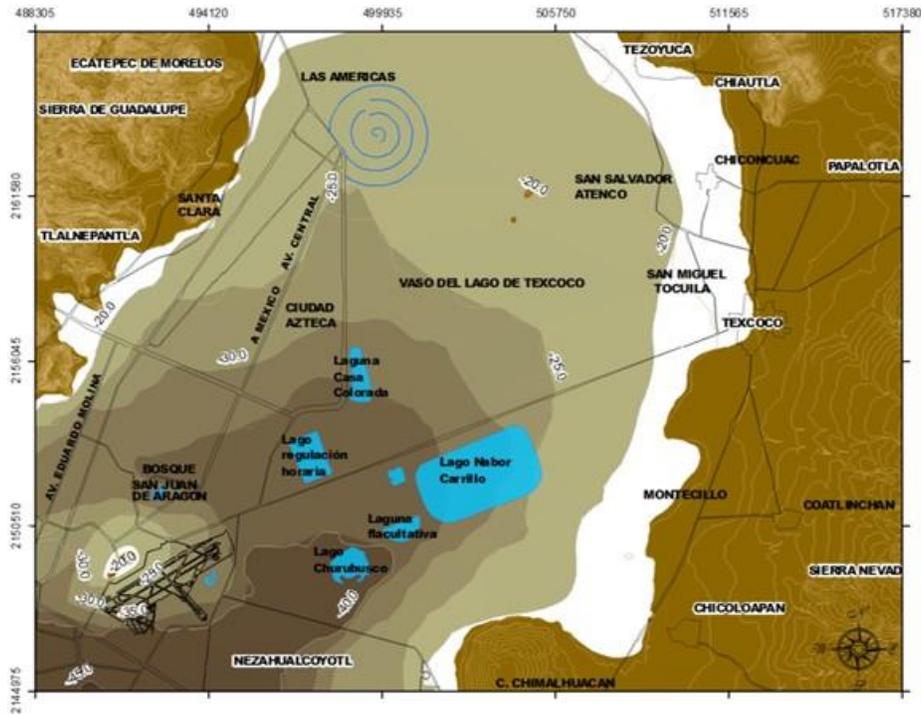


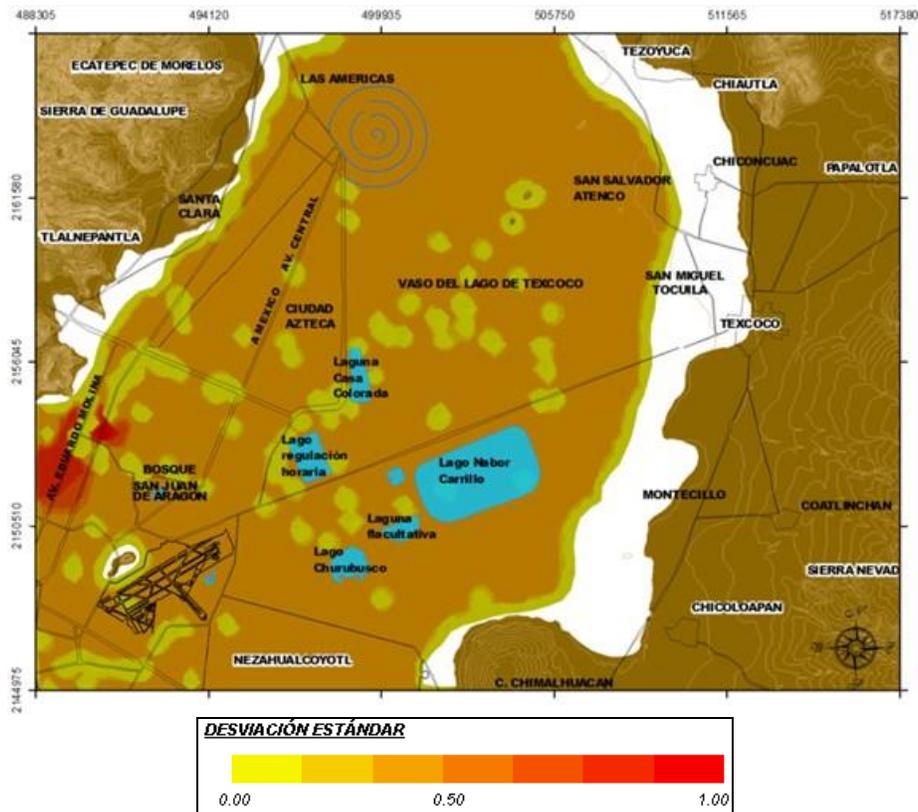
Fig 5.f.24 Superficie de la profundidad estimada de la frontera superior de la FAS, zona oriente.

De acuerdo con los resultados del análisis de distribución espacial mostrados en las Figs. 5.f.23 y 5.f.24 se tiene que:

En el área circundante al *Peñón de los baños* y se registra la menor profundidad de la capa dura. La mayor profundidad a que se encuentra esta formación se localiza al surponiente de la zona de estudio, en los terrenos aledaños al aeropuerto de la *Ciudad de México*.



a) Contornos de la estimación



b) Contornos de la desviación estándar de estimación

Fig 5.f.25 Mapa de contornos de la profundidad estimada de la CD, zona oriente.

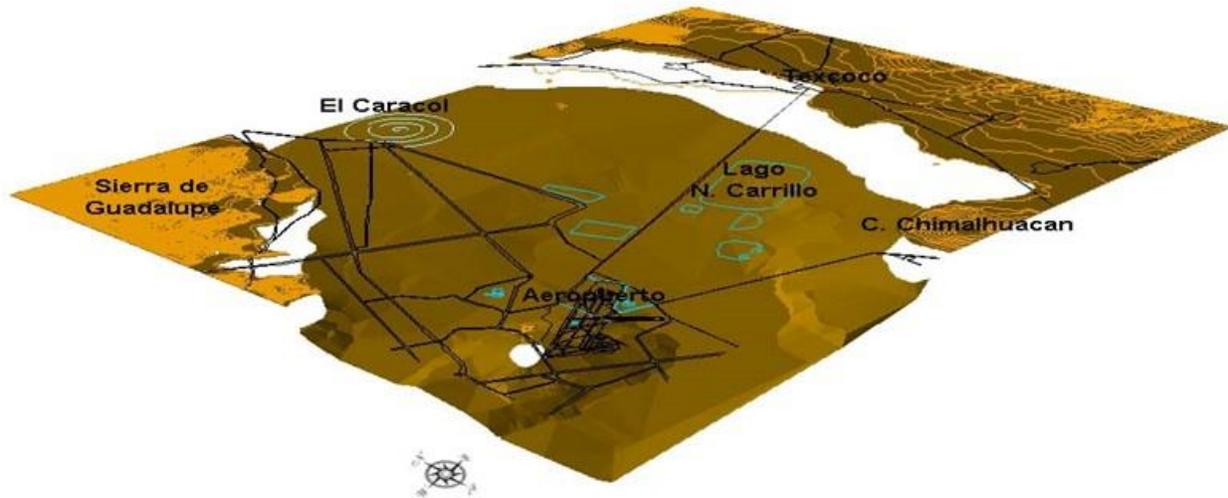
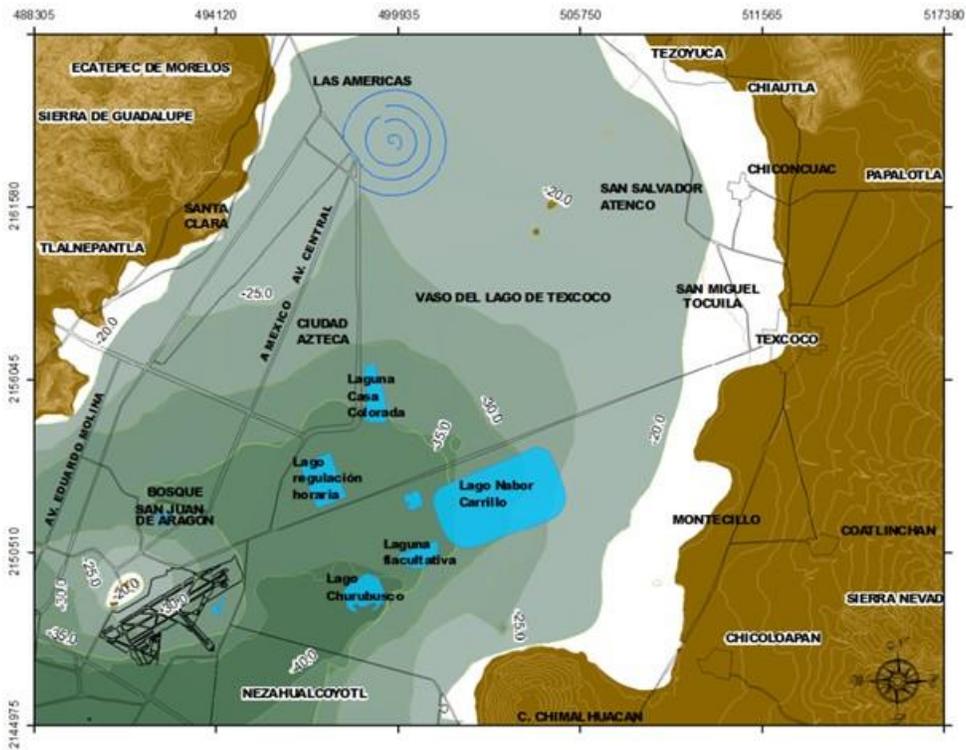


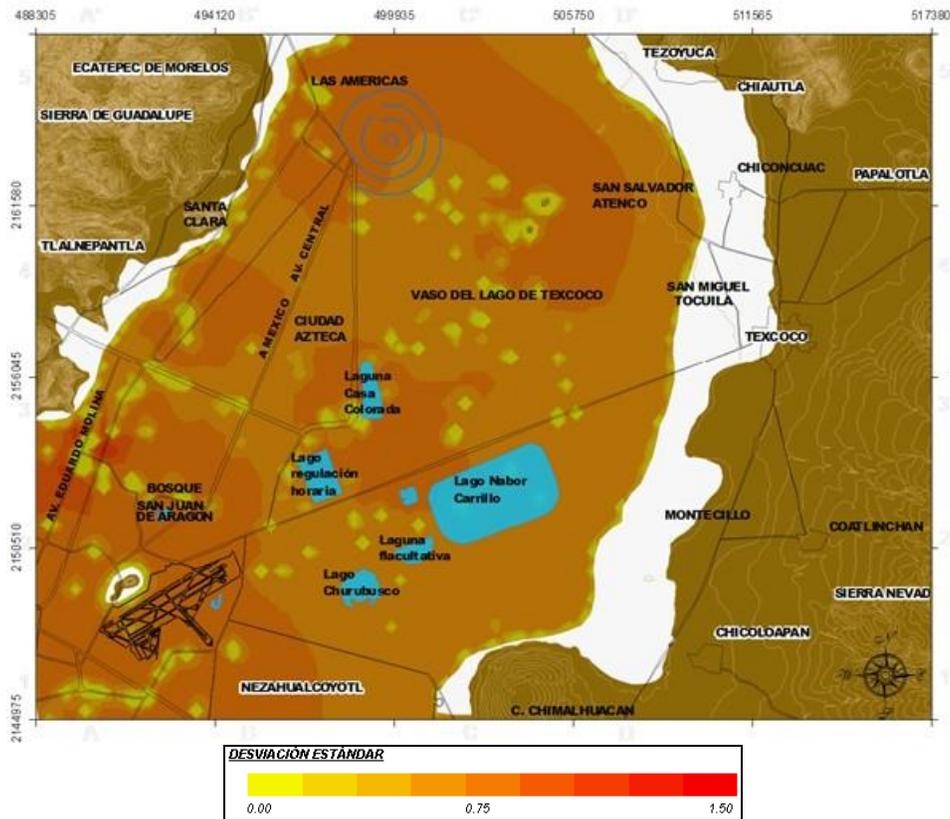
Fig 5.f.26 Superficie de la profundidad estimada de la CD, zona oriente.

De acuerdo con los resultados del análisis de distribución espacial se tiene que:

En la zona circundante al *Peñón de los baños* y la FAI se encuentra a menor profundidad. Las mayores profundidades se localizan al S-W de la zona estudiada, en los terrenos aledaños al aeropuerto de la Ciudad de México.



a) Contornos de la estimación



b) Contornos de la desviación estándar de estimación

Fig 5.f.27 Mapa de contornos de la profundidad estimada de la FAI, zona oriente.

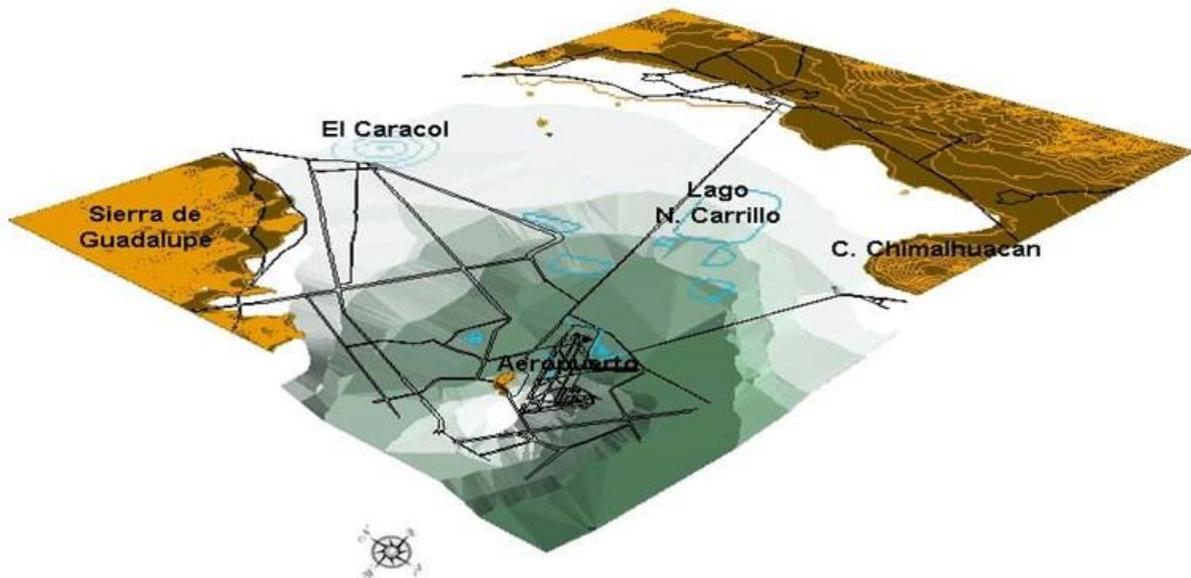


Fig 5.f.28 Superficie de la profundidad estimada de la FAI, zona oriente.



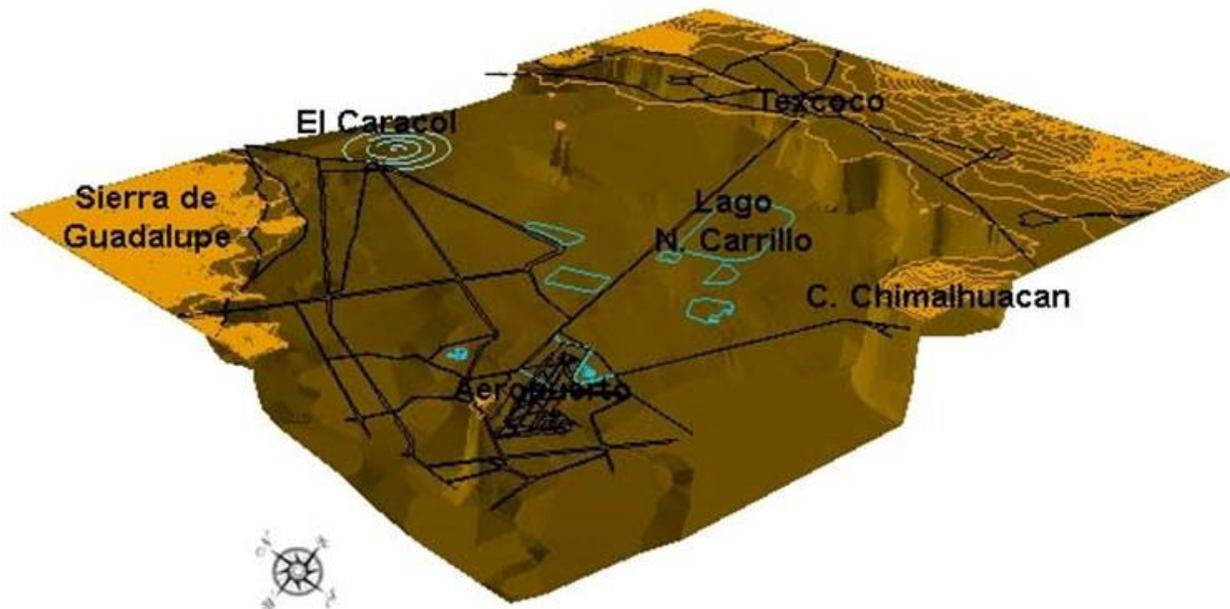


Fig 5.f.30 Superficie de la profundidad estimada de los DP, zona oriente.

De acuerdo con los resultados del análisis de distribución espacial de la profundidad de los DP (Figs 5.f.29 y 5.f.30), se tiene que:

La curva de 0m de profundidad corresponde al límite de la zona de lomas.

La menor profundidad de los DP se encuentra en la zona circundante al *Peñón de los baños*.

La mayor profundidad de esta formación se localiza en dirección S-W, en el área ubicada entre el aeropuerto, *Ciudad Netzahualcóyotl* y el lago Nabor Carrillo (*ex Lago de Texcoco*).

#### *Distribución espacial del espesor de la CS*

Considerando que la profundidad de la frontera superior de los estratos típicos se estimaron puntualmente empleando la misma malla de puntos, espaciados a cada 250m en ambas direcciones *X* e *Y*, entonces por diferencia de profundidad se obtuvieron los espesores de cada una de las formaciones.

En la Fig 5.f.31 se presenta el mapa de contornos de isopacas de la CS, que coincide con la profundidad de la frontera superior de la FAS. Se observa que el mayor espesor se encuentran al sur-poniente de la zona estudiada variando de 3.0 y 4.5 m, mientras que en la zona federal del *ex Lago de Texcoco* el espesor varía entre 0.5 y 1.5 m. Debe

señalarse nuevamente que los sondeos se realizan frecuentemente en terraplenes, rellenos o calzadas donde existen rellenos superficiales, por lo que localmente el espesor de la costra superficial puede ser sobrestimado.

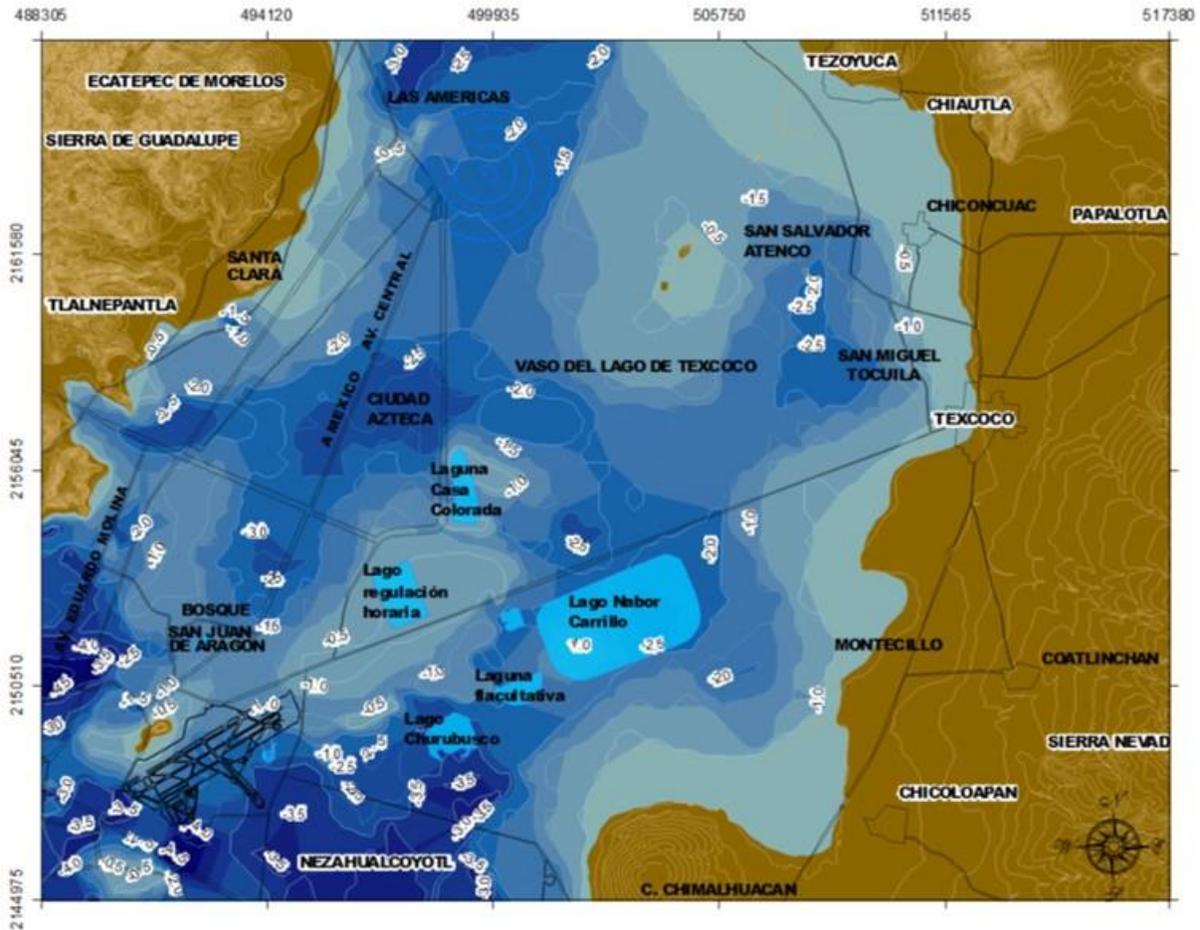


Fig 5.f.31 Mapa de contornos de isopacas de la CS, zona oriente.

### *Distribución espacial del espesor de la FAS*

En la Fig 5.f.32 se presentan el mapa de contornos de isopacas correspondientes a la Formación Arcillosa superior. En esta figura se observa que el mayor espesor de esta formación se localiza en ex Lago de Texcoco y la zona de Netzahualcóyotl.

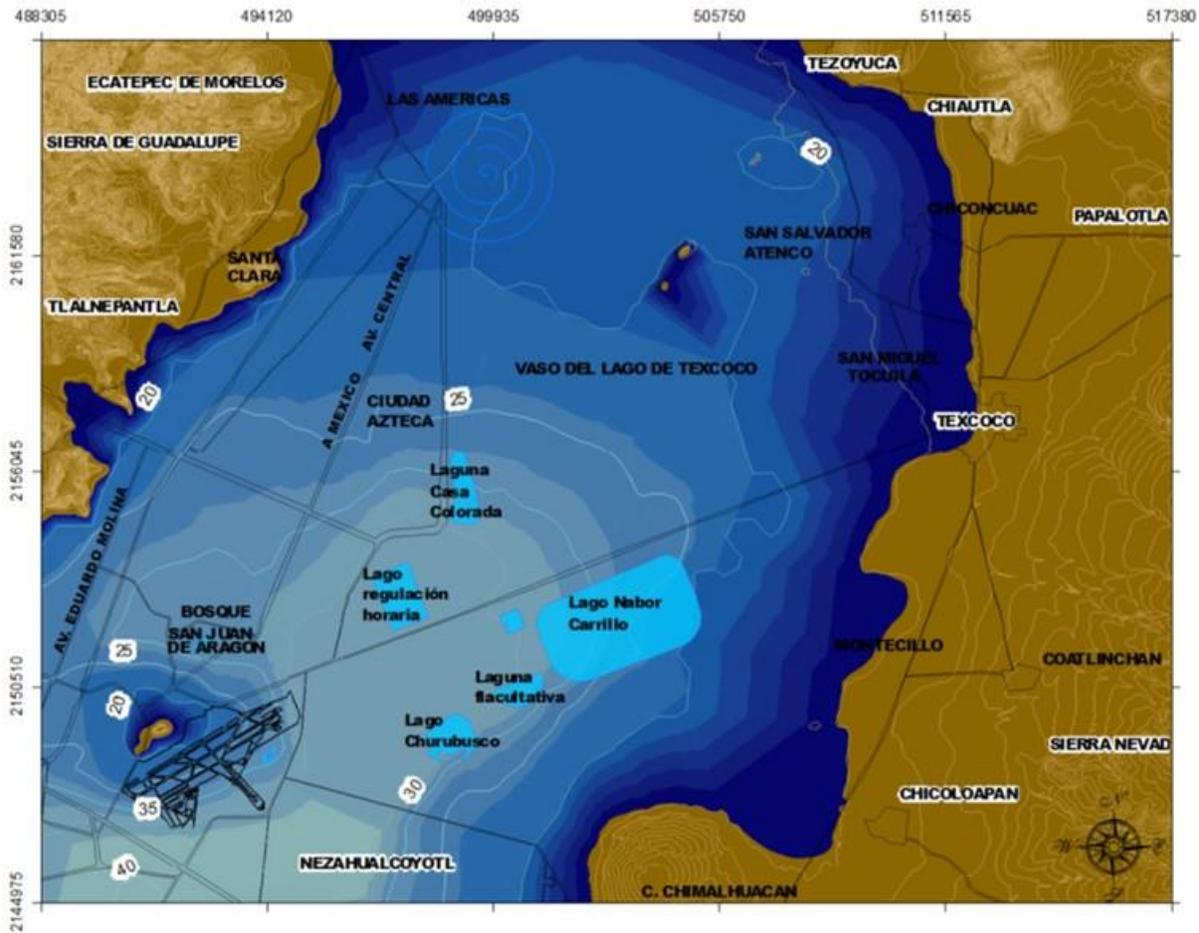


Fig 5.f.32 Mapa de contornos de isopacas de la FAS, zona oriente.

### *Distribución espacial del espesor de la CD*

La CD presenta una cementación muy errática y de espesor variable. Se asume que esta formación es muy delgada en la zona central del *lago Texcoco* debido a que no llegó a secarse. La importancia de identificar la profundidad a la cual se localiza la primera capa dura radica en que en que algunas cimentaciones como los pilotes de punta se apoyan en esta formación.

En la Fig 5.f.33 se presentan las curvas isopacas de la CD, donde se observa que el menor espesor menor (1 a 2.5m) se ubica en la zona federal del exlago donde se localizan los lagos y lagunas de Texcoco, el mayor espesor se encuentra en *Netzahualcóyotl*.

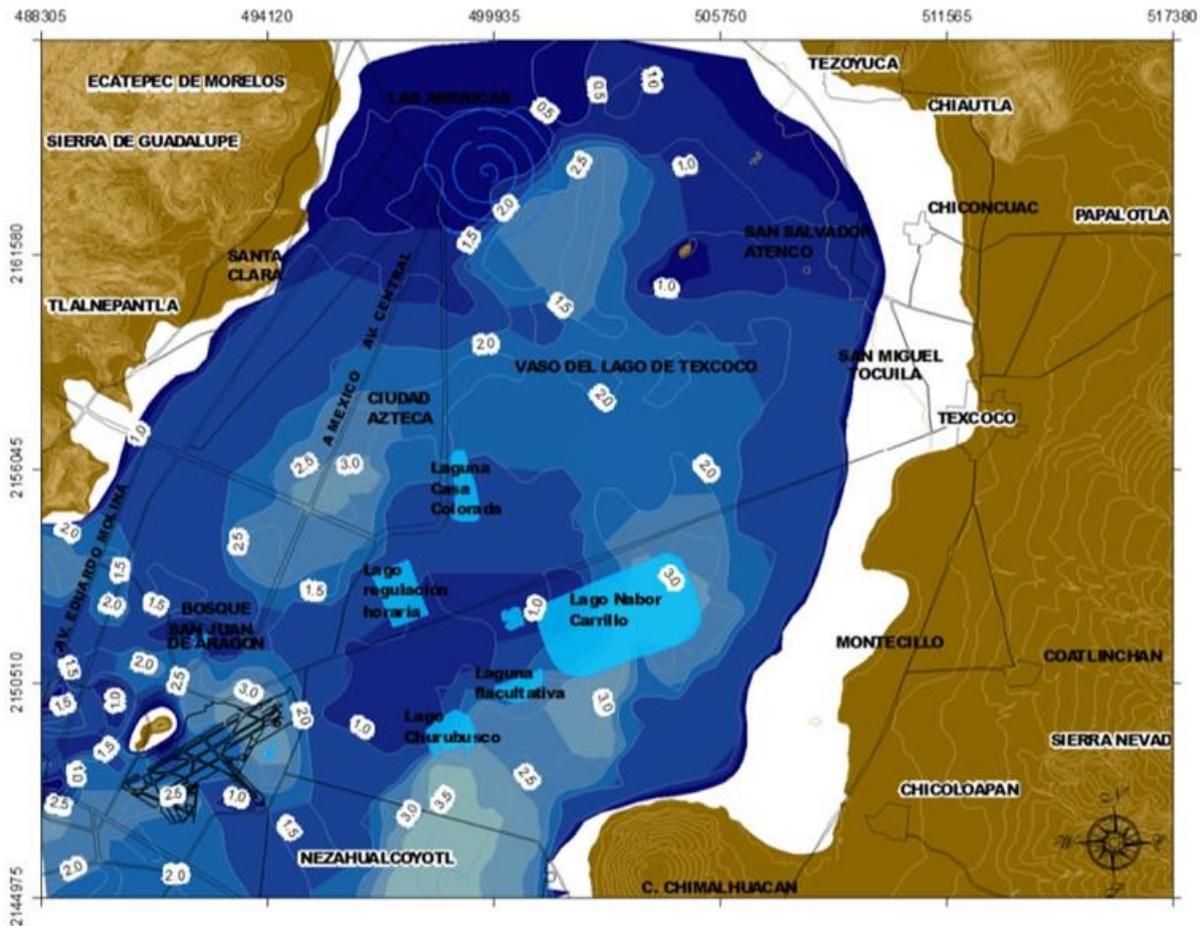


Fig 5.f.33. Mapa de contornos de isopacas de la CD, zona oriente.

### *Distribución espacial del espesor de la FAI*

La FAI es una secuencia de estratos de arcilla intercalados por lentes duros, con un arreglo similar a la de la serie arcillosa superior.

En la 5.f.34 se presentan las isopacas de la FAI. Se aprecia que los mayores espesores se localizan cerca del aeropuerto y van disminuyendo al acercarse a la zona de serranía.

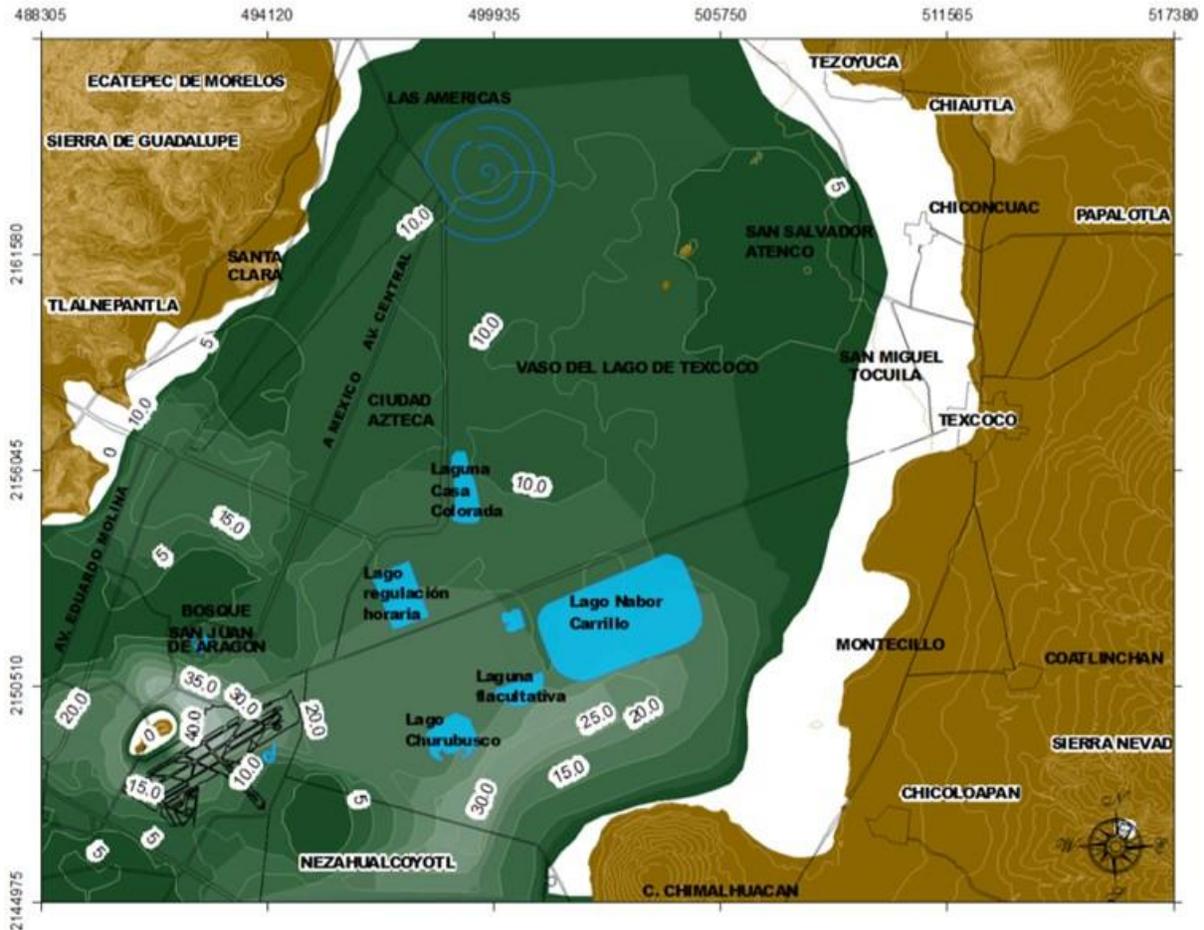


Fig 5.f.34 Mapa de contornos de isopacas de la FAI, zona oriente.

### *Modelo digital 3D de las formaciones del subsuelo*

En la Fig 5.f.35 se presenta un modelo 3D de los estratos típicos estimados en la zona de estudio, en la que se observa:

- La CD, es un estrato de reducido espesor.
- La profundidad de los DP decrece de la sierra (*Sierra de Guadalupe y Sierra Nevada*) al centro del ex *Lago de Texcoco*.
- En la zona federal, los DP se localizan entre los 30 y 45m de profundidad.

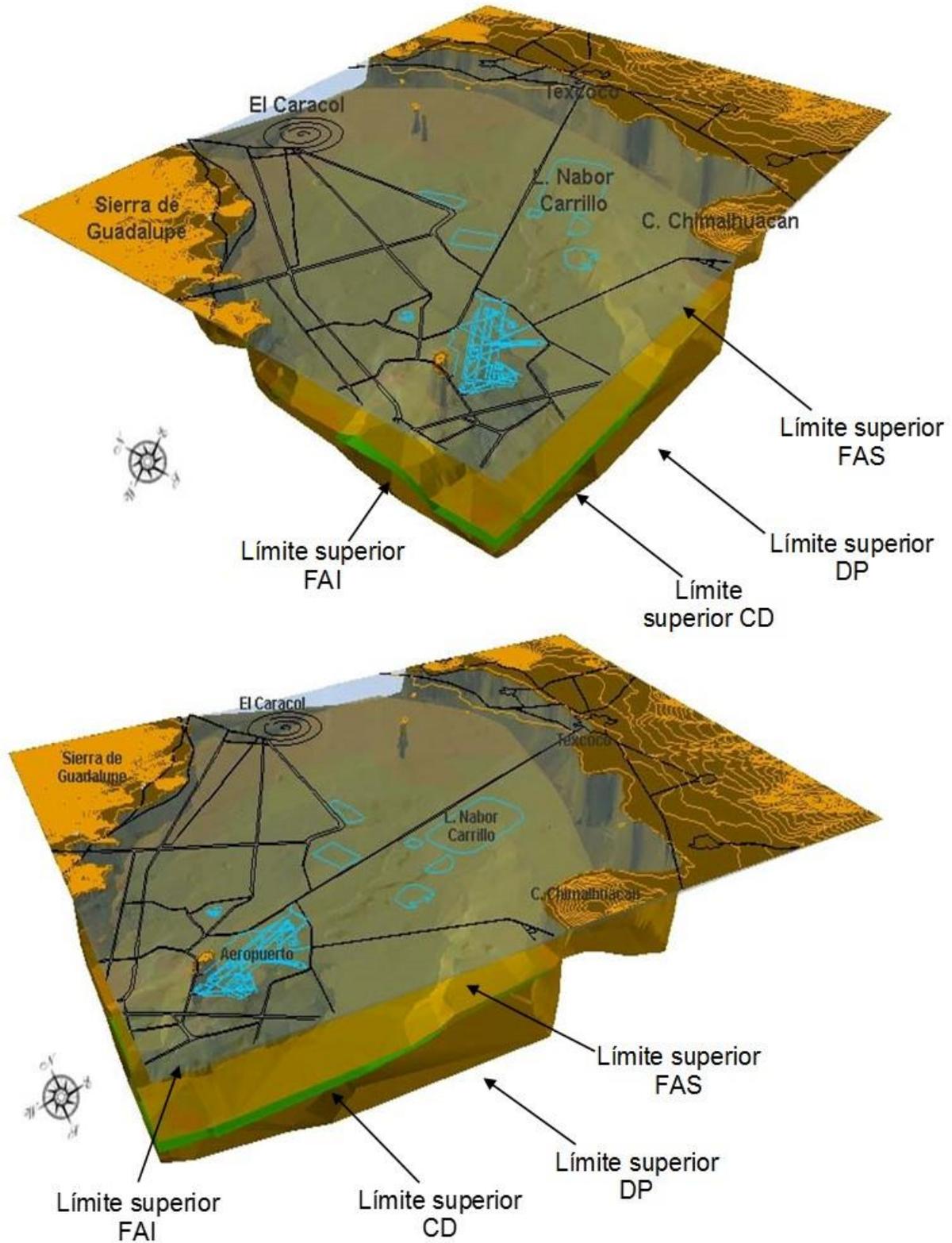


Fig 5.f.35 Modelo 3D de la estratigrafía, zona oriente.



### *Zonificación geotécnica propuesta*

La propuesta de zonificación geotécnica para la zona del *ex Lago de Texcoco* se realizó con base en los siguientes criterios:

Los análisis de la distribución espacial de las propiedades y de los estratos típicos.

Los criterios de la Zonificación Geotécnica Vigente del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (GDF, 2004a)

Mapa de zonificación geotécnica propuesto para la zona Norte del *Valle de México* (Laboratorio de Geoinformática, 2007).

En la Fig 5.f.36 se presenta el mapa de dicha zonificación, con la siguiente descripción:

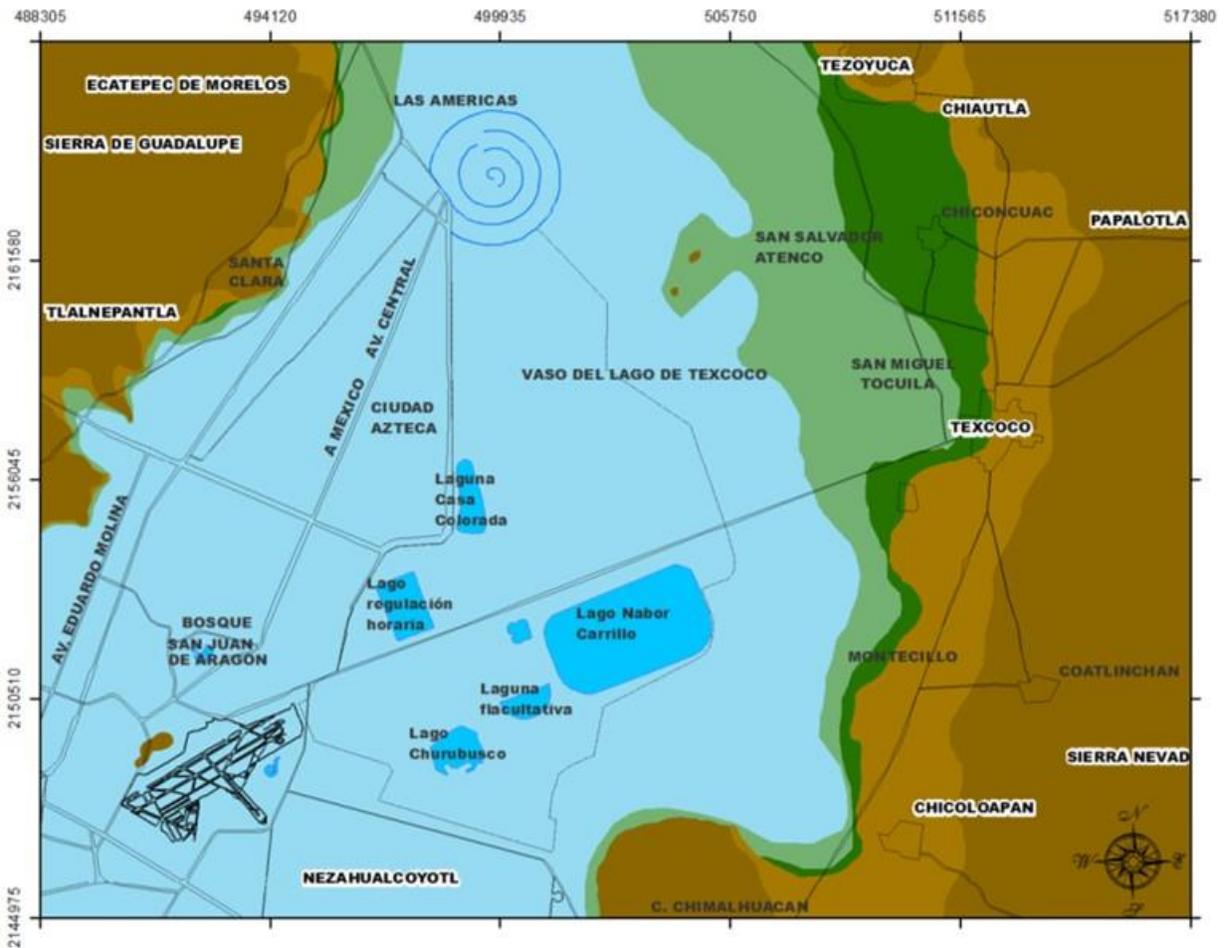
Zona I, Lomas correspondiente a lomas, formadas por rocas o suelos generalmente firmes. En esta zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas, de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena y de rellenos no controlados.

- Zona Ia, lomeríos: formada por roca o suelos firmes depositados fuera del ambiente lacustre que corresponden a las serranías de la zona.
- Zona Ib, aluvial: formada por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla altamente resistentes que se encuentran en las planicies elevadas de la zona, donde regularmente no llegaba el nivel de antiguos lagos.

Zona II, transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre.

- Zona IIa transición alta, formada por estratos de arcillas lacustre con espesores menores a 2.50 m.
- Zona IIb transición baja, formada por arcillas lacustre con espesores mayores a 2.50 m.

Zona III, Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son generalmente medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.



**SIMBOLOGÍA**

Zonificación propuesta	Zona Ia	Zona Ib	Zona IIa	Zona IIb	Zona III
------------------------	---------	---------	----------	----------	----------

Fig 5.f.36 Mapa propuesto de zonificación geotécnica para la zona oriente del valle de México (Laboratorio de Geoinformática, II-UNAM, 2008).

## 5.f.2 Caracterización geotécnica del área de estudio

La caracterización geotécnica y los modelos estratigráficos se basan en la información proporcionada por ASA y que corresponde a la exploración geotécnica realizada por la empresa GEOTEC en 2013. La campaña de exploración consta de sondeos y pruebas de campo de diferente tipo, así como de exploración geofísica, instalación de estaciones piezométricas y bancos de nivel profundo.

Los perfiles geotécnicos de esta campaña de exploración se incorporaron en un Sistema de Información Geográfico para sondeos Geotécnicos **local para el proyecto**, SIG-SG (Laboratorio de Geoinformática, II-UNAM).

La caracterización geotécnica se realizó empleando la misma metodología descrita en el capítulo precedente. En la Fig 5.f.37 se indica el número de sondeos por tipo y en la Fig 5.f.38 su ubicación.

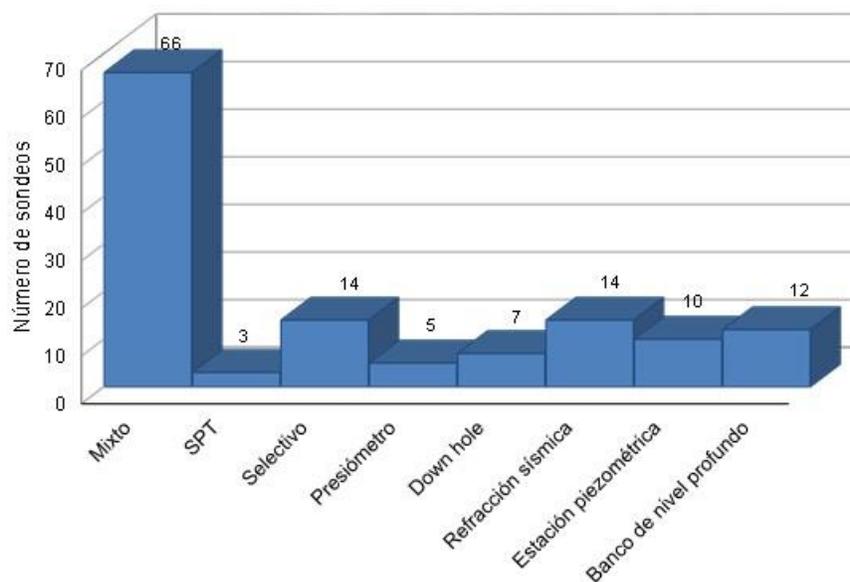


Fig 5.f.37 Número de sondeos por tipo e instrumentación.

En los sondeos de tipo mixto se emplearon dos técnicas de exploración: en la capas de suelo blando (arcilla lacustre) se empleó la prueba de cono eléctrico (CPT) para medir la resistencia de punta a la penetración y; en las capas de suelo rígido (limo arenoso) se empleó la prueba de penetración estándar (SPT) para medir el número de golpes a la penetración y obtener muestras alteradas. Los perfiles de resistencia de punta (qc) fueron revisados detalladamente y los resultados se incluyen en la Nota Técnica No.GE-3.



En los sondeos selectivos se obtuvieron muestras inalteradas con las que se realizaron pruebas de laboratorio y para obtener propiedades índice (contenido de agua, peso volumétrico y límites de consistencia) y mecánicas (resistencia y compresibilidad).

En el contexto de la zonificación geotécnica vigente (GDFb, 2004) y de acuerdo con los resultados de la exploración geotécnica, el predio en estudio se ubica dentro de la zona lacustre.

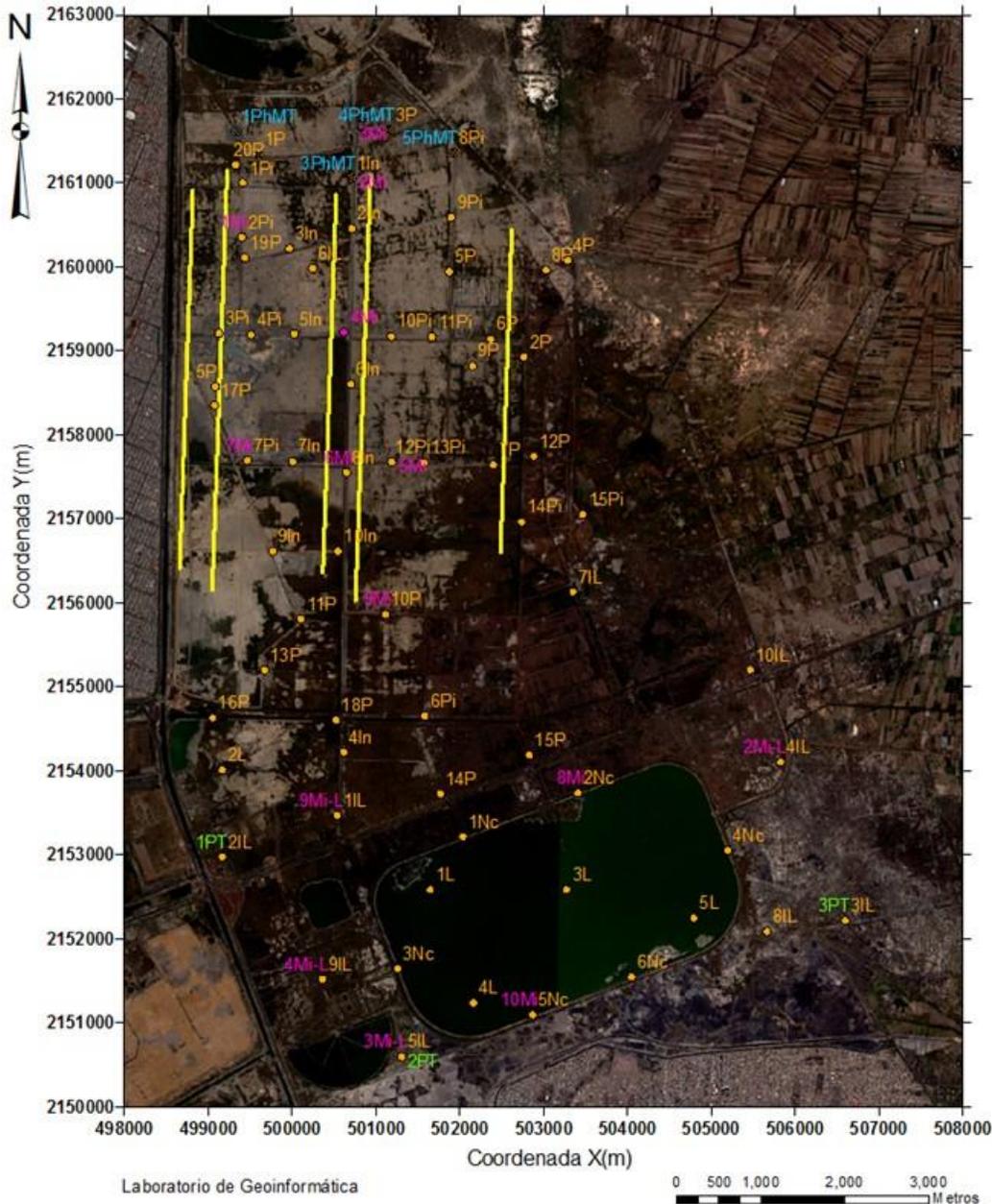


Fig 5.f.38 Ubicación de sondeos (adaptado de GEOTEC, 2013).

Para la caracterización del subsuelo, se realizó un análisis de distribución espacial de la resistencia de punta de cono eléctrico, por ser éste un parámetro que destaca para materiales cohesivos y, que además, se midió prácticamente de manera continua en los sondeos de tipo mixto. Así también, se realizó un análisis de la distribución espacial de la profundidad y espesor de los diferentes estratos típicos del subsuelo dentro del área del proyecto. Estos análisis se realizaron empleando como herramienta principal la metodología geoestadística, en el *Anexo: Conceptos teóricos de la geoestadística* se presenta el fundamento teórico.

### 5.f.3 Análisis de la distribución espacial de la resistencia de punta de cono eléctrico

Para el análisis de la distribución espacial de la resistencia de punta de cono eléctrico,  $q_c$  (kPa), se emplearon 66 sondeos ubicados como se indica en la Fig 5.f.39.

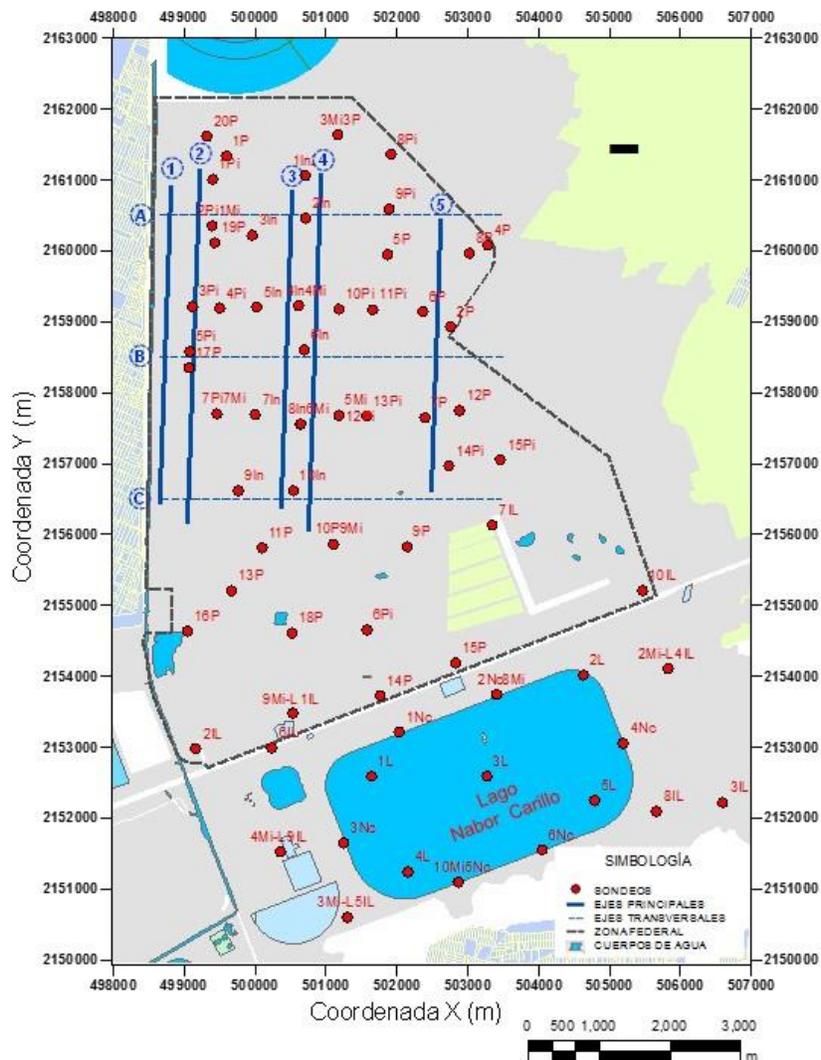


Fig 5.f.39 Ubicación de sondeos empleados para el análisis.



### *Definición del dominio del campo aleatorio*

Los valores de resistencia de punta de cono eléctrico ( $q_c$ ) se considera como un campo aleatorio  $V(X)$ , distribuido dentro de un espacio  $R^p$ , con  $p=3$  (volumen de suelo, 3D). En cada punto del dominio esta variable puede considerarse como aleatoria debido al rango de valores posibles que puede tomar. El conjunto de esos valores medidos dentro del dominio  $R^p$ , constituye una muestra de ese campo aleatorio (Auvinet, 2002). El análisis geoestadístico de  $q_c$  se realizó en la zona de suelo de origen lacustre.

### *Análisis estadístico*

A partir de los datos experimentales y aceptando la hipótesis de *ergodicidad* de los campos aleatorios considerados, se estiman sus principales parámetros estadísticos de  $q_c$  (Tabla 5.f.1).

Tabla 5.f.1 Parámetros estadísticos de  $q_c$  en la zona lacustre.

Parámetro	Valor
No. de datos	8581
Media, $m$ (kPa)	860.23
Varianza, $\sigma^2$ (kPa) <sup>2</sup>	636500.79
Desviación estándar, $S$ (kPa)	797.81

### *Análisis de correlación espacial*

El campo está definido en tres dimensiones, sin embargo, por sencillez el problema se reduce a la generación de dos modelos uno horizontal y otro vertical que representen la correlación espacial del campo.

La tendencia del campo se representa por un hiperplano con ecuación lineal  $V(X) = ax+by+cz+d$ , donde: “ $x, y$ ” son las coordenadas que definen la posición en planta de los sondeos; “ $z$ ” es la elevación a la que se determinaron las mediciones, obtenidas a partir de la elevación del brocal indicada en cada sondeo; “ $a, b, c, d$ ” son los coeficientes de regresión lineal, que en este caso resultan:

$$a = 0.0431 \quad b = -0.1162 \quad c = -44.7854 \quad d = -172598.106$$

Con los anteriores coeficientes de regresión se define la tendencia del campo aleatorio. Esta tendencia es considerada para el cálculo de las funciones que definen la



correlación espacial. En la Fig 5.f.40, se representa la dispersión de los datos de contenido de agua y tendencia con respecto a la elevación, es decir, en una dimensión.

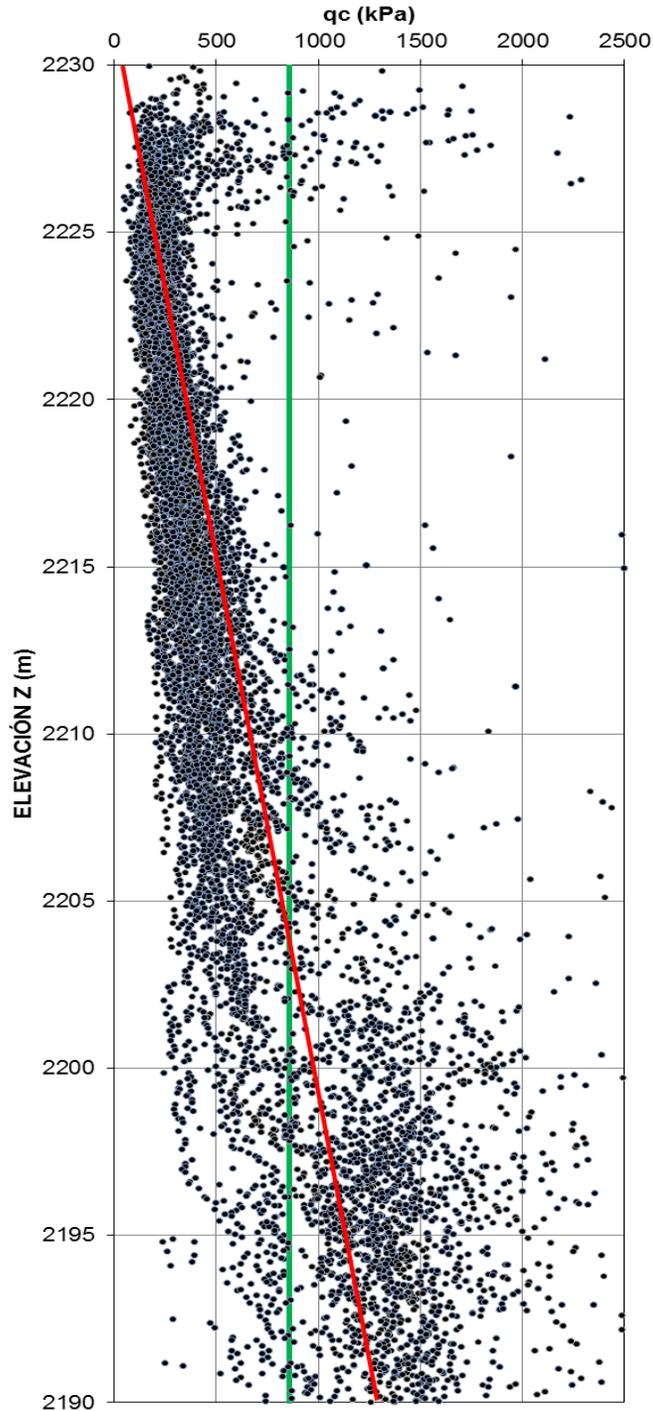
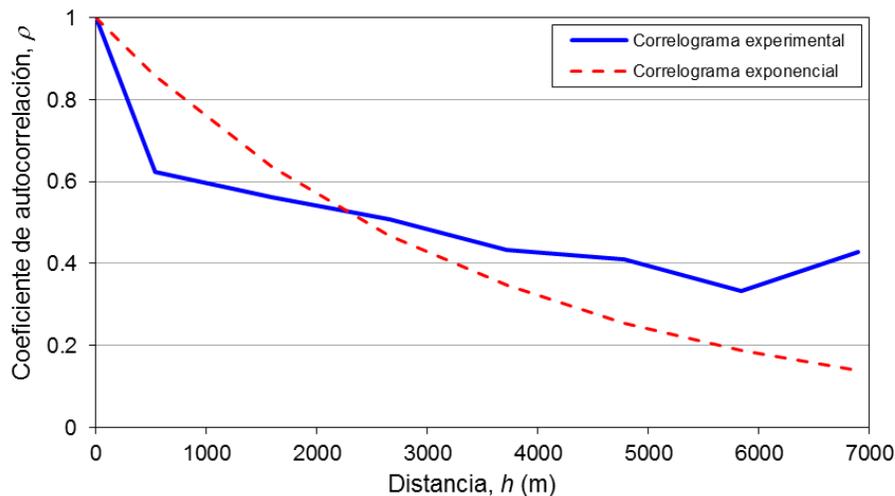


Fig 5.f.40 Dispersión y tendencia de los datos de  $q_c$  con respecto a la elevación.

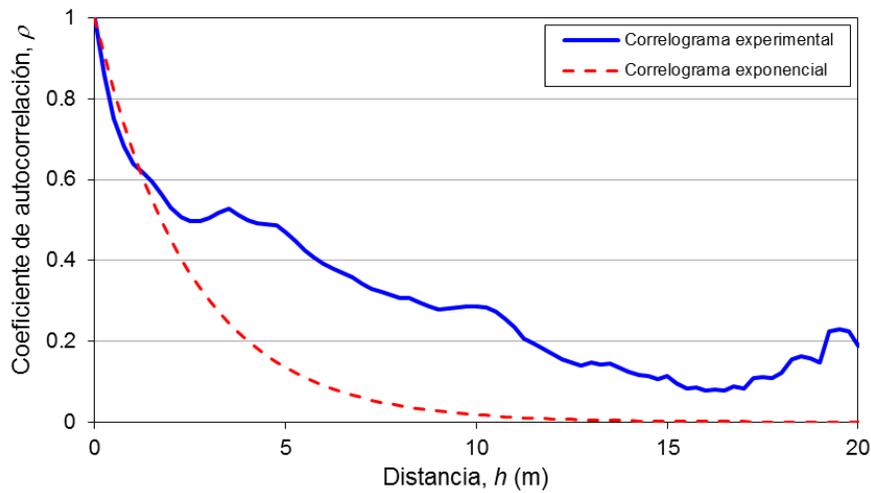
En la Fig 5.f.40 se observa que existe una tendencia lineal significativa del campo con  $n$  respecto a la elevación, por lo que, el campo es considerado como no estacionario y se transforma a un campo residual, con base en la tendencia previamente definida.

### Modelos de correlación

Para obtener la dependencia espacial se calcularon los correlogramas experimentales considerando el campo residual (Fig 5.f.41), estas funciones describen la estructura de correlación. A partir de los correlogramas se obtuvieron las distancias de correlación, resultando:  $\delta_{hor} = 7000$  m y  $\delta_{ver} = 5$  m. Con estos valores y adoptando una función de tipo exponencial simple,  $\rho_v = e^{(-2h_{ver}/\delta_{ver})}$  (Van Marcke, 1984) se determinan los modelos de correlación horizontal y vertical mostrados en la Fig 5.f.41.



b) Correlograma horizontal



a) Correlograma vertical

Fig 5.f.41 Modelos de correlación espacial de  $q_c$ .

### Predicción

Con las distancias de correlación espacial  $\delta_{ver}$  y  $\delta_{hor}$ , los modelos teóricos y los datos experimentales de los 66 perfiles de datos, se estimaron perfiles de  $q_c$  (kPa), a cada 250 m a lo largo de los ejes preferenciales “1, 2, 3, 4, 5”, definidos en la Fig 5.f.39, sobrepuestos con los ejes de las pistas. Así también, se estimaron perfiles con la misma separación de 250 m a lo largo de los ejes “A, B, C”, transversales a las pistas. En todos los casos, la propiedad se estimó puntualmente a lo largo de la profundidad con un paso de cálculo de 0.25 m.

### Visualización

Para una fácil interpretación, a partir de los resultados numéricos y recurriendo a técnicas de graficación especializada, se integran los perfiles estimados de  $q_c$  para construir una sección transversal estimada (virtual) para cada uno de los ejes definidos. El conjunto de estas secciones se muestran en las Figs 5.f.42 a 5.f.49. Estos modelos permiten visualizar la distribución espacial del parámetro analizado. De igual forma, a partir de los valores de la desviación estándar de estimación se construye una sección transversal que representa la incertidumbre asociada a la estimación mostradas en las mismas Figs 5.f.42 a 5.f.49.

Así también, en las Figs 5.f.50 y f.5.51 se presentan unos modelos en 3D que representan la distribución espacial de  $q_c$  dentro del predio del proyecto.

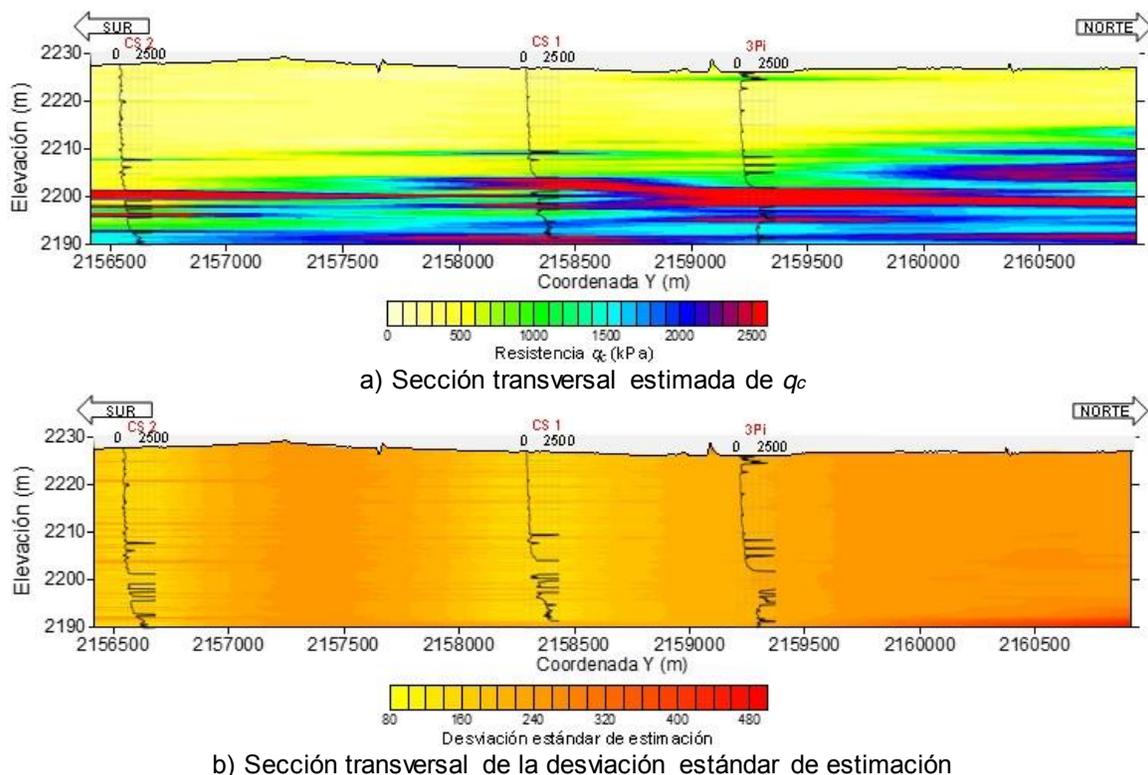
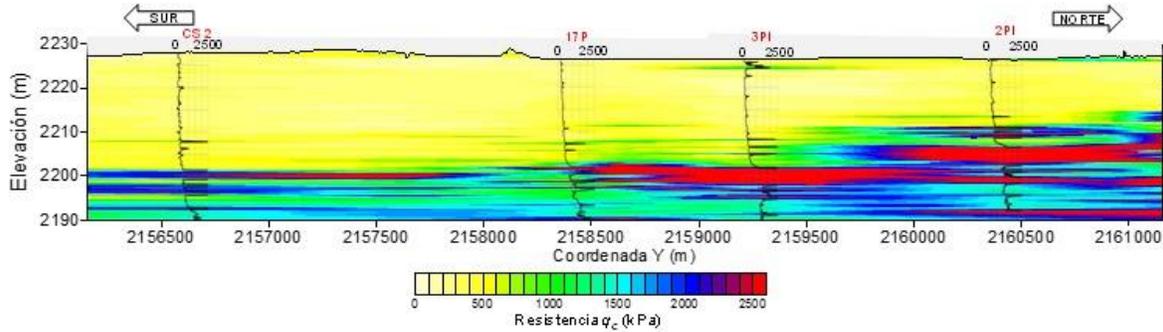
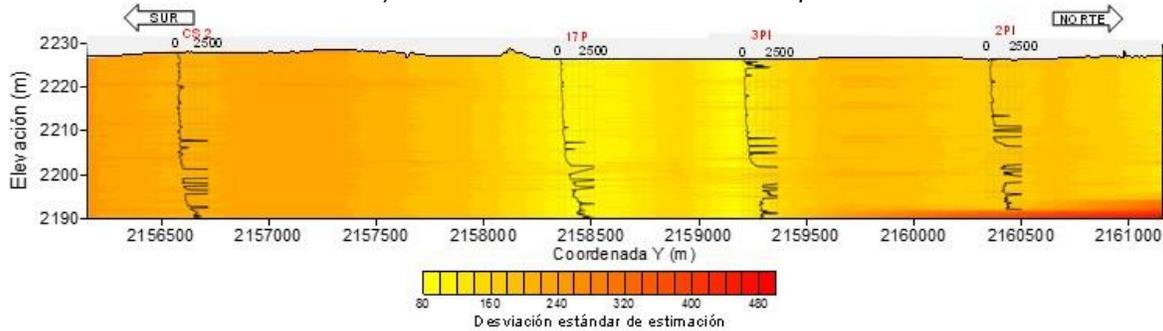


Fig 5.f.42 Distribución espacial estimada de  $q_c$  para el eje 1 (Pista 1).

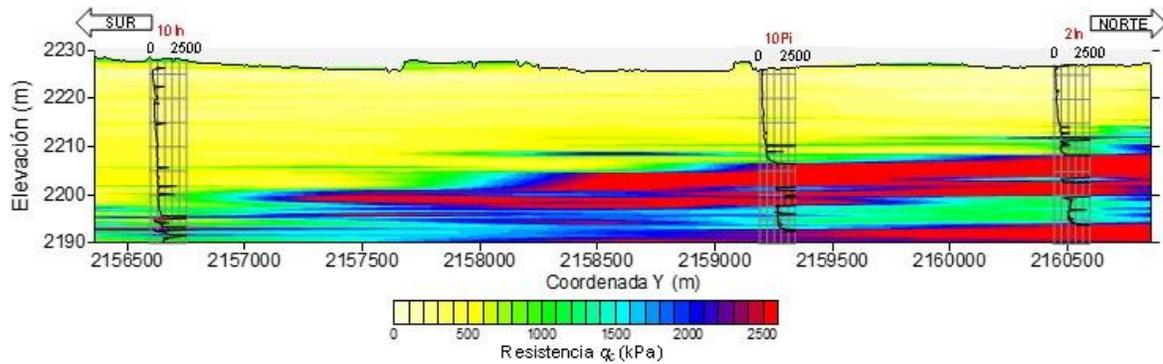


a) Sección transversal estimada de  $q_c$

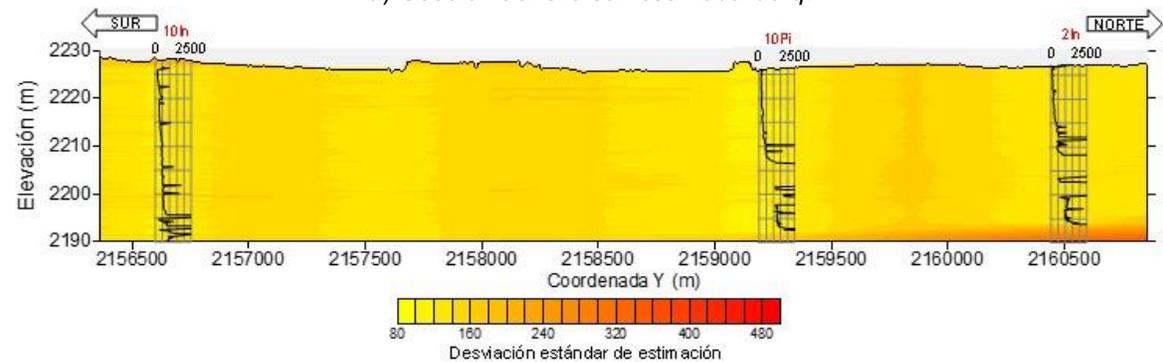


b) Sección transversal de la desviación estándar de estimación

Fig 5.f.43 Distribución espacial estimada de  $q_c$  para el eje 2 (Pista 2)

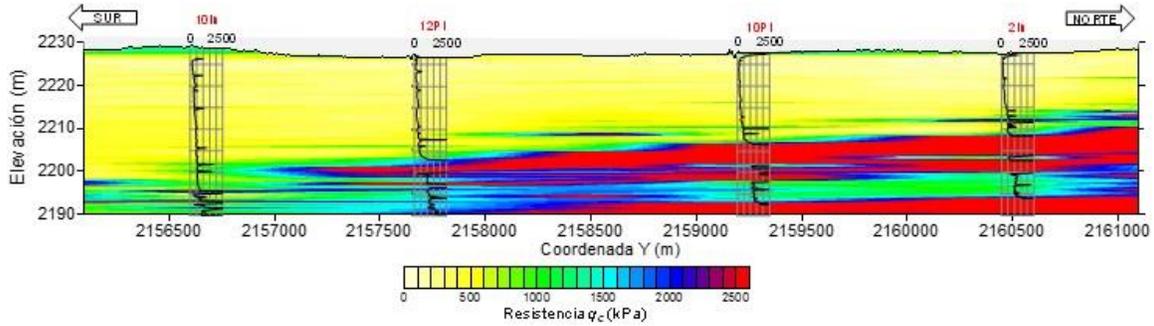


a) Sección transversal estimada de  $q_c$

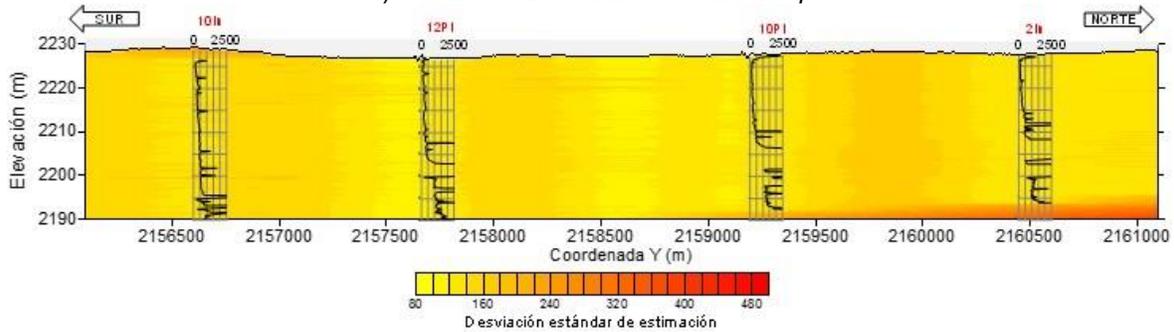


b) Sección transversal de la desviación estándar de estimación

Fig 5.f.44 Distribución espacial estimada de  $q_c$  para el eje 3 (Pista 3).

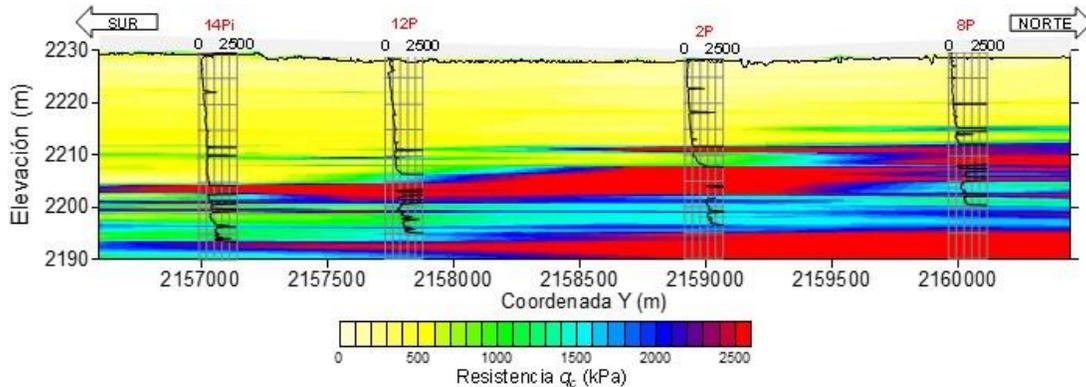


a) Sección transversal estimada de  $q_c$

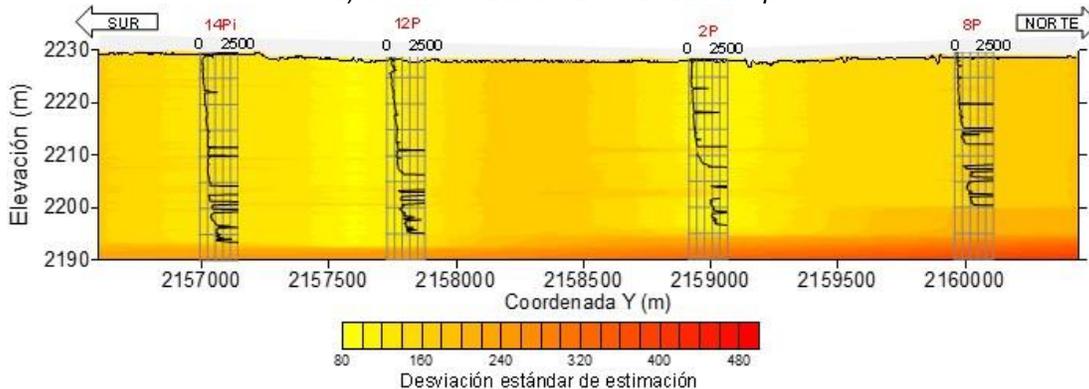


b) Sección transversal de la desviación estándar de estimación

Fig 5.f.45 Distribución espacial estimada de  $q_c$  para el eje 4 (Pista 4).

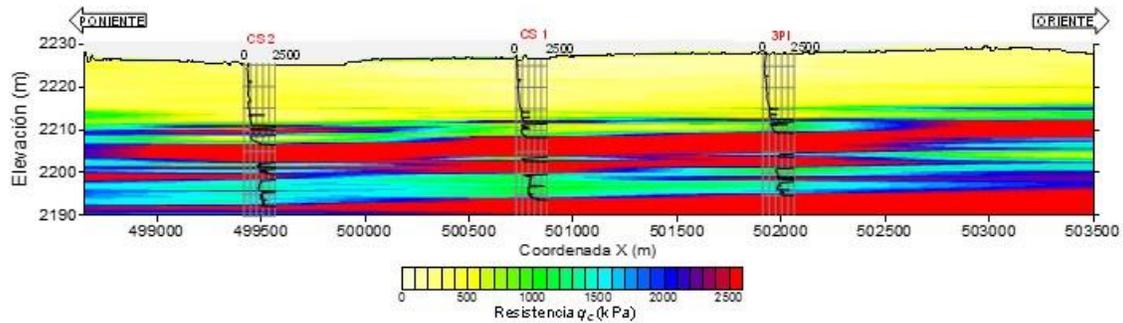


a) Sección transversal estimada de  $q_c$

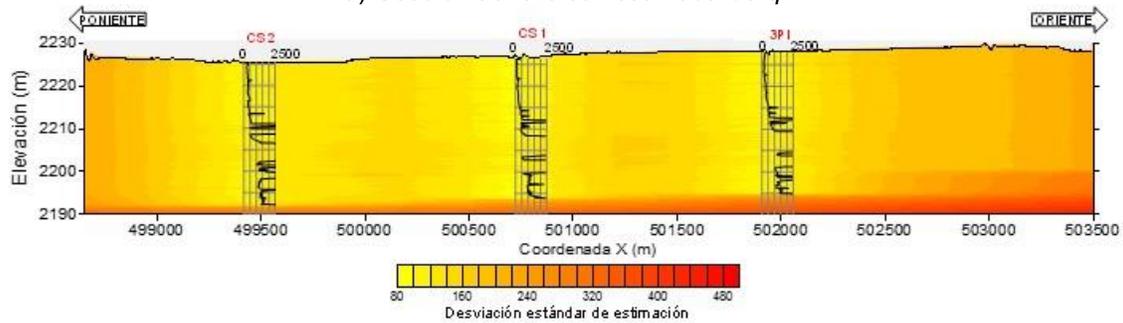


b) Sección transversal de la desviación estándar de estimación

Fig 5.f.46 Distribución espacial estimada de  $q_c$  para el eje 5 (Pista 5).

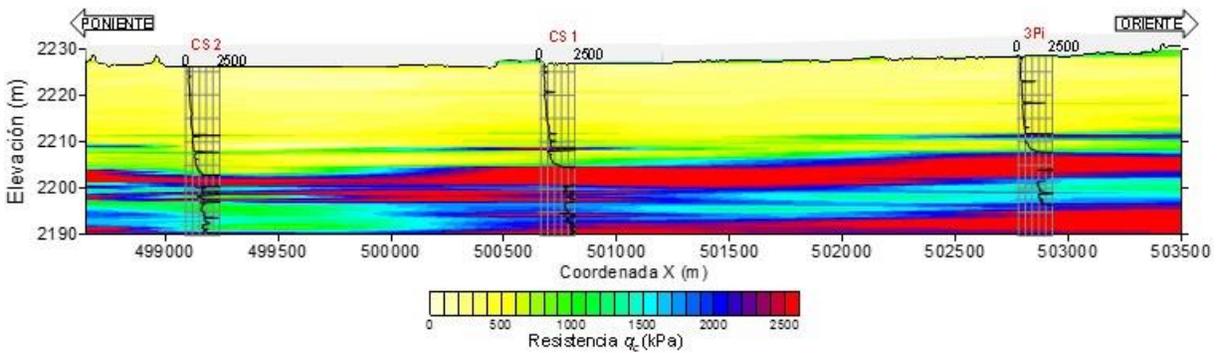


a) Sección transversal estimada de  $q_c$

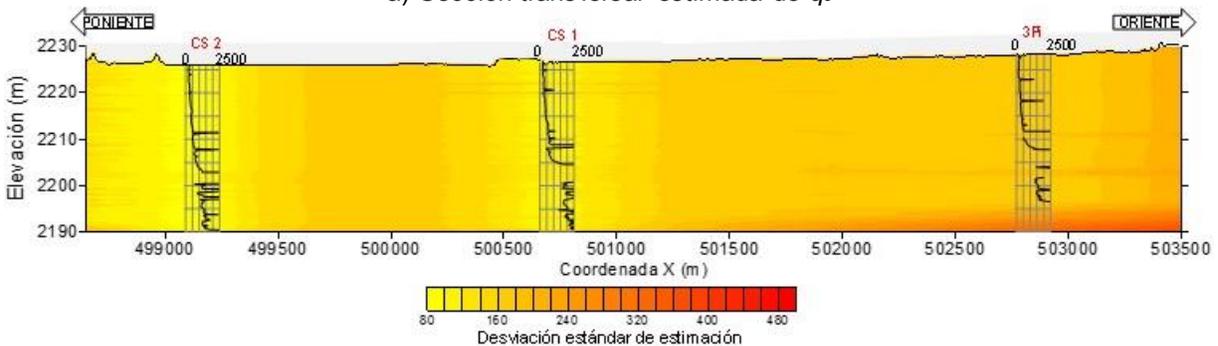


b) Sección transversal de la desviación estándar de estimación

Fig 5.f.47 Distribución espacial estimada de  $q_c$  para el eje A.

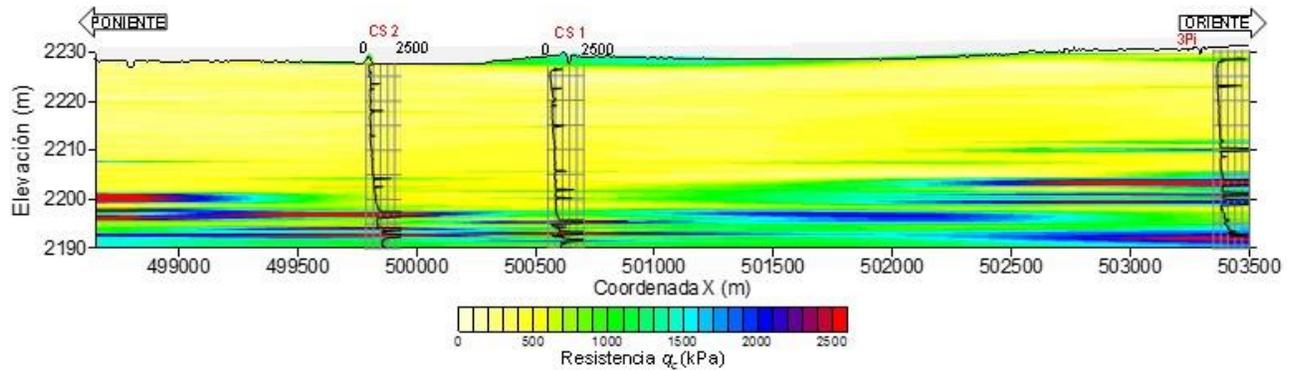


a) Sección transversal estimada de  $q_c$

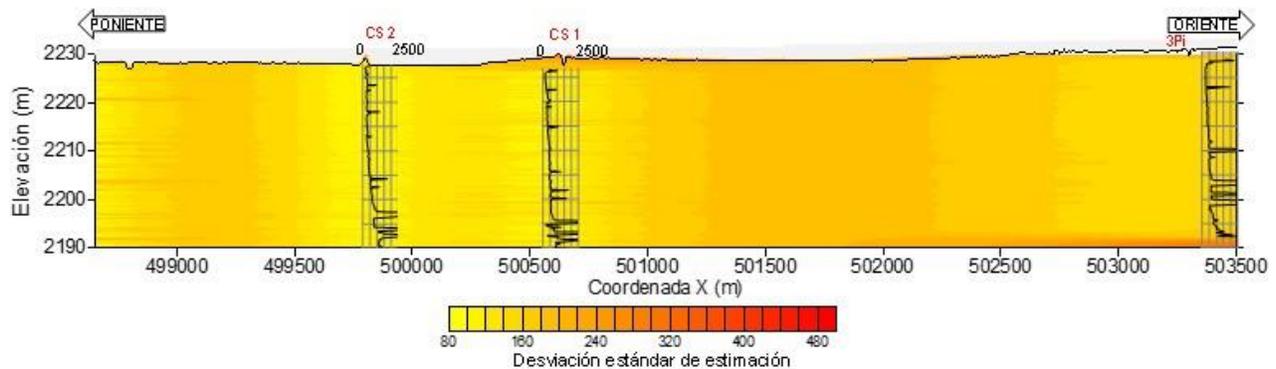


b) Sección transversal de la desviación estándar de estimación

Fig 5.f.48 Distribución espacial estimada de  $q_c$  para el eje B.



a) Sección transversal estimada de  $q_c$



b) Sección transversal de la desviación estándar de estimación

Fig 5.f.49 Distribución espacial estimada de  $q_c$  para el eje C.

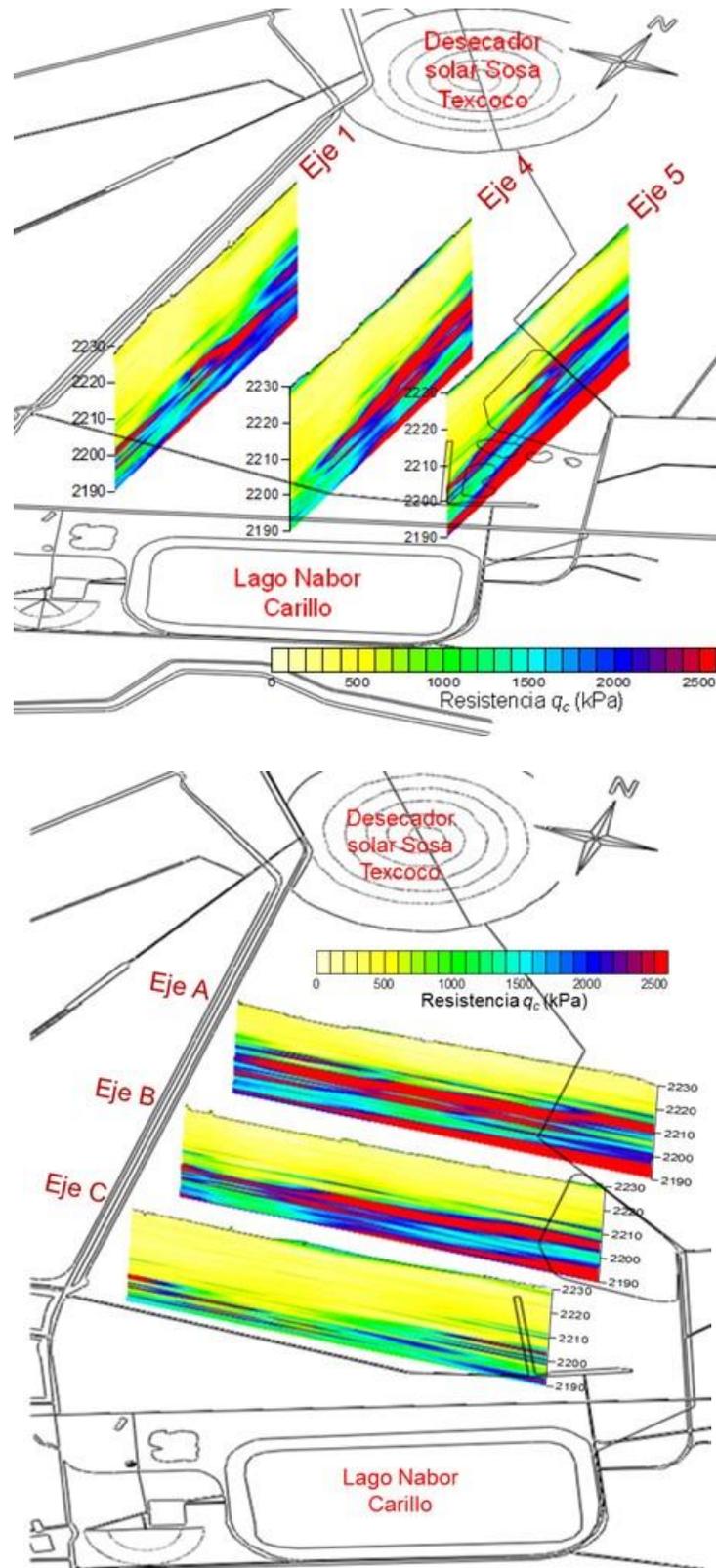


Fig 5.f.50 Modelos 3D de la distribución espacial estimada de  $q_c$ .

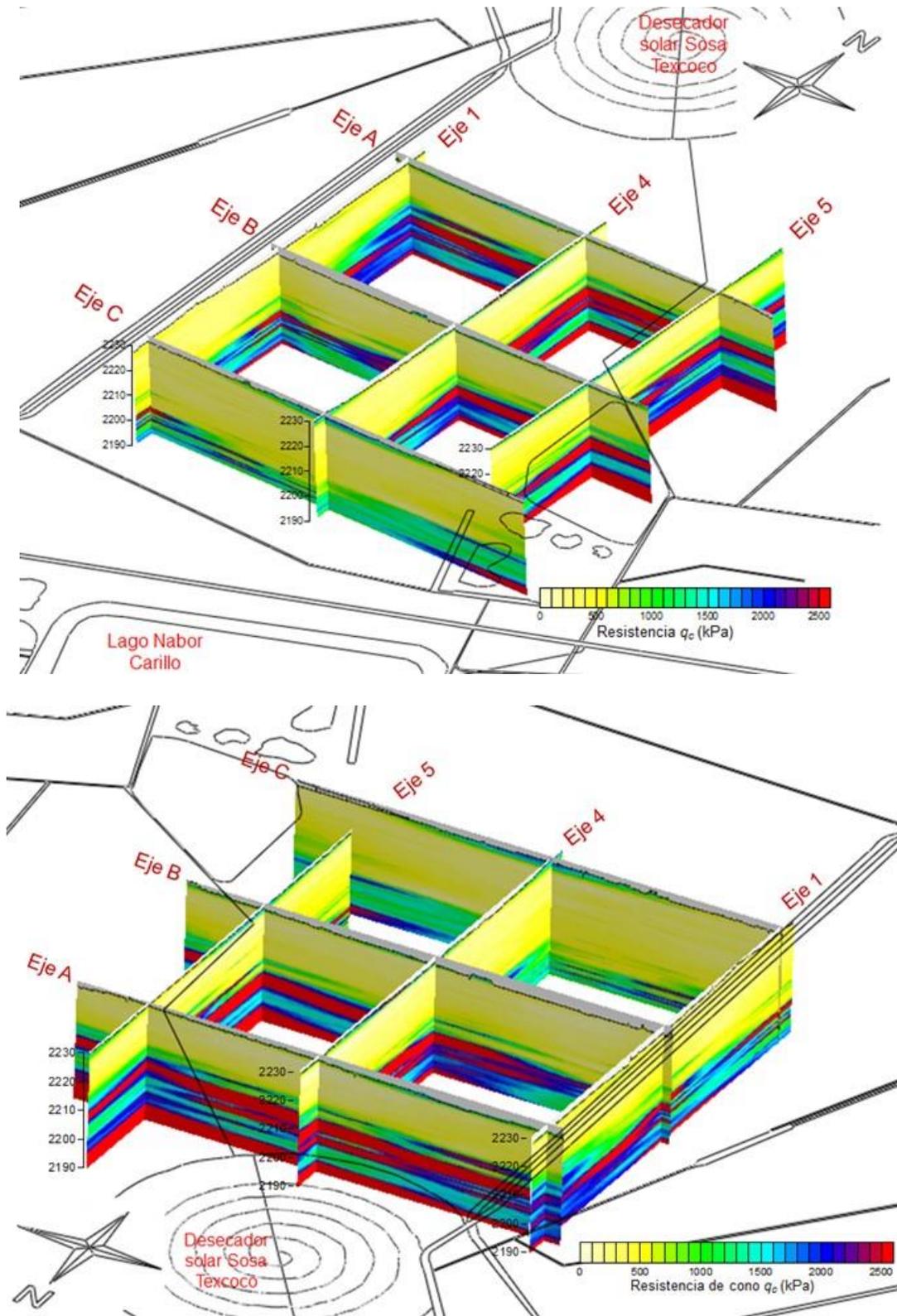


Fig 5.f.51 Modelos 3D de la Distribución espacial estimada de  $q_c$ .



### *Interpretación de los resultados*

De acuerdo con los modelos anteriores y con base en la escala de colores se tiene que:

Dentro del área estudiada, superficialmente se encuentran valores de  $q_c$  superiores a 500 kPa, asociados a la *Costra Superficial* (CS), el espesor de esta capa es irregular en todo el predio y varía de 0 a 1.2 m.

Bajo la CS se encuentran valores bajos de  $q_c$ , menores a 600 (kPa), asociados a la *Formación Arcillosa Superior* (FAS). En los modelos se observa que el espesor de esta capa se incrementa de norte a sur y de este a oeste. Al norte del área estudiada, el espesor de esta capa es de aproximadamente 18 m, de 22 m en el este y de aproximadamente 34 m en la zona suroeste. La FAS se encuentra intercalada con algunos lentes delgados con valores de  $q_c$  superiores a 600 kPa.

Bajo la FAS se encuentran valores de  $q_c$  superiores a 1000 kPa asociados a la *Capa Dura* (CD), con un espesor que varía entre 0.4 m al sureste y hasta de aproximadamente 4 m al norte del área de estudio.

Bajo la CD se distinguen valores de  $q_c$  de entre 500 y 2000 kPa, los cuales se asocian a la *Formación arcillosa inferior* (FAI), el espesor de esta capa es de 8m aproximadamente al norte y de 15 m aproximadamente en la zona sureste del área de estudio.

De acuerdo con los resultados del análisis de distribución espacial de la resistencia de punta de cono eléctrico, se tiene que:

Las menores resistencias de cono eléctrico se localizan en la zona suroriente del predio.

Al norte y al poniente del predio se localizan las zonas donde se registraron mayores resistencias de cono eléctrico.

El aumento de la resistencia de cono eléctrico indica que los estratos más resistentes se ubican de forma ascendente en las direcciones sur-norte y poniente-oriente de la zona.

La magnitud de la desviación estándar de estimación es relativamente alta en algunas zonas dentro del predio y pueden ayudar para definir la ubicación de nuevos sondeos, así como, la profundidad que deben alcanzar para mejorar la caracterización del subsuelo.

### 5.f.4 Análisis de la distribución espacial de las capas típicas del subsuelo

Con el propósito de conocer la configuración geométrica (profundidad y espesor) de las principales formaciones del subsuelo, se realizó un análisis de la distribución espacial empleando la misma metodología geoestadística. Por otra parte, con el propósito de realizar un análisis más realista, se consideró necesario referir la profundidad a elevaciones buscando reducir las implicaciones de algunas anomalías topográficas encontradas en la superficie del terreno, tales como acumulaciones de materiales de rellenos no controlados, bordos de lagunas y depresiones locales, entre otros.

En la Fig 5.f.52, se indica la ubicación de los sondeos utilizados como soporte de datos para el mapeo de los estratos típicos del subsuelo, donde las coordenadas (x, y) definen la posición en planta de los sondeos bajo la proyección UTM y datum WGS84.

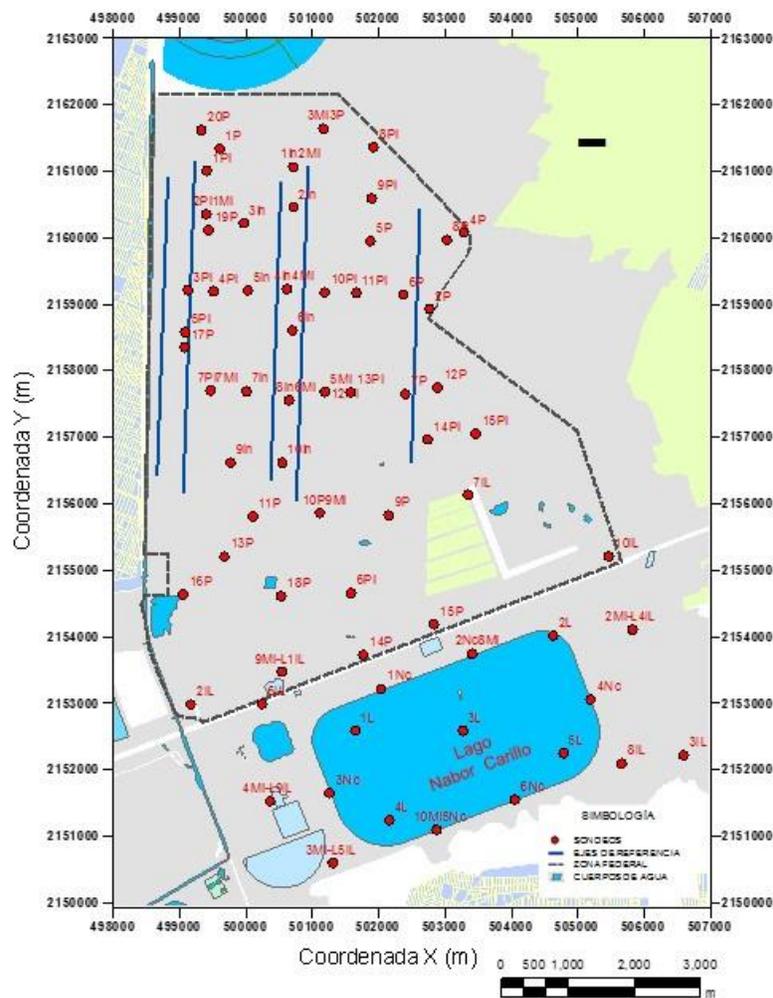


Fig 5.f.52 Ubicación de sondeos empleados para el mapeo de las capas típicas del subsuelo.



### 5.f.4.1 Análisis de distribución espacial de la elevación de la frontera superior de la Formación Arcillosa Superior

#### *Definición del dominio del campo aleatorio*

La profundidad superior de la FAS referida a elevaciones representa un campo aleatorio  $V(X)$ , distribuido dentro de un espacio  $R^p$ , con  $p = 2$  (área de estudio). El conjunto de valores medidos dentro del dominio  $R^p$ , constituye una muestra de ese campo aleatorio.

#### *Descripción estadística*

Aceptando condiciones de homogeneidad y ergodicidad, se estiman los principales parámetros estadísticos del campo aleatorio estudiado, mostrados en la Tabla 5.f.2.

Tabla 5.f.2 Parámetros estadísticos, elevación de la frontera superior de la FAS.

Parámetro	Valor
No. de datos	66
Media, $m$ (kPa)	2227.56
Varianza, $\sigma^2$ (kPa) <sup>2</sup>	1.988
Desviación estándar, $S$ (kPa)	1.41

#### *Análisis de correlación espacial*

La tendencia de la elevación superior de la FAS se evalúa mediante un análisis de regresión lineal de mínimos cuadrados, obteniendo los coeficientes:

$$a = -2.88E-05 \quad b = 4.02E-05 \quad c = 2158.82$$

La representación gráfica del plano de regresión lineal se muestra en la Fig 5.f.53, donde se observa que al norte, donde se ubica del evaporador solar de Sosa Texoco, la FAS alcanza su mayor elevación (aproximadamente 2231.46 m), lo que indica que se encuentra a menor profundidad y se profundiza hacia el suroeste al lado izquierdo del Lago Nabor Carrillo, donde alcanza una elevación aproximada de 2230.65 m.

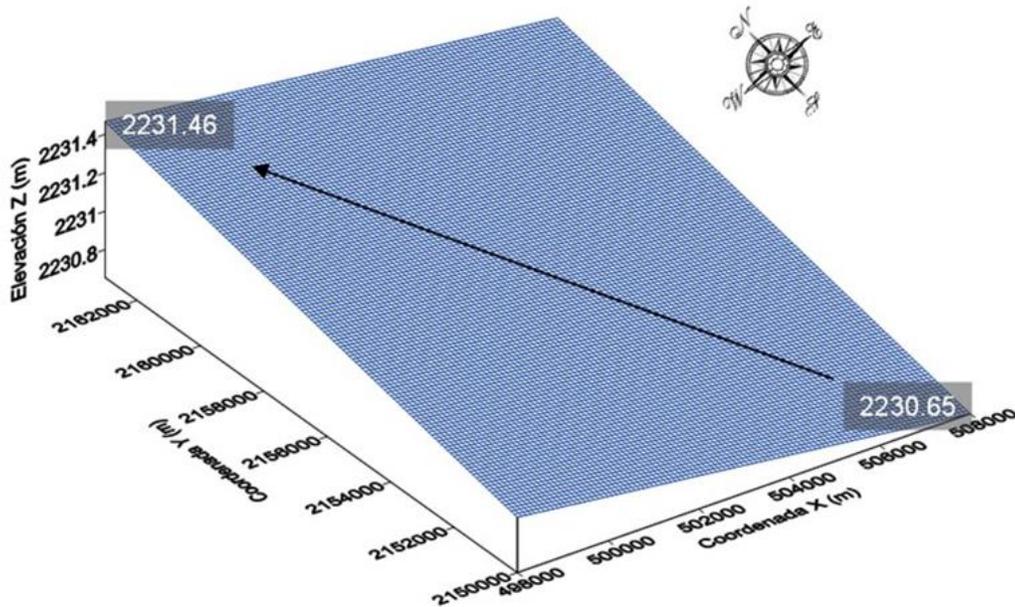


Fig 5.f.53 Superficie de regresión lineal, elevación de la frontera superior de la FAS.

Después de remover la tendencia de los datos originales, con el campo residual se calculan los correlogramas experimentales en cuatro direcciones preferenciales; Azimut  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$ ; considerando un paso de cálculo ( $\Delta h$ ) de 500m. Los correlogramas experimentales se muestran en la Fig 5.f.54. A partir de estos correlogramas se determinaron las distancias de correlación direccionales ( $\delta$ ) indicadas en la Tabla 5.f.3.

Tabla 5.f.3 Distancias de correlación de la elevación de la frontera superior de la FAS.

Dirección (grados)	$\delta$ (m)
Az = $0^\circ$	15000
Az = $45^\circ$	8500
Az = $90^\circ$	8000
Az = $135^\circ$	12000

Los correlogramas experimentales direccionales son ajustados a una función de tipo exponencial simple, empleando en las correspondientes distancias de correlación. Los modelos de correlación resultantes se muestran en la Fig 5.f.54.

Para la estimación se utilizaron las distancias de correlación obtenidas en las direcciones de  $45^\circ$  y  $135^\circ$ .

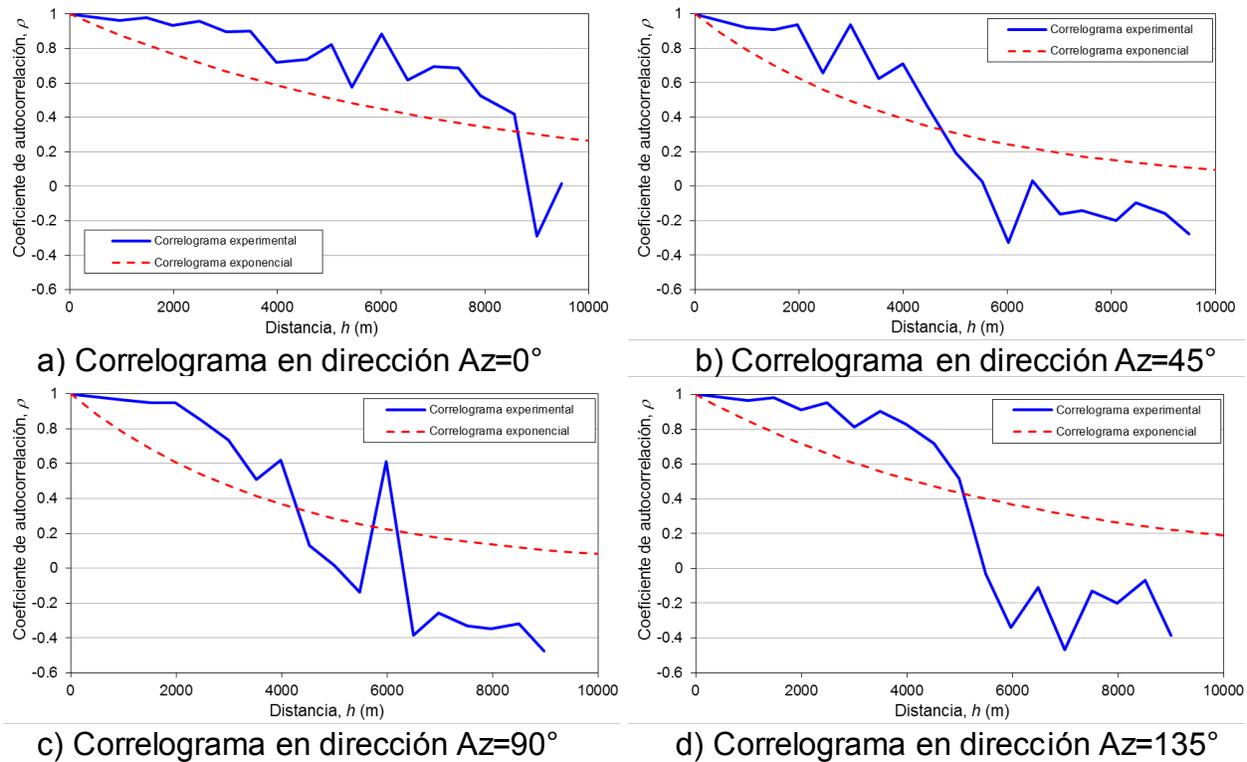


Fig 5.f.54 Modelos de correlación espacial, elevación de la frontera superior de la FAS.

### Predicción

La estimación de la profundidad de la frontera superior de la FAS se realizó en una malla de puntos espaciados a cada 100 m en ambas direcciones ( $X$  e  $Y$ ), empleando los datos del campo residual, la anisotropía definida por las distancias de correlación en las direcciones de  $45^\circ$  y  $135^\circ$ , y recurriendo a la técnica de *Kriging Ordinario*. La estimación final se obtiene regresando la tendencia al campo residual estimado.

### Visualización

Con el fin de apreciar en forma sencilla la distribución espacial de la profundidad de la FAS, se recurre a herramientas de graficación especializada para construir un mapa de contornos de la profundidad estimada de la FAS (Fig 5.f.55) y otro de la varianza de estimación (Fig 5.f.56). Asimismo, en la Fig 5.f.57 se presenta un modelo de superficie de la profundidad estimada de la FAS.

El mapa de la Fig 5.f.56 representa la desviación estándar de estimación, la cual permite evaluar el grado de confianza de los valores estimados.

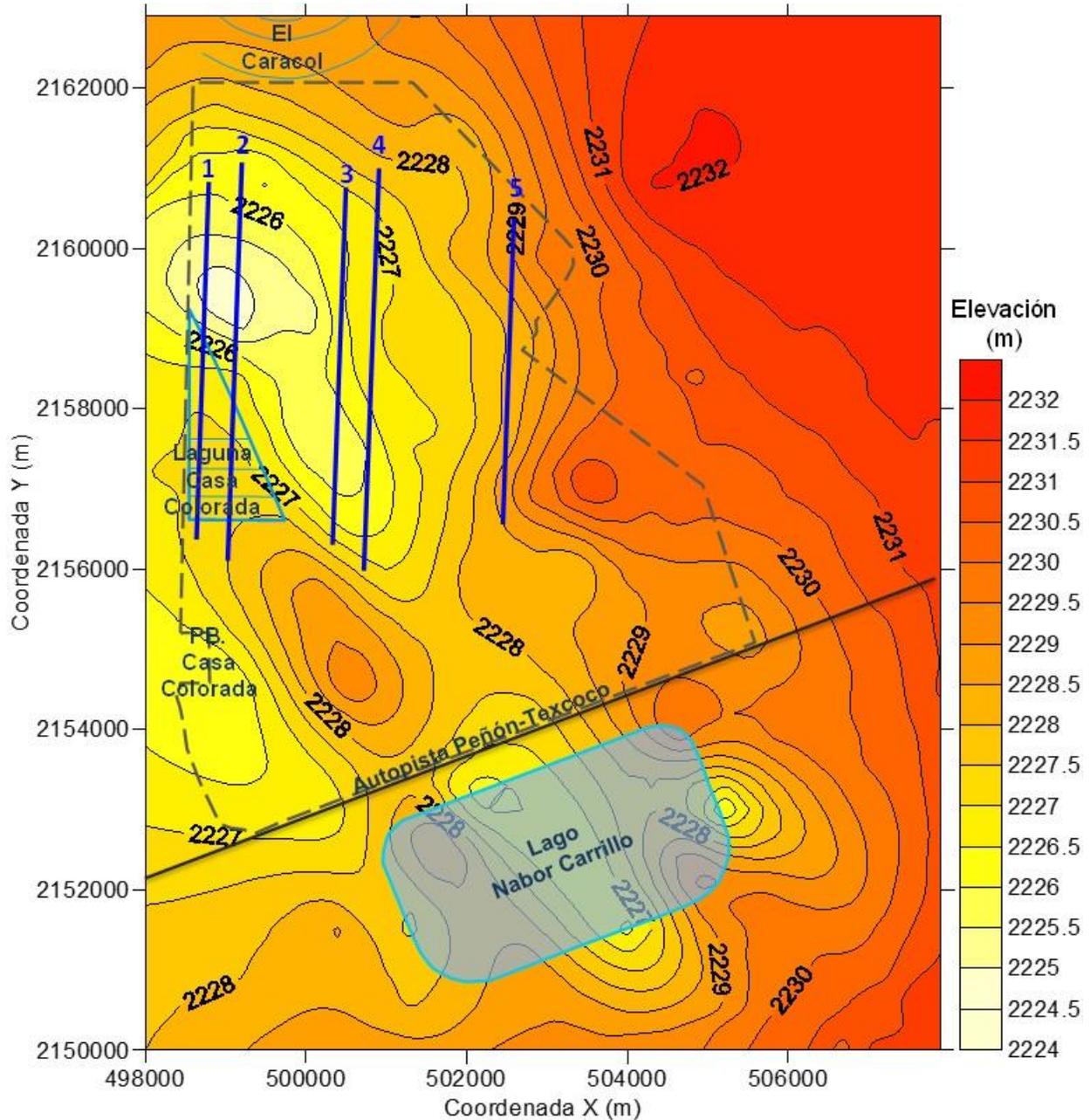


Fig 5.f.55 Contornos de la elevación estimada de la frontera superior de la FAS.

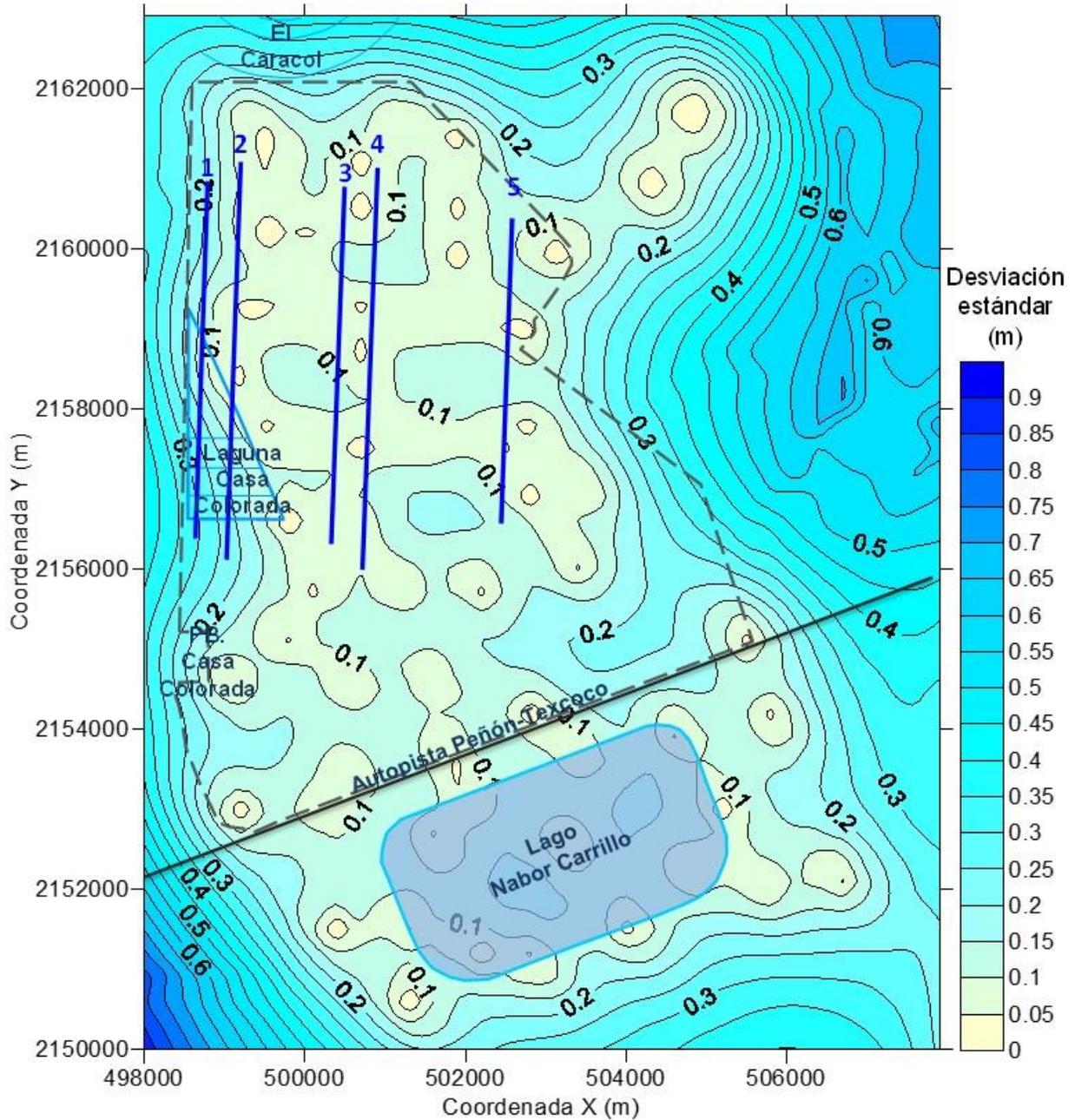


Fig 5.f.56 Contornos de la desviación estándar de estimación, frontera superior FAS.

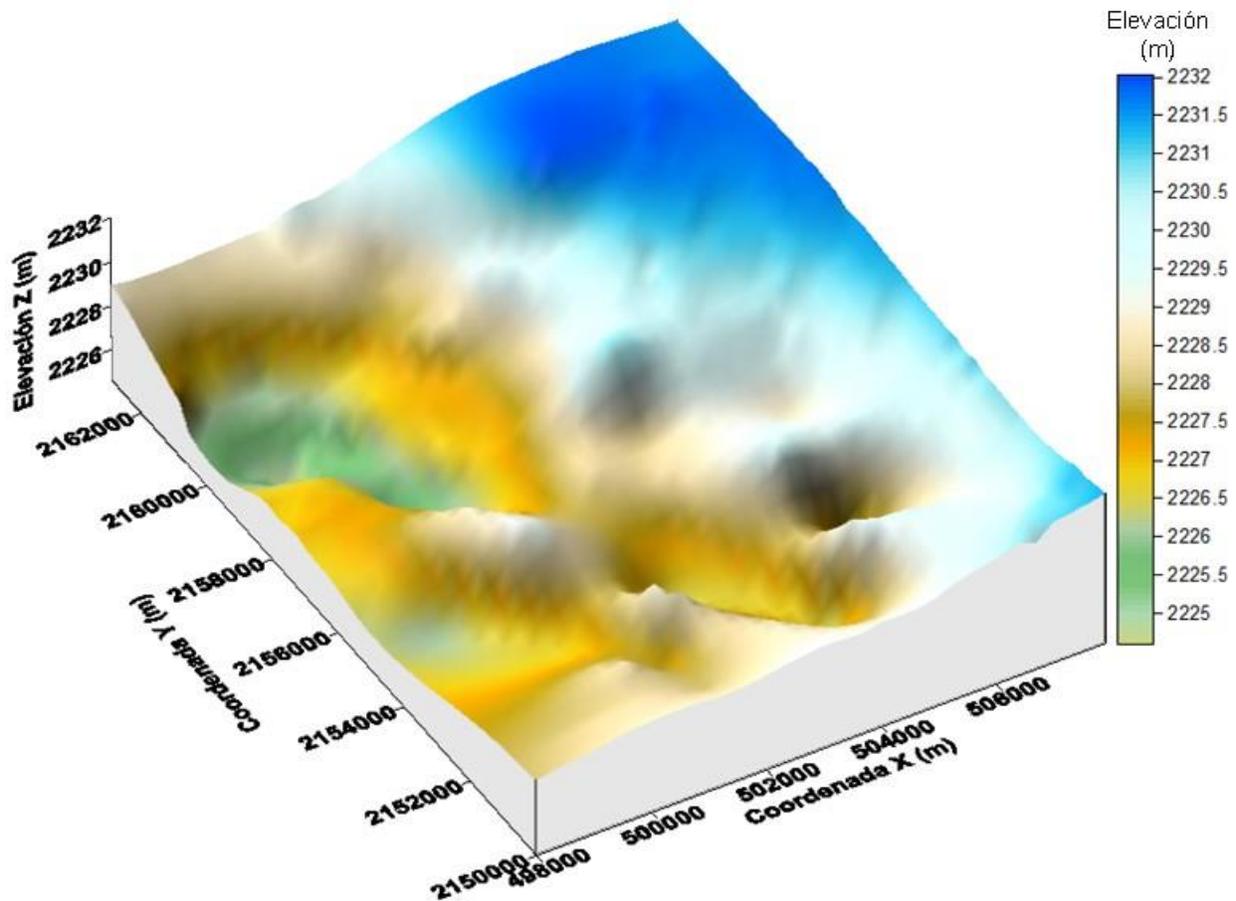


Fig 5.f.57 Superficie de la elevación estimada de la frontera superior de la FAS.

### *Interpretación de resultados*

Con base en las Figs 5.f.55 y 5.f.57, se observa que la FAS presenta una superficie irregular, localizándose algunos sitios de baja elevación. Uno de ellos se ubica en el *Lago Nabor Carrillo* con una elevación promedio de 2227 m, otro en a la *planta de bombeo Casa Colorada* con una elevación de 2226 m, y uno más al norte de la *laguna Casa Colorada* con una elevación de 2225 m. Por otra parte, la mayor elevación (aproximadamente 2232 m) se encuentra en la zona noreste del área de estudio, es decir, que en esta zona la FAS se encuentra a menor profundidad.



### 5.f.4.2 Análisis de distribución espacial de la elevación de la frontera superior de la Capa Dura

#### *Definición del dominio del campo aleatorio*

La profundidad superior de la frontera superior de la *Capa Dura* (CD) representa un campo aleatorio  $V(X)$ , distribuido dentro de un espacio  $R^p$ , con  $p = 2$  (área de estudio). El conjunto de valores medidos dentro del dominio  $R^p$ , constituye una muestra de ese campo aleatorio.

#### *Descripción estadística*

Aceptando condiciones de homogeneidad y ergodicidad, se estiman los principales parámetros estadísticos del campo aleatorio estudiado, mostrados en la Tabla 5.f.4.

Tabla 5.f.4 Parámetros estadísticos, elevación de la frontera superior de la CD.

Parámetro	Valor
No. de datos	66
Media, $m$ (kPa)	2202.35
Varianza, $\sigma^2$ (kPa) <sup>2</sup>	26.9361
Desviación estándar, $S$ (kPa)	5.19

#### *Análisis de correlación espacial*

La tendencia de la profundidad superior de la CD se evalúa mediante un análisis de regresión, lineal de mínimos cuadrados, ajustando una ecuación de tipo  $V(X) = ax + by + c$ , se obtienen los coeficientes de regresión lineal:

$$a = -7.67E-05 \quad b = 0.00014 \quad c = 1943.46$$

La representación gráfica del plano de regresión lineal se presenta en la Fig 5.f.22, donde se observa que al norte, en la zona del evaporador solar de sosa *Texoco*, la CD se encuentra a mayor elevación (2211.85 m aproximadamente), es decir, a menor profundidad con respecto al nivel del terreno, y se profundiza hacia el suroriente (lado izquierdo del Lago Nabor Carrillo) alcanzado una elevación aproximada de 2209 m.

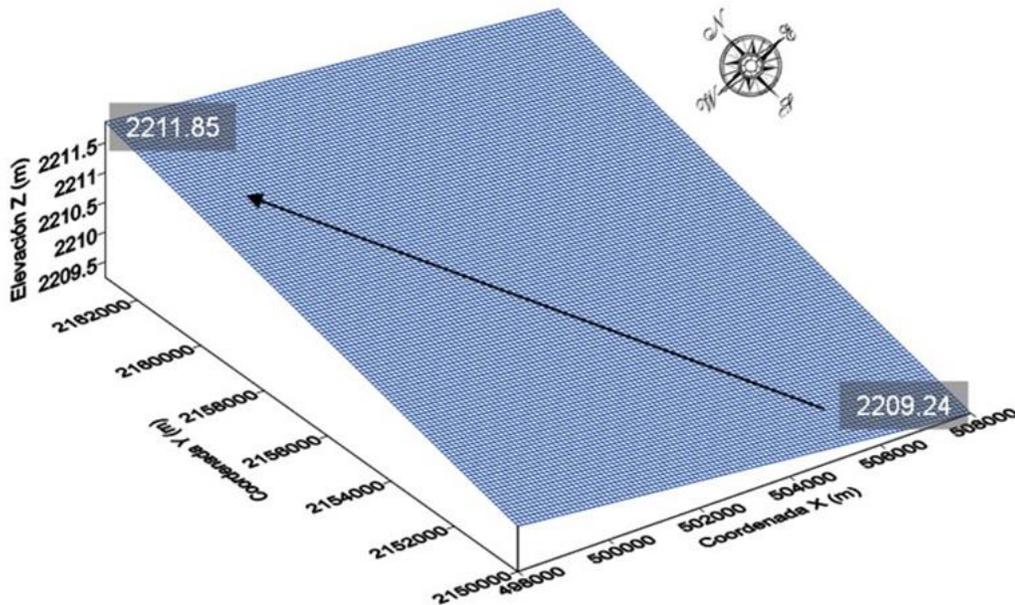


Fig 5.f.58 Superficie de regresión lineal, elevación de la frontera superior de la CD.

Después de remover la tendencia de los datos originales, con el campo residual se calculan los correlogramas experimentales en cuatro direcciones preferenciales; Azimut  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$  y con un paso de cálculo ( $\Delta h$ ) de 500 m. Los correlogramas experimentales se muestran en la Fig 5.f.59. A partir de estos correlogramas se determinan las distancias de correlación direccionales ( $\delta$ ), indicadas en la Tabla 5.f.5.

Tabla 5.f.5 Distancias de correlación de la elevación de la frontera superior de la CD.

Dirección (grados)	$\delta$ (m)
Az = $0^\circ$	16000
Az = $45^\circ$	10000
Az = $90^\circ$	10000
Az = $135^\circ$	11000

Los correlogramas experimentales direccionales son ajustados a una función de tipo exponencial simple, empleando las distancias de correlación de la Tabla 5.f.5. Los modelos de correlación espacial se muestran en la Fig 5.f.59.

Para la estimación se utilizaron las distancias de correlación obtenidas en las direcciones de  $45^\circ$  y  $135^\circ$ , siendo éstas de 10000 m y 11000 m respectivamente.

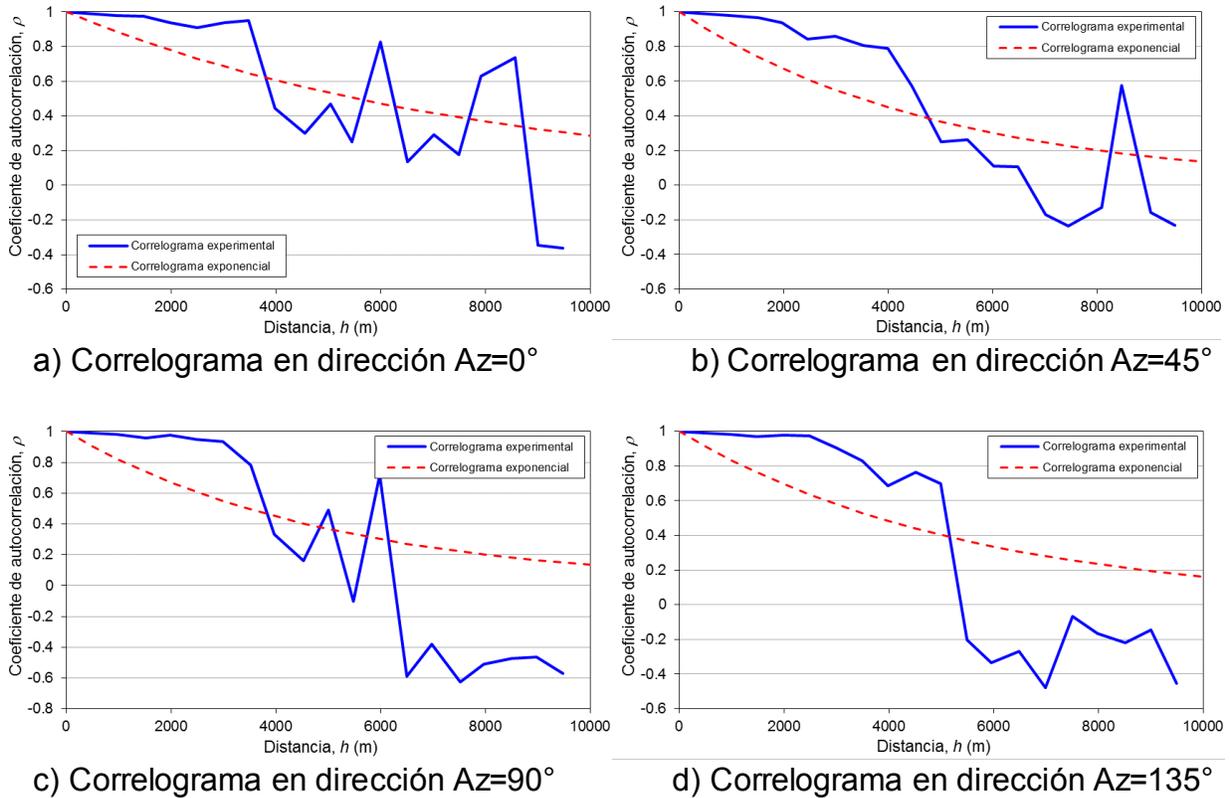


Fig 5.f.59 Modelos de correlación espacial, elevación de la frontera superior de la CD.

### Predicción

La estimación de la profundidad de la frontera superior de la CD se realizó en una malla de puntos espaciados a cada 100 m en ambas direcciones ( $X$  e  $Y$ ), empleando los datos del campo residual, la anisotropía definida por las distancias de correlación en las direcciones de  $45^\circ$  y  $135^\circ$ , y recurriendo a la técnica de *Kriging Ordinario*. La estimación final se obtiene regresando la tendencia al campo residual estimado.

### Visualización

Con el fin de apreciar en forma sencilla la distribución espacial de la profundidad de la CD, se construye un mapa de contornos de la elevación estimada de la CD (Fig 5.f.60) y otro de la varianza de estimación (Fig 5.f.61). Asimismo, en la Fig 5.f.62 se presenta un modelo de superficie de la elevación estimada de la frontera superior de la CD.

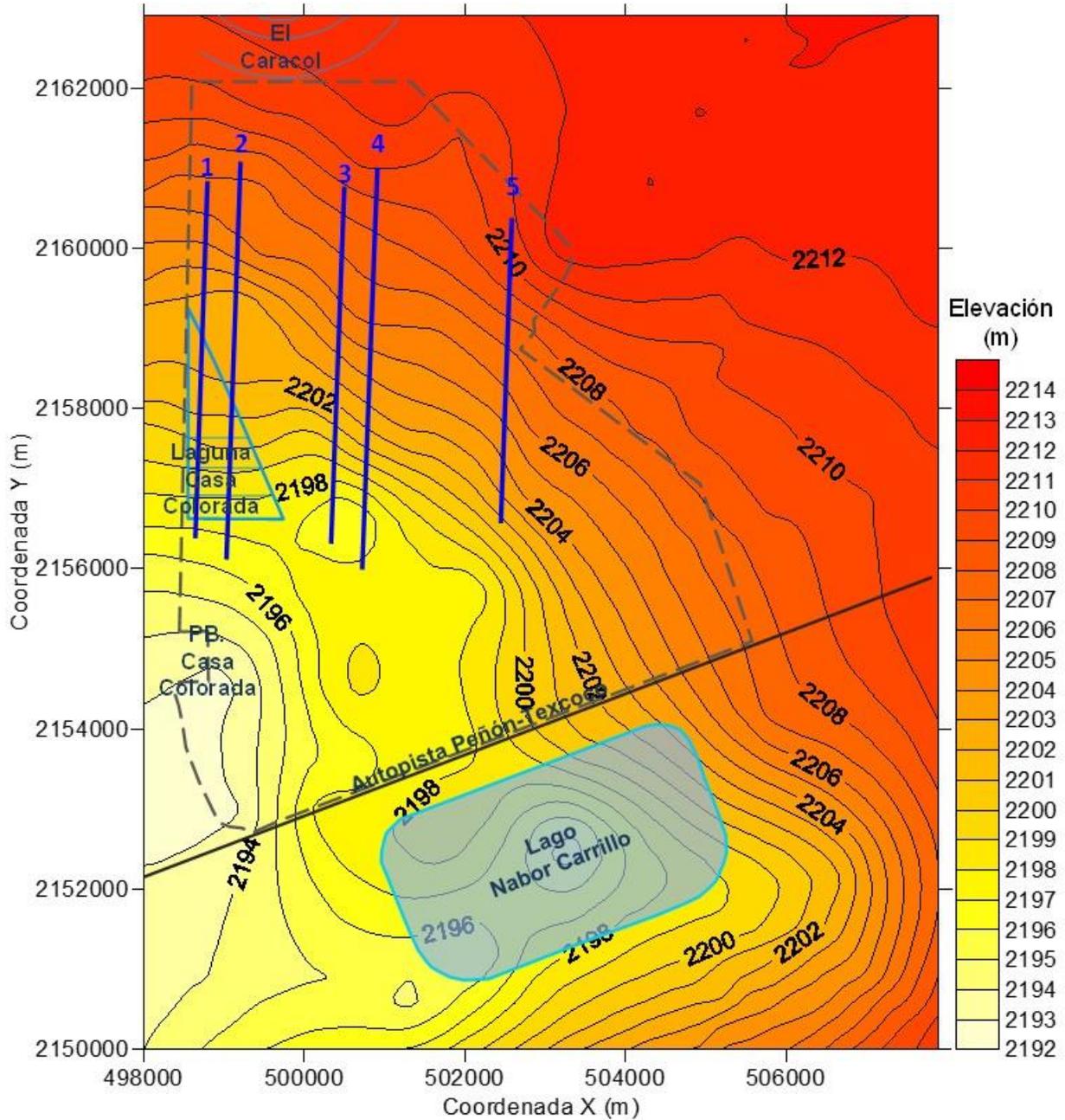


Fig 5.f.60 Contornos de la elevación estimada de la frontera superior de la CD.

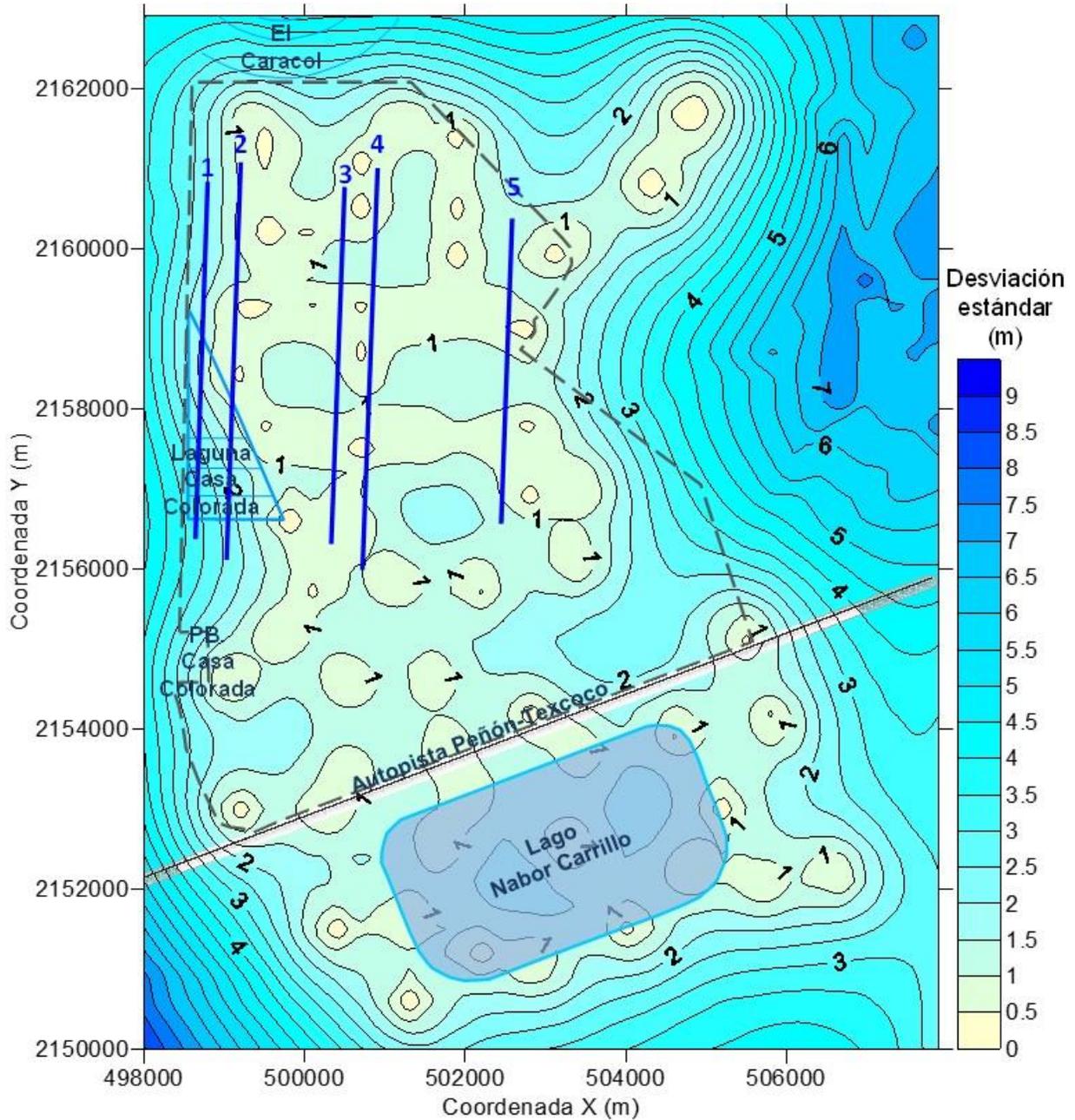


Fig 5.f.61 Contornos de la desviación estándar de estimación, frontera superior CD.

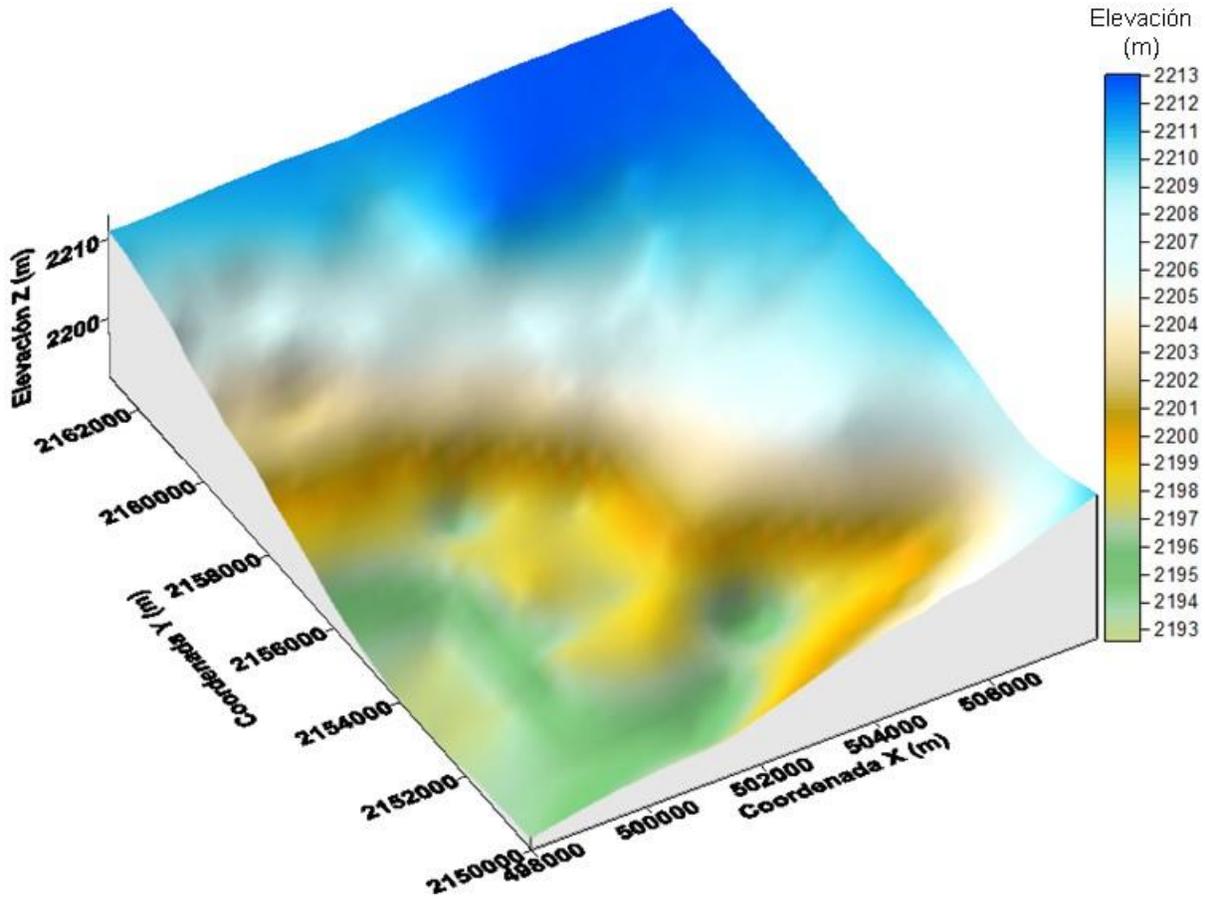


Fig 5.f.62 Superficie de la elevación estimada de la frontera superior de la CD.

### *Interpretación de resultados*

De acuerdo con los resultados mostrados en las Figs 5.f.60 y 5.f.62, se observa que en el nororiente la CD se encuentra a una mayor elevación (aproximadamente 2212 m) y desciende progresivamente hacia el sur poniente alcanzando en la zona más baja una elevación aproximada de 2193 m, ubicada al sur de la *planta de bombeo Casa Colorada*.



### 5.f.4.3 Análisis de distribución espacial de la elevación de la frontera superior de la Formación Arcillosa Inferior

#### *Definición del dominio del campo aleatorio*

La profundidad superior de la FAI representa un campo aleatorio  $V(X)$ , distribuido dentro de un espacio  $R^p$ , con  $p = 2$  (área de estudio). El conjunto de valores medidos dentro del dominio  $R^p$ , constituye una muestra de ese campo aleatorio.

Para este análisis se emplearon 190 sondeos realizados en el periodo 1990-2009. Se adoptó como límite del dominio estudiado el contorno definido por la exploración directa de los sondeos y el análisis de la pendiente de las serranías con base en las curvas de nivel en la zona de estudio. Debe señalarse que debido al fenómeno del hundimiento regional las profundidades actuales pueden ser sensiblemente menores a las registradas en los sondeos más antiguos.

#### *Descripción estadística*

Aceptando condiciones de homogeneidad y ergodicidad, se estiman los principales parámetros estadísticos del campo aleatorio estudiado, mostrados en la Tabla 5.f.6.

Tabla 5.f.6 Parámetros estadísticos, elevación de la frontera superior de la FAI.

Parámetro	Valor
No. de datos	66
Media, $m$ (kPa)	2200.08
Varianza, $\sigma^2$ (kPa) <sup>2</sup>	16.4836
Desviación estándar, $S$ (kPa)	4.06

#### *Análisis de correlación espacial*

La tendencia de la profundidad superior de la FAI se evalúa mediante un análisis de regresión, lineal de mínimos cuadrados, ajustando una ecuación de tipo  $V(X) = ax + by + c$ , se obtienen los coeficientes de regresión lineal:

$$a = -6.94E-05 \quad b = 0.00012 \quad c = 1978.74$$

La representación gráfica del plano de regresión lineal se presenta en la Fig 5.f.63, donde se observa que al norte, en la zona del evaporador solar sosa *Texoco*, la FAI se encuentra a mayor elevación (2208.89 m), profundizándose hacia el suroriente (lado izquierdo del Lago Nabor Carrillo), donde alcanza una elevación aproximada de 2206 m.

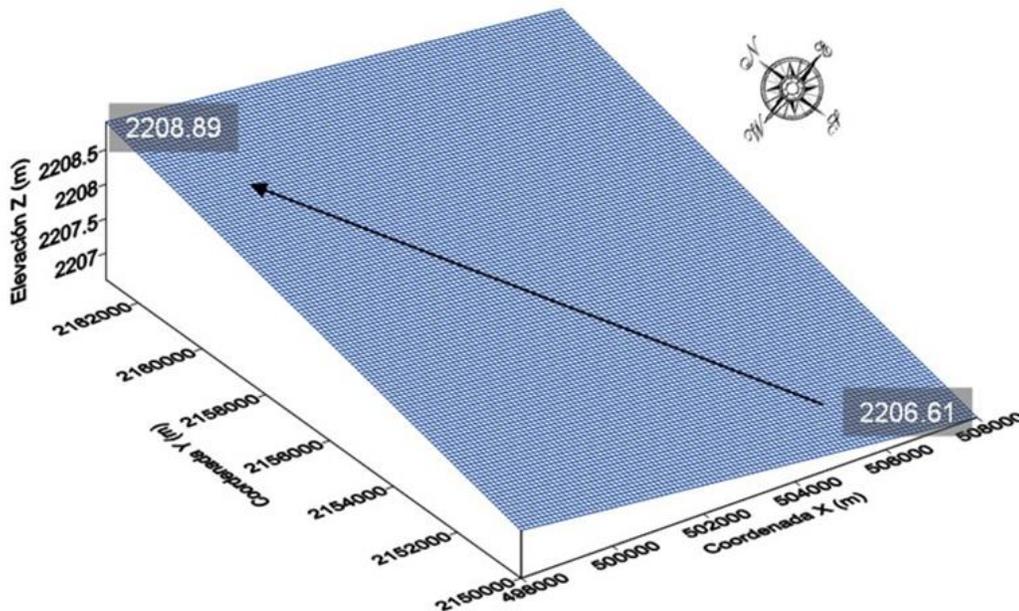


Fig 5.f.63 Superficie de regresión lineal, elevación de la frontera superior de la FAI.

Después de remover la tendencia de los datos originales, con el campo residual se calculan los correlogramas experimentales en cuatro direcciones preferenciales; Azimut  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$  y con un paso de cálculo ( $\Delta h$ ) de 500 m. Los correlogramas experimentales se muestran en la Fig 5.f.64. A partir de estos correlogramas se determinan las distancias de correlación direccionales ( $\delta$ ), indicadas en la tabla 5.f.7.

Tabla 5.f.7 Distancias de correlación de la elevación de la frontera superior de la FAI.

Dirección (grados)	$\delta$ (m)
Az = $0^\circ$	20000
Az = $45^\circ$	10000
Az = $90^\circ$	10000
Az = $135^\circ$	11000

Los correlogramas experimentales direccionales son ajustados a una función de tipo exponencial simple, empleando las distancias de correlación de la tabla 5.f.7. Los modelos de correlación espacial se muestran en la Fig 5.f.64.

Para la estimación se utilizaron las distancias de correlación obtenidas en las direcciones de  $45^\circ$  y  $135^\circ$ , siendo éstas de 10000 m y 11000 m respectivamente.

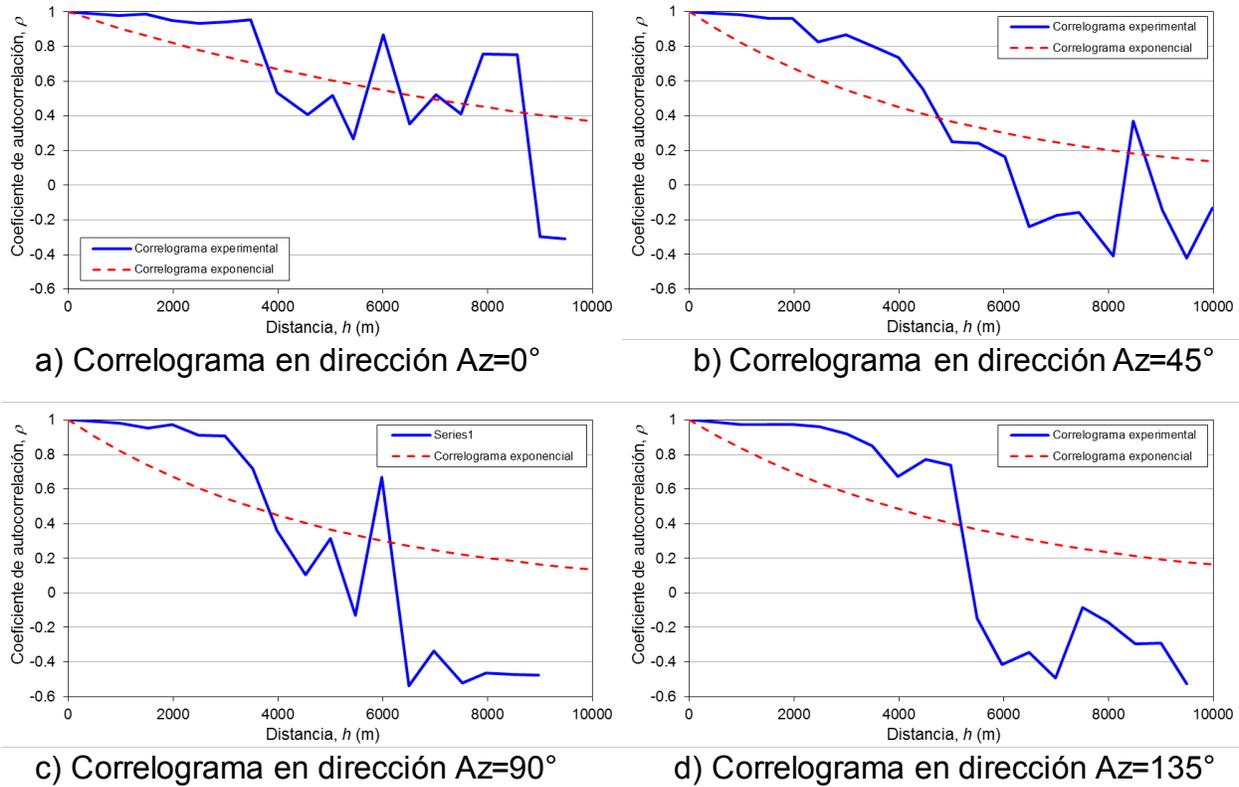


Fig 5.f.64 Modelos de correlación espacial, elevación de la frontera superior de la FAI.

### Predicción

La estimación de la profundidad de la frontera superior de la FAI se realizó en una malla de puntos espaciados a cada 100 m en ambas direcciones ( $X$  e  $Y$ ), empleando los datos del campo residual, la anisotropía definida por las distancias de correlación en las direcciones de  $45^\circ$  y  $135^\circ$ ; y recurriendo a la técnica de *Kriging Ordinario*. La estimación final se obtiene regresando la tendencia al campo residual estimado.

### Visualización

Con el fin de apreciar en forma sencilla la distribución espacial de la profundidad de la FAI, se construye un mapa de contornos de la profundidad estimada de la FAI (Fig 5.f.65) y otro de la varianza de estimación (Fig 5.f.66). Asimismo, en la Fig 5.f.67 se



presenta un modelo de superficie de la elevación estimada de la frontera superior de la FAI.

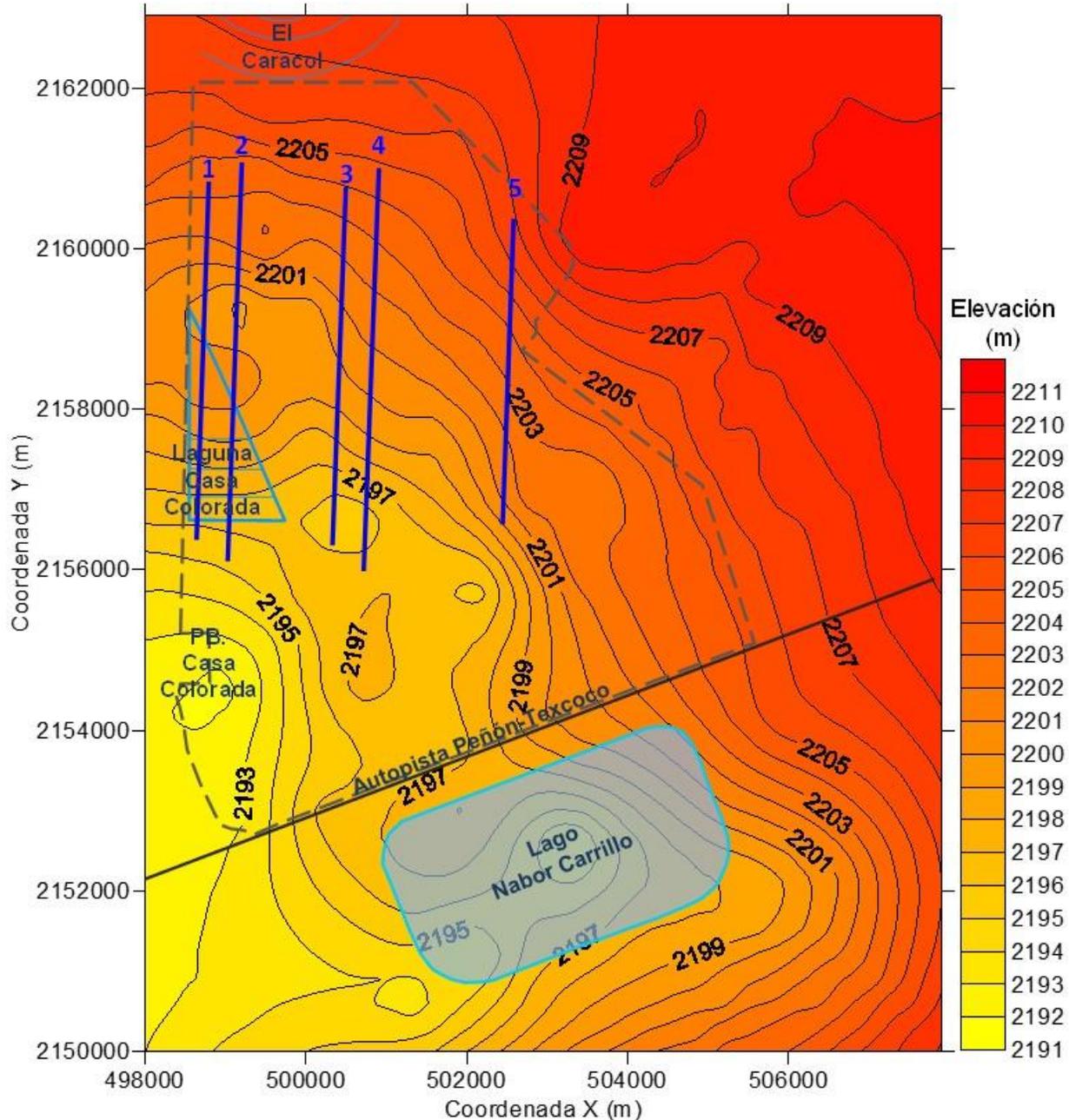


Fig 5.f.65 Contornos de la elevación estimada de la frontera superior de la FAI.

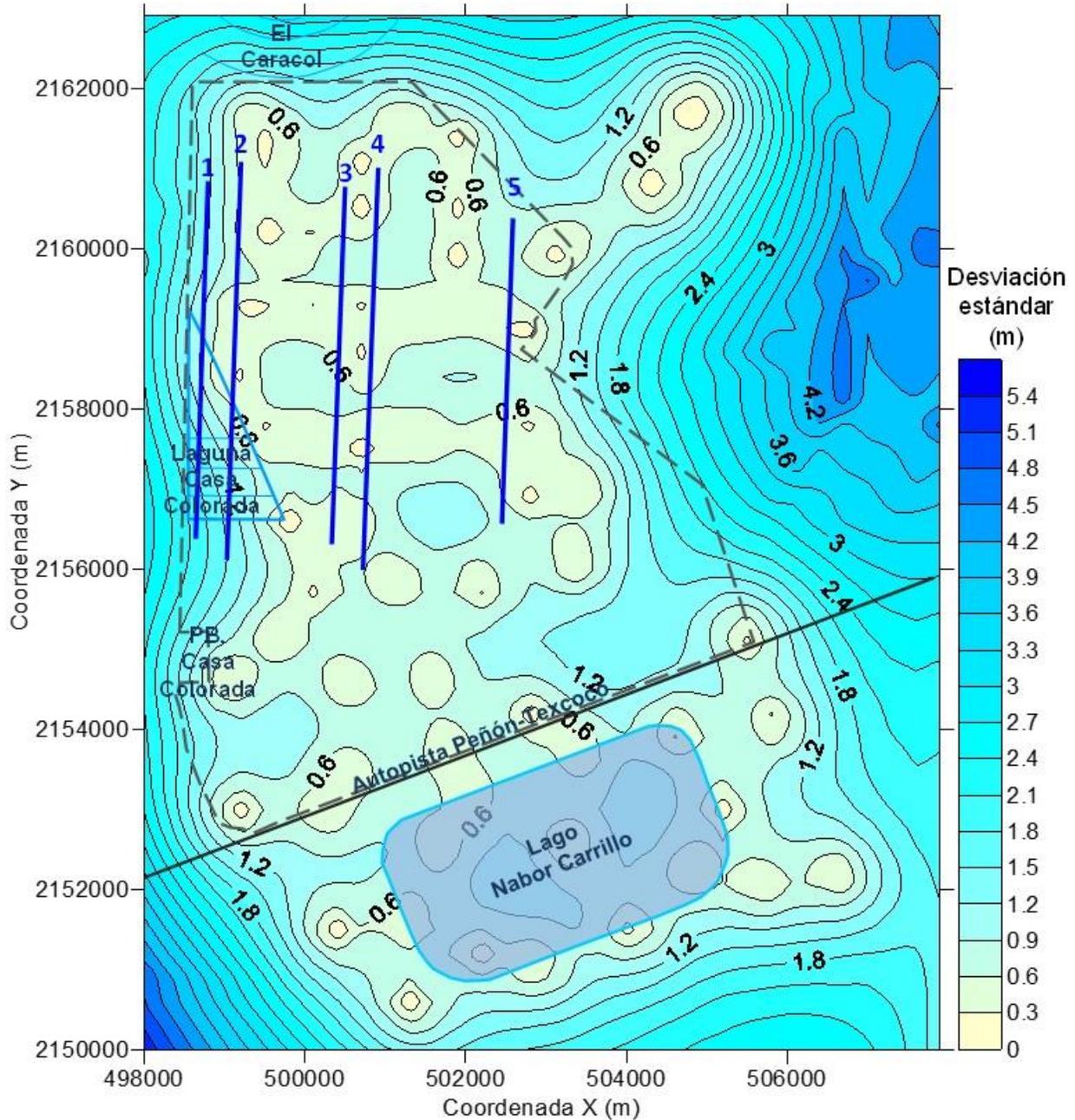


Fig 5.f.66 Contornos de la desviación estándar de estimación, frontera superior FAI.

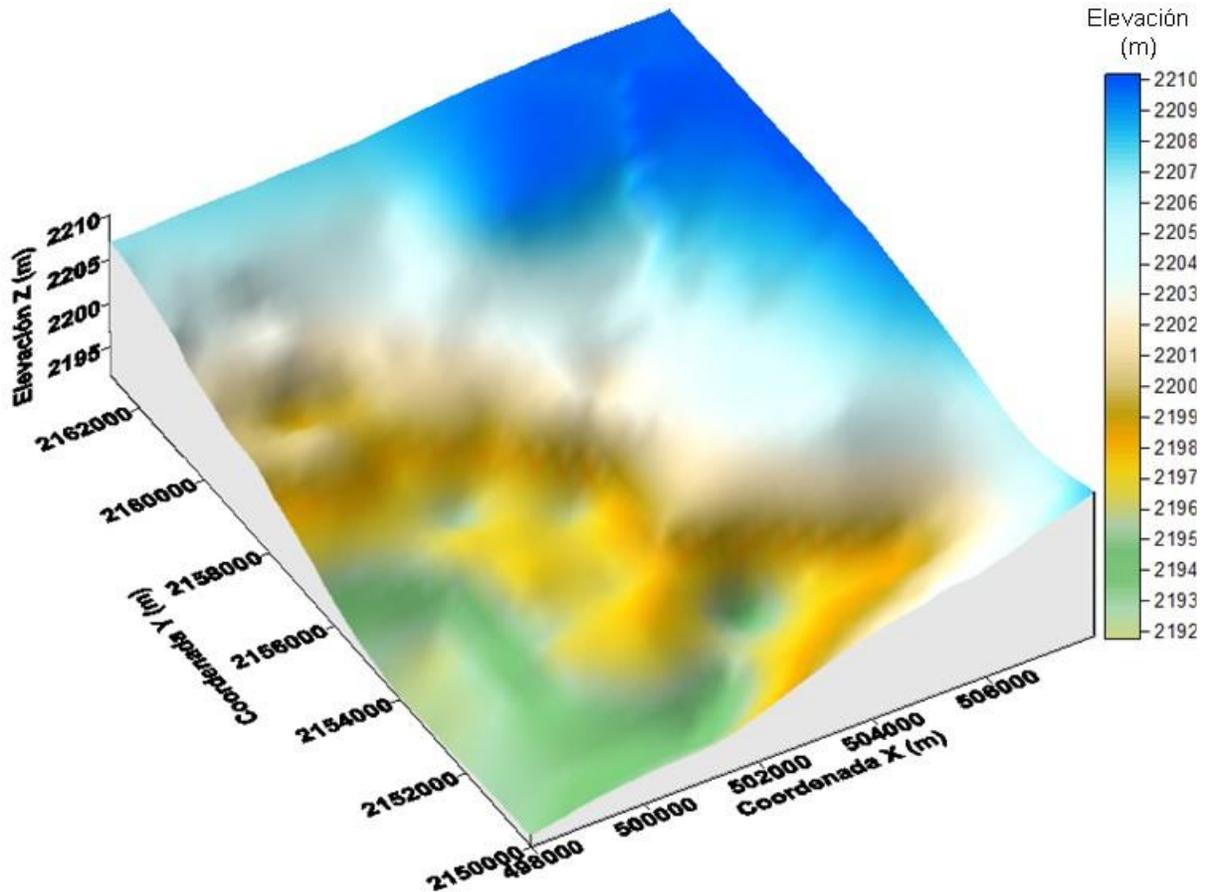


Fig 5.f.67 Superficie de la elevación estimada de la frontera superior de la FAI.

### *Interpretación de resultados*

De acuerdo con los resultados del análisis de distribución espacial (Figs 5.f.65 y 5.f.67), se tiene que, al nororiente del área estudiada la FAI se encuentra a una mayor elevación (aproximadamente 2210 m) y se profundiza gradualmente hacia el surponiente donde alcanza la más baja elevación (aproximadamente 2192 m), esta zona se ubica al sur de la *planta de bombeo Casa Colorada*.



#### 5.f.4.4 Análisis de distribución espacial de la elevación de la frontera superior de los Depósitos Profundos

La profundidad superior de los DP representa un campo aleatorio  $V(X)$ , distribuido dentro de un espacio  $R^p$ , con  $p = 2$  (área de estudio). El conjunto de valores medidos dentro del dominio  $R^p$ , constituye una muestra de ese campo aleatorio.

##### *Descripción estadística*

Aceptando condiciones de homogeneidad y ergodicidad, se estiman los principales parámetros estadísticos del campo aleatorio estudiado, mostrados en la Tabla 5.f.8.

Tabla 5.f.8 Parámetros estadísticos, elevación de la frontera superior de los DP.

Parámetro	Valor
No. de datos	66
Media, $m$ (kPa)	2189.20
Varianza, $\sigma^2$ (kPa) <sup>2</sup>	38.5641
Desviación estándar, $S$ (kPa)	6.21

##### *Análisis de correlación espacial*

La tendencia de la profundidad superior de los DP se evalúa mediante un análisis de regresión, lineal de mínimos cuadrados, ajustando una ecuación de tipo  $V(X) = ax + by + c$ , se obtienen los coeficientes de regresión lineal:

$$a = -8.74E-05 \quad b = 0.00015 \quad c = 1907.03$$

La representación gráfica del plano de regresión lineal se presenta en la Fig 5.f.68, donde se observa que al norte, en el *Caracol Texoco*, los DP se encuentran a mayor elevación (aproximadamente 2200.61 m) y se profundizan hacia el suroeste (lado izquierdo del Lago Nabor Carrillo), donde alcanza una elevación aproximada de 2197.71 m.

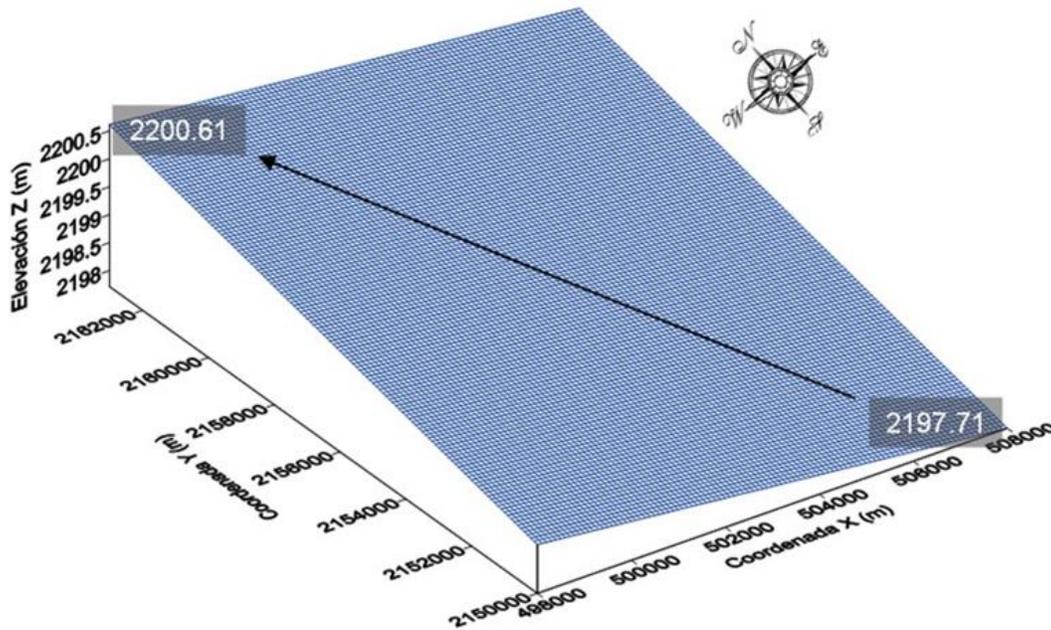


Fig 5.f.68 Superficie de regresión lineal, elevación de la frontera superior de los DP.

Después de remover la tendencia de los datos originales, con el campo residual se calculan los correlogramas experimentales en cuatro direcciones preferenciales; Azimut  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$  y con un paso de cálculo ( $\Delta h$ ) de 500m. Los correlogramas experimentales se muestran en la Fig 5.f.33. A partir de estos correlogramas se determinan las distancias de correlación direccionales ( $\delta$ ), indicadas en la Tabla 5.f.9.

Tabla 5.f.9 Distancias de correlación de la elevación de la frontera superior de los DP.

Dirección (grados)	$\delta$ (m)
Az = $0^\circ$	18000
Az = $45^\circ$	11000
Az = $90^\circ$	12000
Az = $135^\circ$	12000

Los correlogramas experimentales direccionales son ajustados a una función de tipo exponencial simple, empleando las distancias de correlación de la tabla 5.f.9. Los modelos de correlación espacial se muestran en la Fig 5.f.69.

Para la estimación se utilizaron las distancias de correlación obtenidas en las direcciones de  $45^\circ$  y  $135^\circ$ , siendo éstas de 11000 m y 12000 m respectivamente.

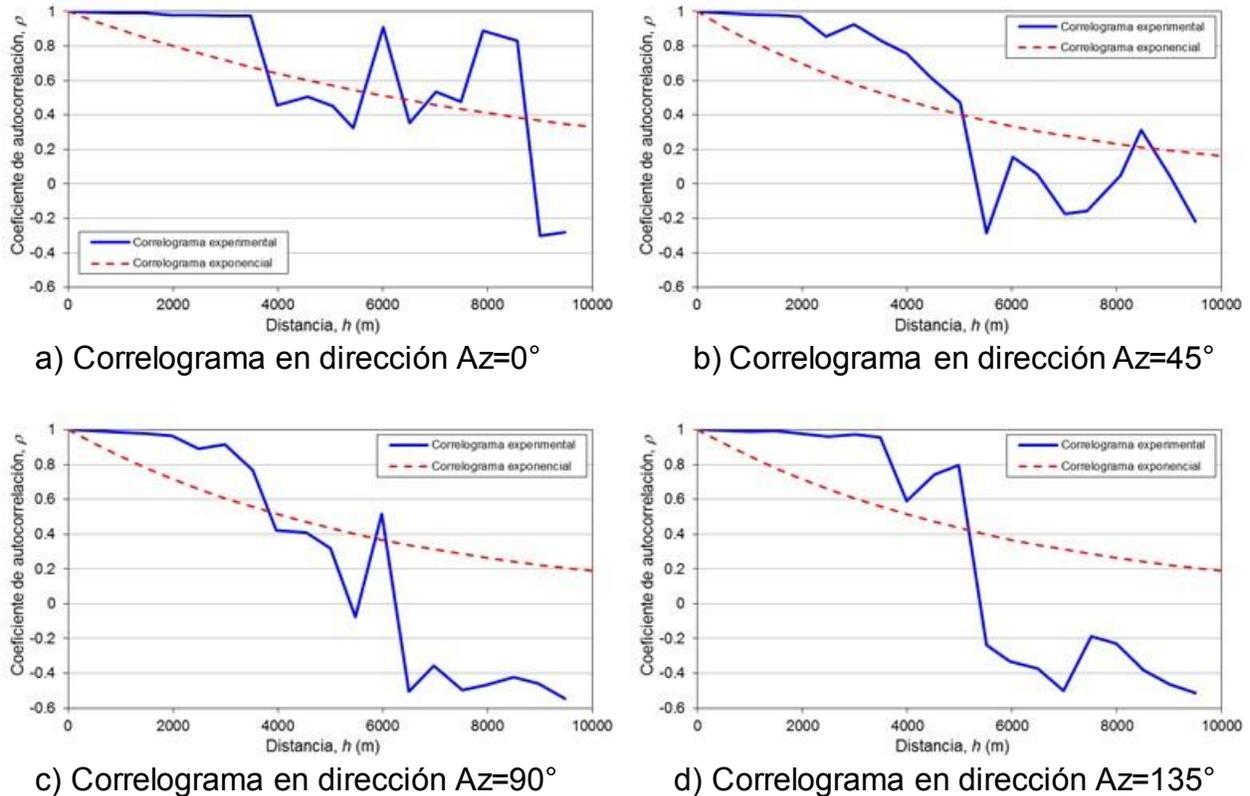


Fig 5.f.69 Modelos de correlación espacial, elevación de la frontera superior de los DP.

### Estimación

La estimación de la profundidad de la frontera superior de los DP se realizó en una malla de puntos espaciados a cada 100 m en ambas direcciones ( $X$  e  $Y$ ), empleando los datos del campo residual, la anisotropía definida por las distancias de correlación en las direcciones de  $45^\circ$  y  $135^\circ$ , y recurriendo a la técnica de *Kriging Ordinario*. La estimación final se obtiene regresando la tendencia al campo residual estimado.

### Visualización

Con el fin de apreciar en forma sencilla la distribución espacial de la profundidad de los DP, se construye un mapa de contornos de la elevación estimada de la frontera superior de los DP (Fig 5.f.70) y otro de la varianza de estimación (Fig 5.f.71). Asimismo, en la Fig 5.f.72 se presenta un modelo de superficie de la elevación estimada de la frontera superior de los DP.

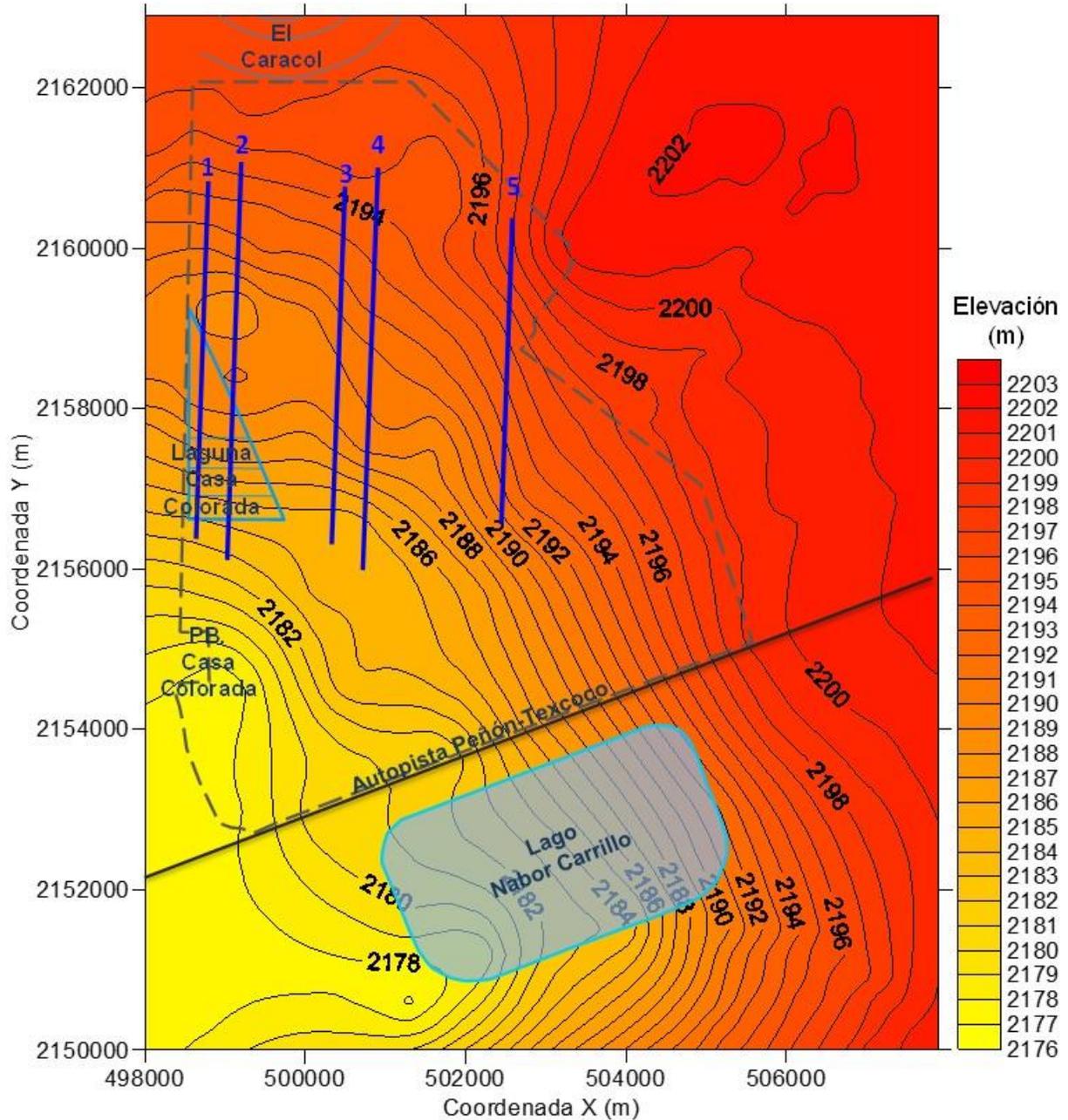


Fig 5.f.70 Contornos de la elevación estimada de la frontera superior de los DP.

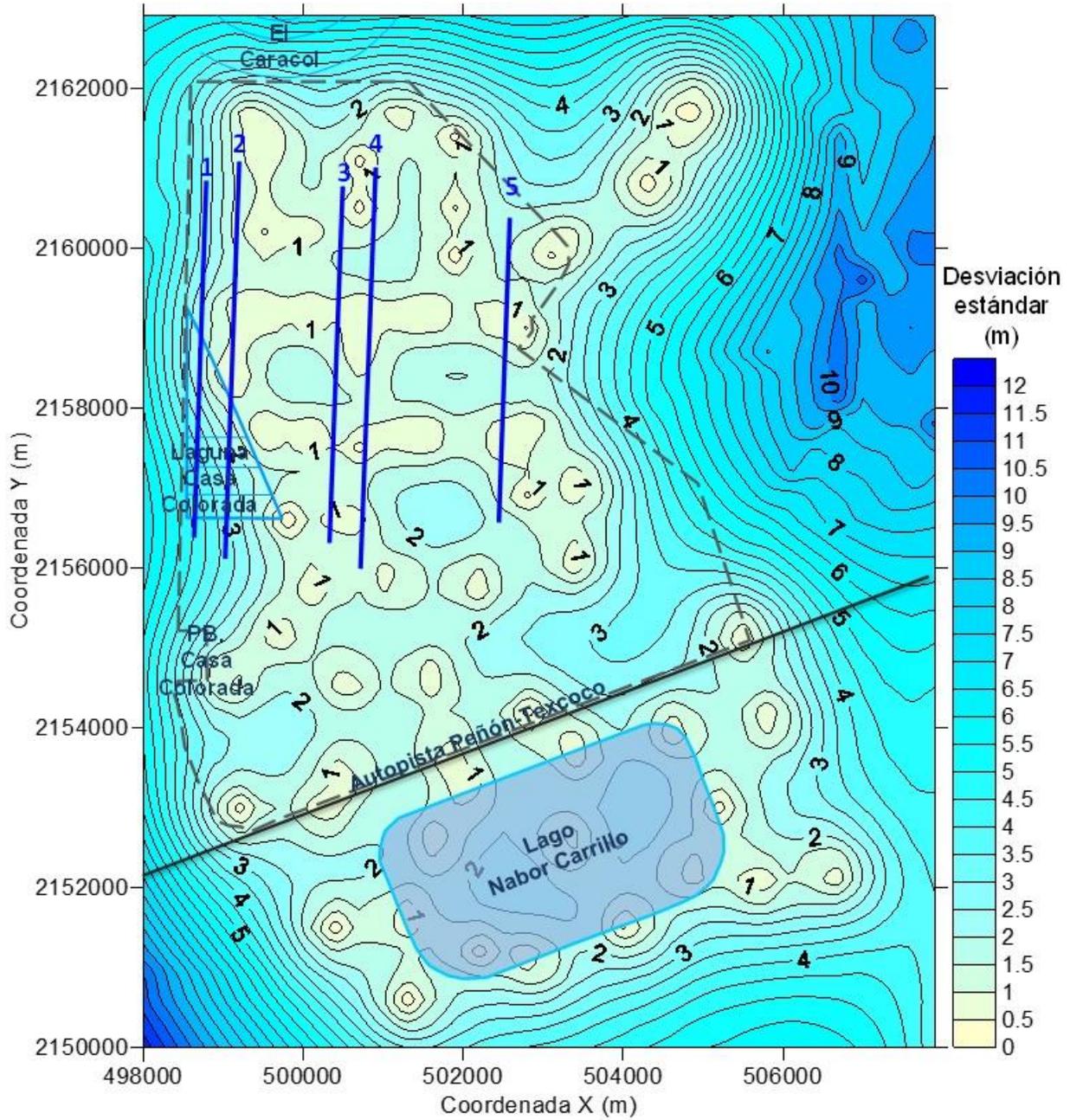


Fig 5.f.71 Contornos de la desviación estándar de estimación, frontera superior DP.

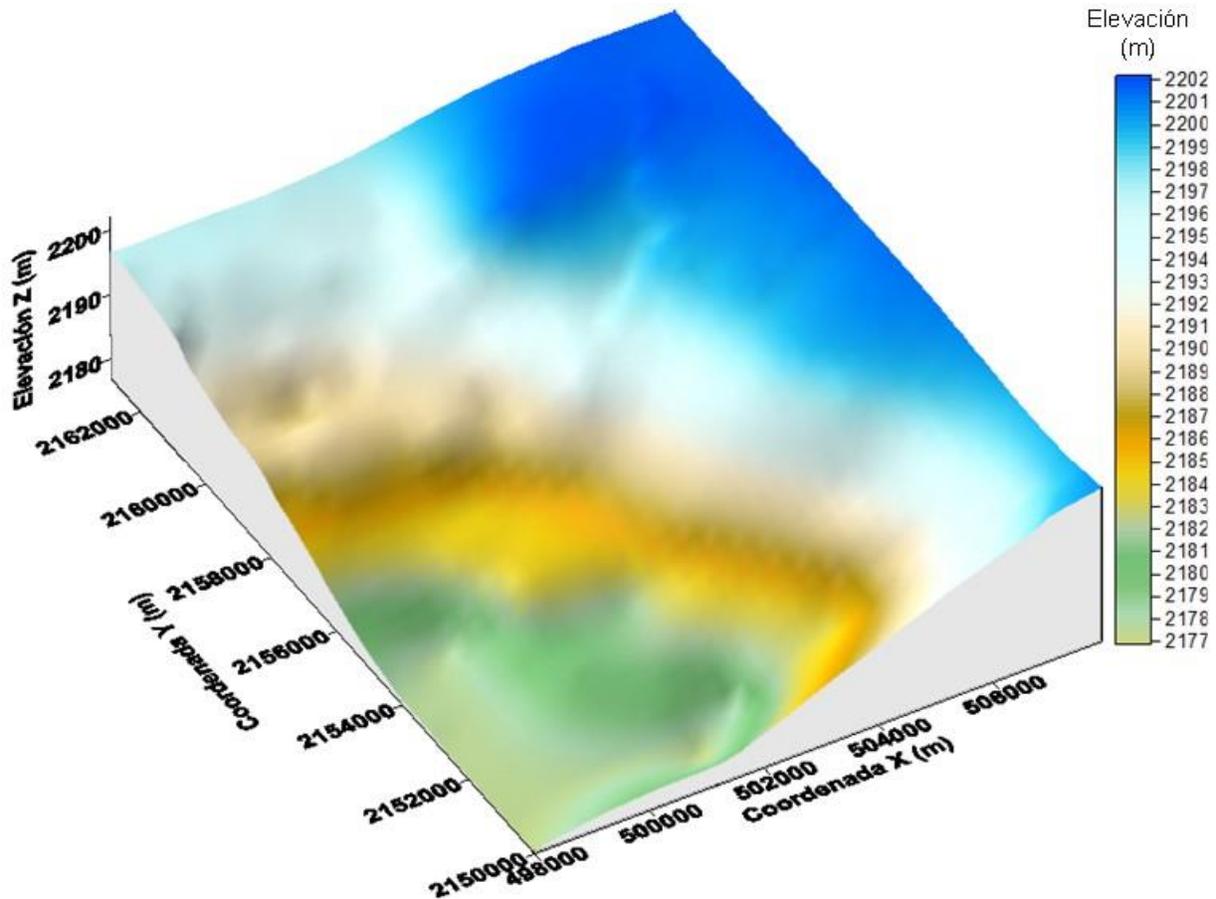


Fig 5.f.72 Superficie de la elevación estimada de la frontera superior de los DP.

### *Interpretación de resultados*

De acuerdo con los resultados del análisis de distribución espacial de la profundidad de los DP (Figs 5.f.70 y 5.f.72), se tiene que, al poniente del área de estudio los DP se encuentran a mayor elevación (aproximadamente 2202 m) y se profundiza gradualmente hacia el surponiente donde alcanza su elevación más baja (aproximadamente 2178 m), esta zona se ubica al sur de la *planta de bombeo Casa Colorada*.

### 5.f.4.5 Distribución espacial de los espesores de los estratos típicos

Considerando que la profundidad de la frontera superior de los estratos típicos se estimaron puntualmente empleando la misma malla de puntos, espaciados a cada 100 m en ambas direcciones X e Y, por diferencia de profundidad se obtuvieron los espesores de cada una de las formaciones típicas del subsuelo.

En la Fig 5.f.73 se presenta el mapa de contornos de isopacas de la Costra Superficial (CS), donde se observa una alta variabilidad del espesor de la CS, no es sencillo realizar una clara interpretación. Posiblemente, esta variabilidad puede asociarse con los rellenos no controlados con materiales producto de dragado y demolición, así como de zanjas y excavaciones locales. En la Fig 5.f.74 se presenta un modelo de superficie del espesor estimado de la CS.

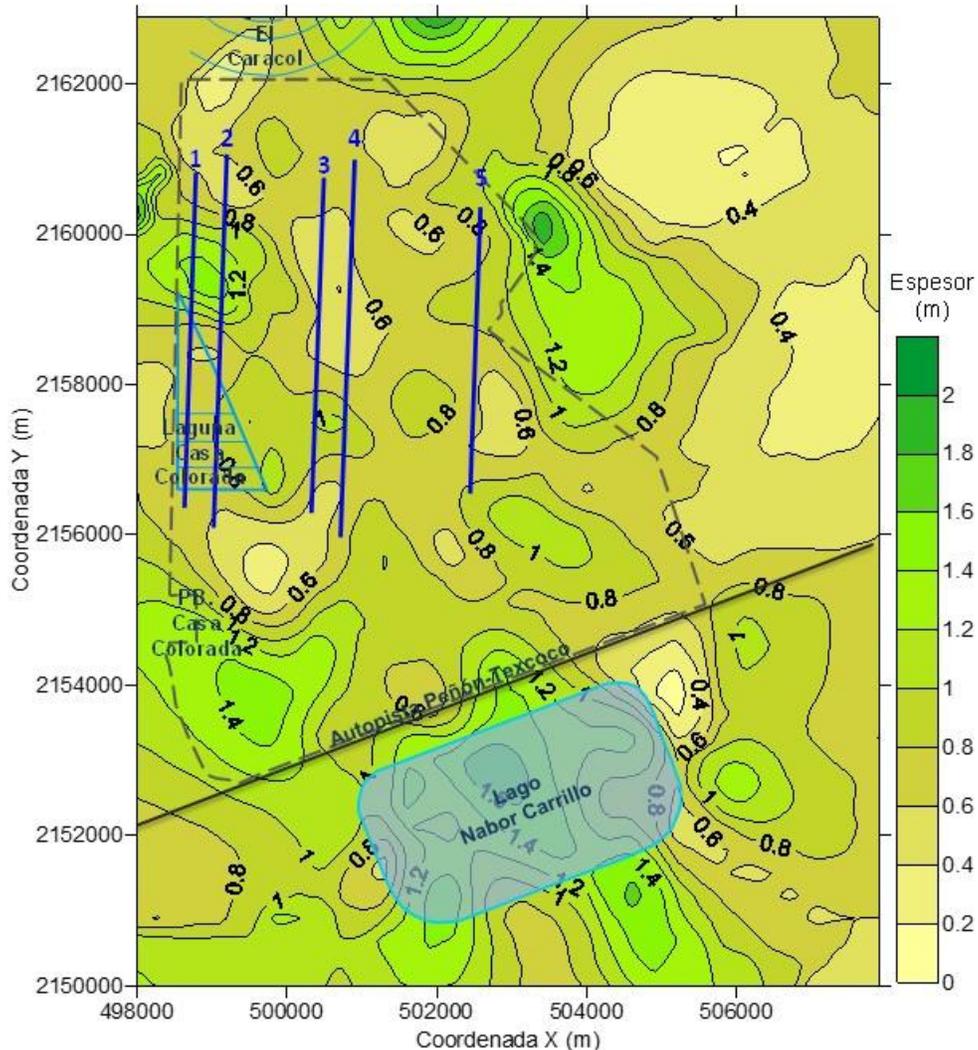


Fig 5.f.73 Mapa de contornos de isopacas de la CS.

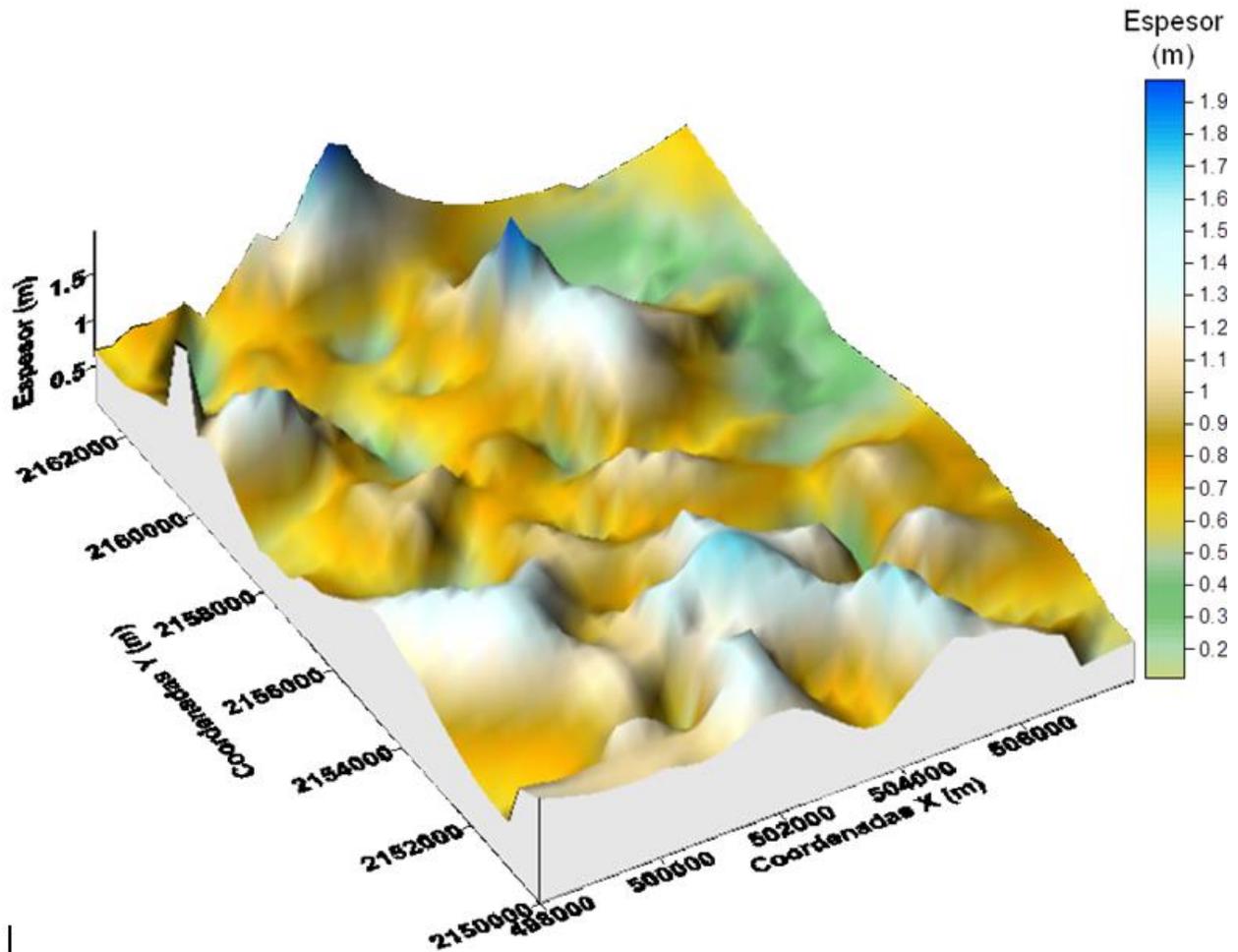


Fig 5.f.74 Superficie del espesor estimado de la CS.

En la Fig 5.f.75 se presenta el mapa de contornos de isopacas de la FAS, donde se observa que el mayor espesor (33 aproximadamente) se encuentra al sur-poniente de la zona estudiada, en la zona donde se localiza la planta de bombeo Casa Colorada. El espesor de esta capa decrece progresivamente hacia el nororiente, alcanzando un espesor aproximado de 18 m en el extremo norte de la pista 5. De acuerdo con el mismo mapa, se observa que las pistas 1 y 2 se ubican en la zona más crítica, puesto que, el espesor de la FAI es mayor, de entre 31 y 19 m. En la Fig 5.f.76 se presenta un modelo de superficie del espesor estimado de la FAS.

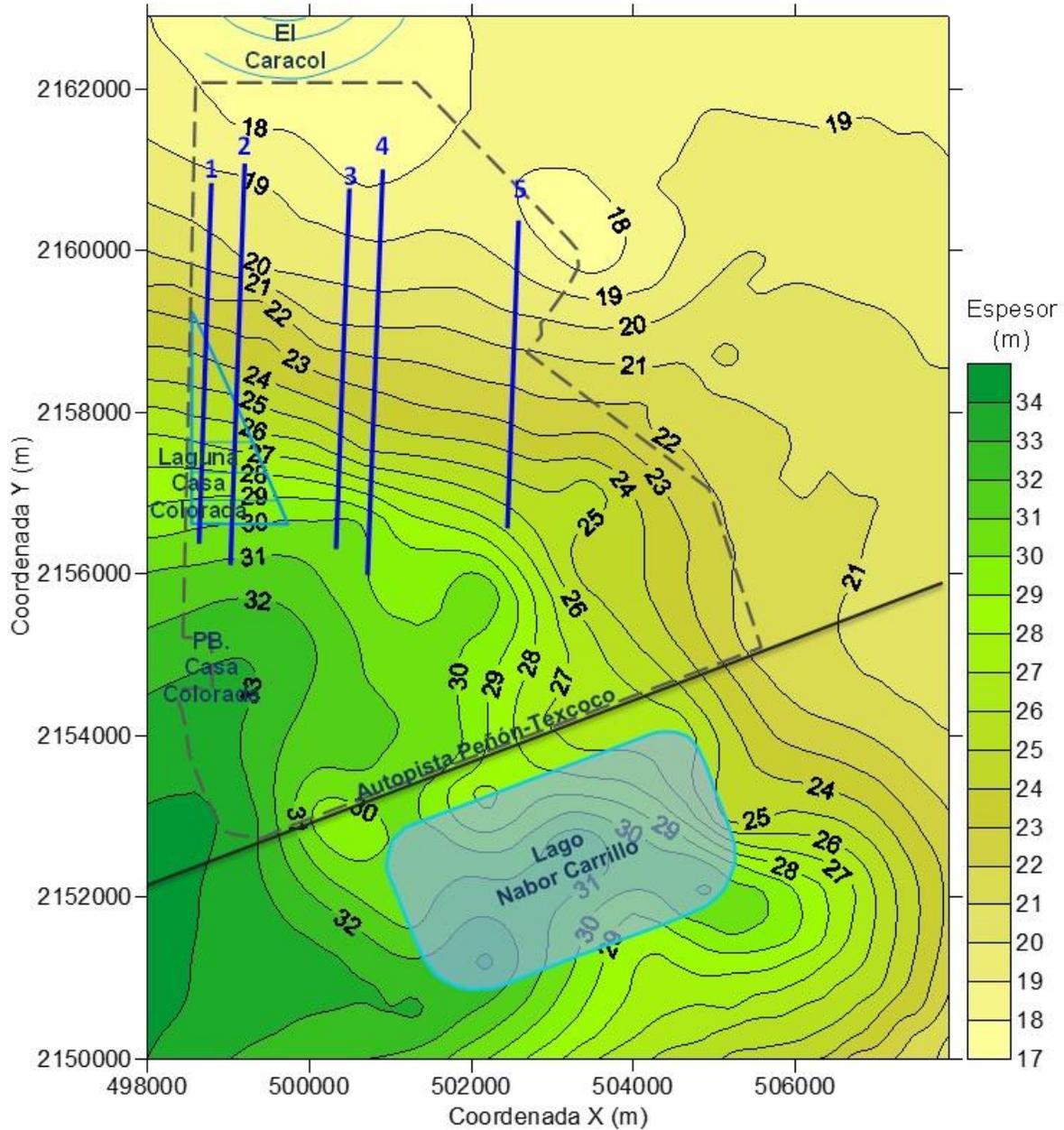


Fig 5.f.75 Mapa de contornos de isopacas de la FAS

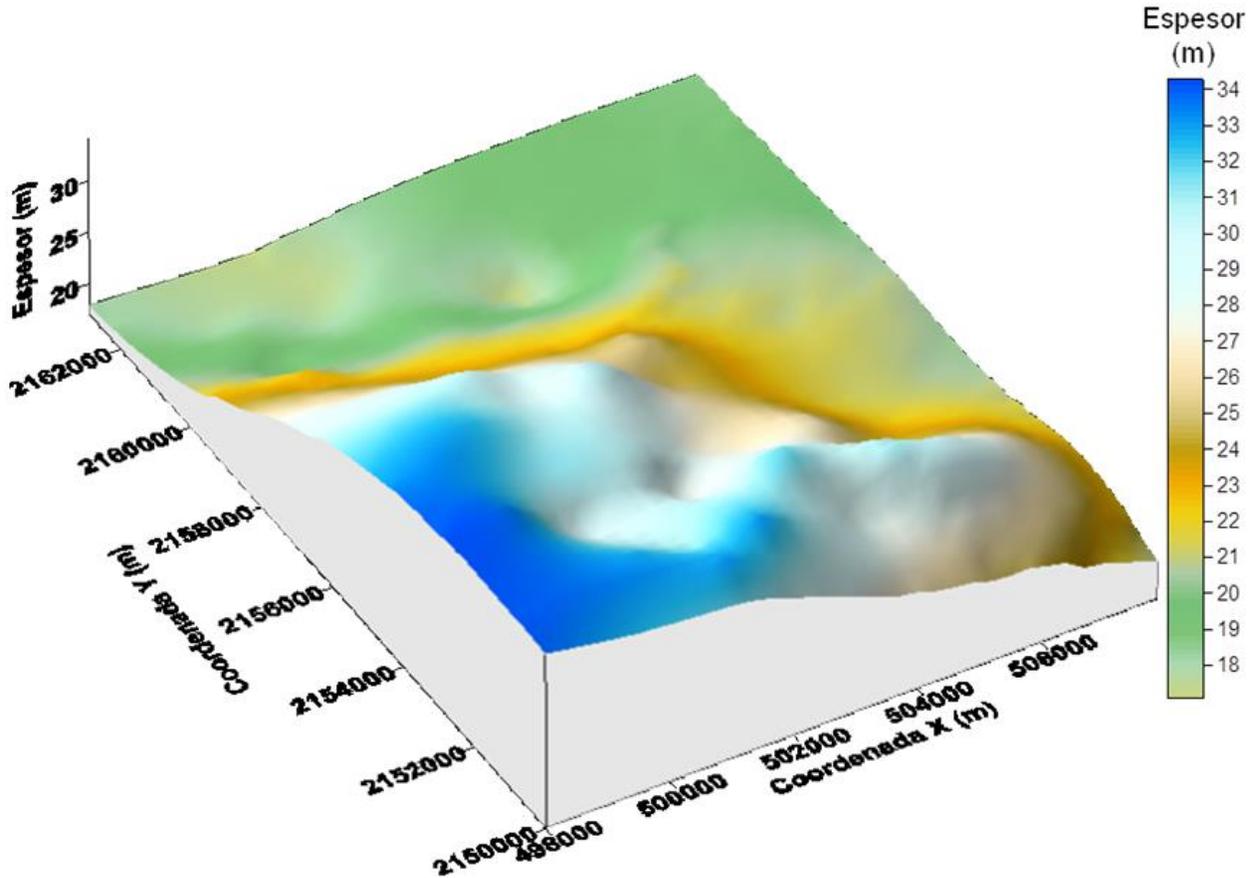


Fig 5.f.76 Superficie del espesor estimado de la FAS.

En la Fig 5.f.77 se presenta el mapa de contornos de isopacas de la CD, donde se observa que el mayor espesor (aproximadamente 4.6 3m) se encuentra en los extremos norte de las pistas 3 y 4. El espesor de esta capa decrece progresivamente hacia el surponiente, alcanzando un espesor aproximado de 0.6 m entre la planta de bombeo Casa Colorada y el Lago Nabor Carrillo. En la Fig 5.f.78 se presenta un modelo de superficie del espesor estimado de la CD.

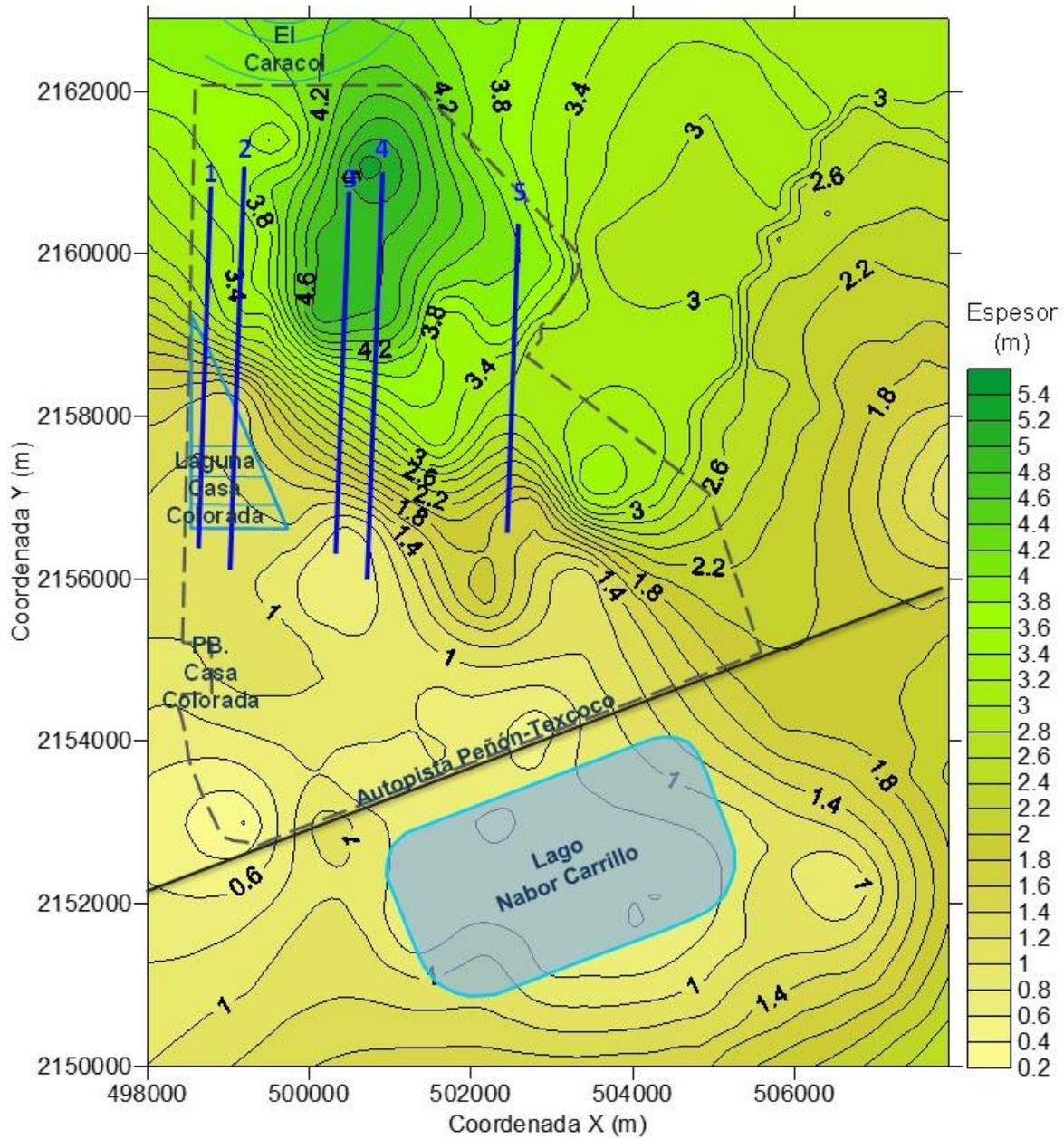


Fig 5.f.77 Mapa de contornos del espesor de la CD.

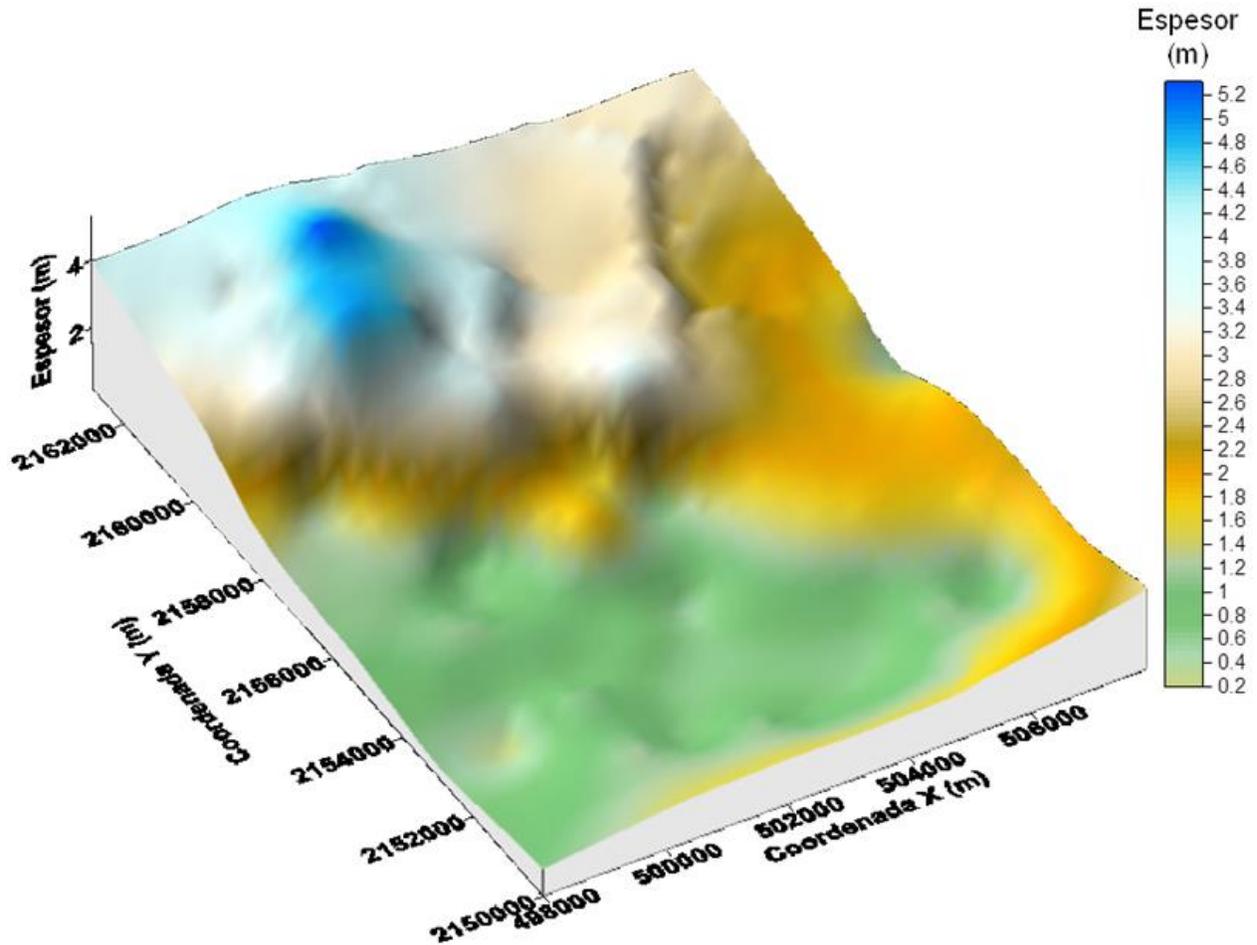


Fig 5.f.78 Superficie del espesor estimado de la CD.

En la Fig 5.f.79 se presenta el mapa de contornos de isopacas de la FAI, donde se observa que el mayor espesor (16 m aproximadamente) se encuentran al lado poniente del Lago Nabor Carrillo. El espesor de esta capa decrece progresivamente hacia el nororiente del área de estudio, alcanzando un espesor aproximado de 8 m. De acuerdo con el mismo mapa, se observa que las pistas 1 y 2 se ubican en la zona donde el espesor de la FAI es mayor, de entre 12.5 a 9.5 m. En la Fig 5.f.80 se presenta un modelo de superficie del espesor estimado de la FAI.

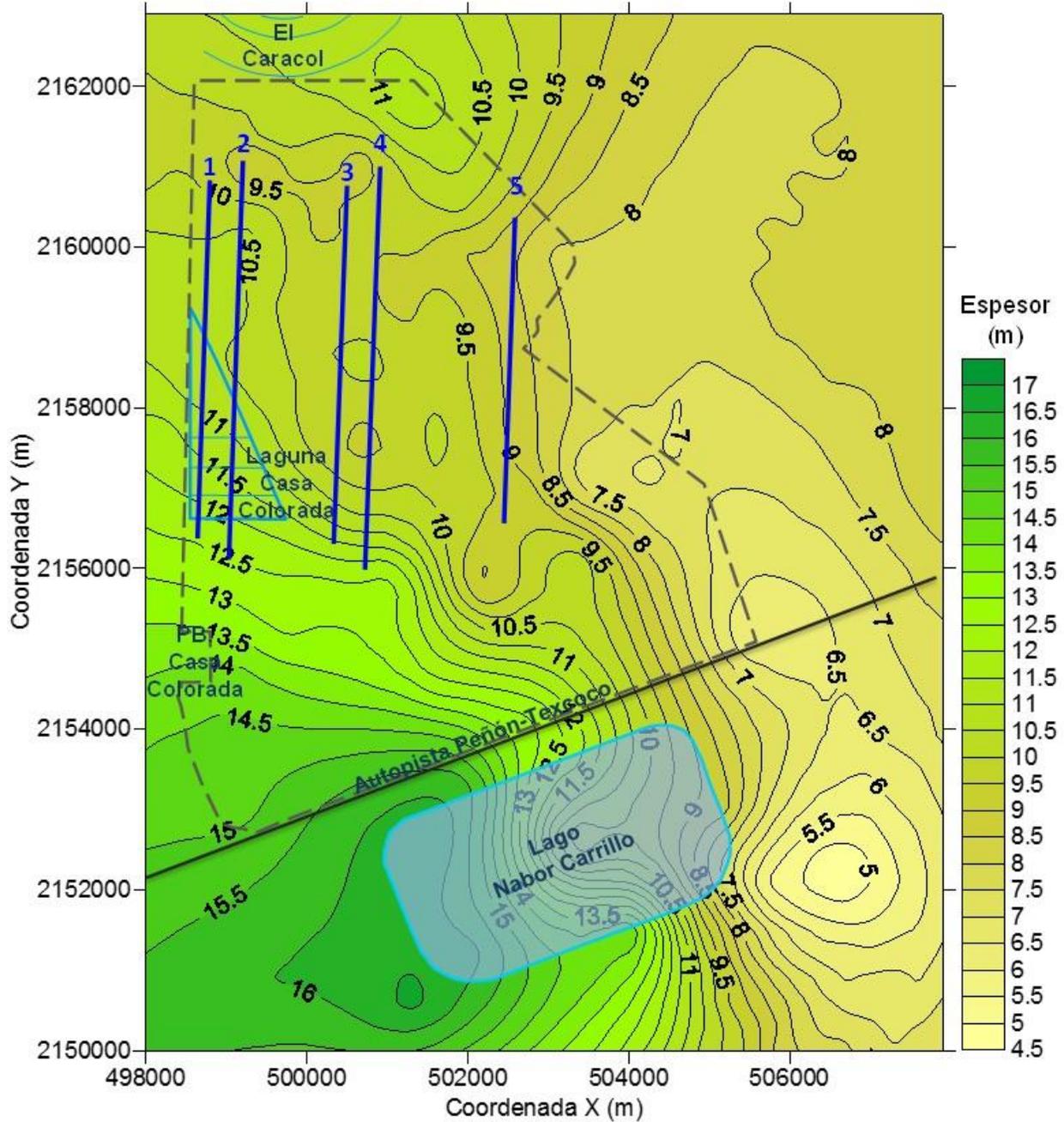


Fig 5.f.79 Mapa de contornos del espesor de la FAI.

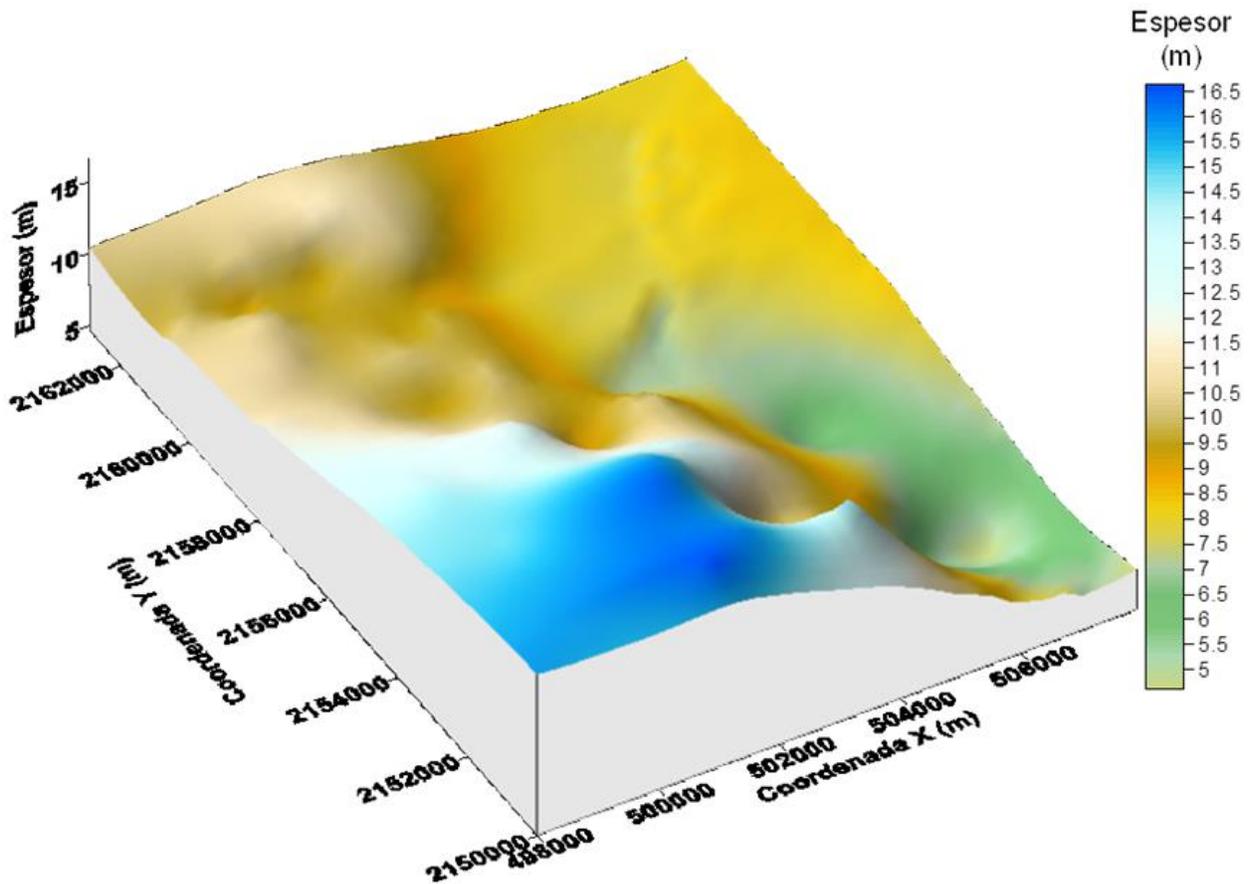


Fig 5.f.80 Superficie del espesor estimado de la FAI.

### 5.f.5. Distribución espacial del nivel de agua freática

Empleando la misma metodología geoestadística, se realizó el análisis de distribución espacial del nivel de agua freática (NAF). Debe tenerse presente que este parámetro no es estable, puesto que, varía de acuerdo con las temporadas de lluvia y estiaje. Los sondeos disponibles para el análisis se realizaron a finales del año 2012 y principios de 2013. El mapa de contornos de la profundidad estimada del NAF se presenta en la Fig 5.f.81, donde se observa una considerable irregularidad. En general, se distingue que el NAF se localiza a escasa profundidad (0.5 aproximadamente) en el extremo sur de las pistas 3 y 4. Hacia el oriente del área de estudio, el NAF se profundiza en forma progresiva.

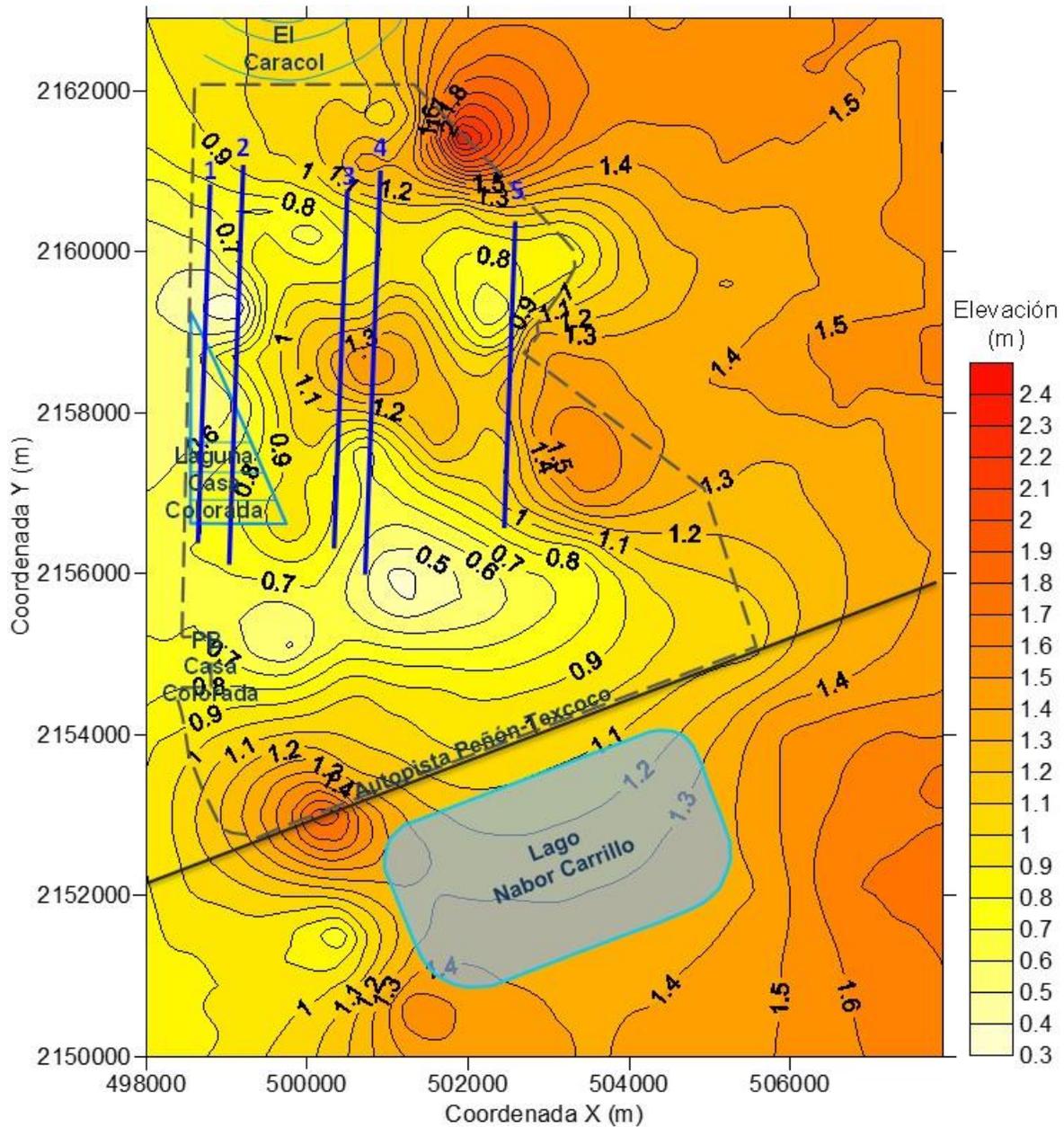


Fig 5.f.81 Mapa de contornos de profundidad estimada del NAF.

Así también, se realizó un análisis de la distribución espacial de la elevación del NAF con el propósito de eliminar las anomalías topográficas existentes (rellenos no controlados y depresiones locales), y así, representar de mejor manera su configuración espacial dentro del área de estudio. El mapa resultante se presenta en la Fig 5.f.82. En la Fig 5.f.83 se presenta un modelo de superficie de la elevación estimada del NAF.

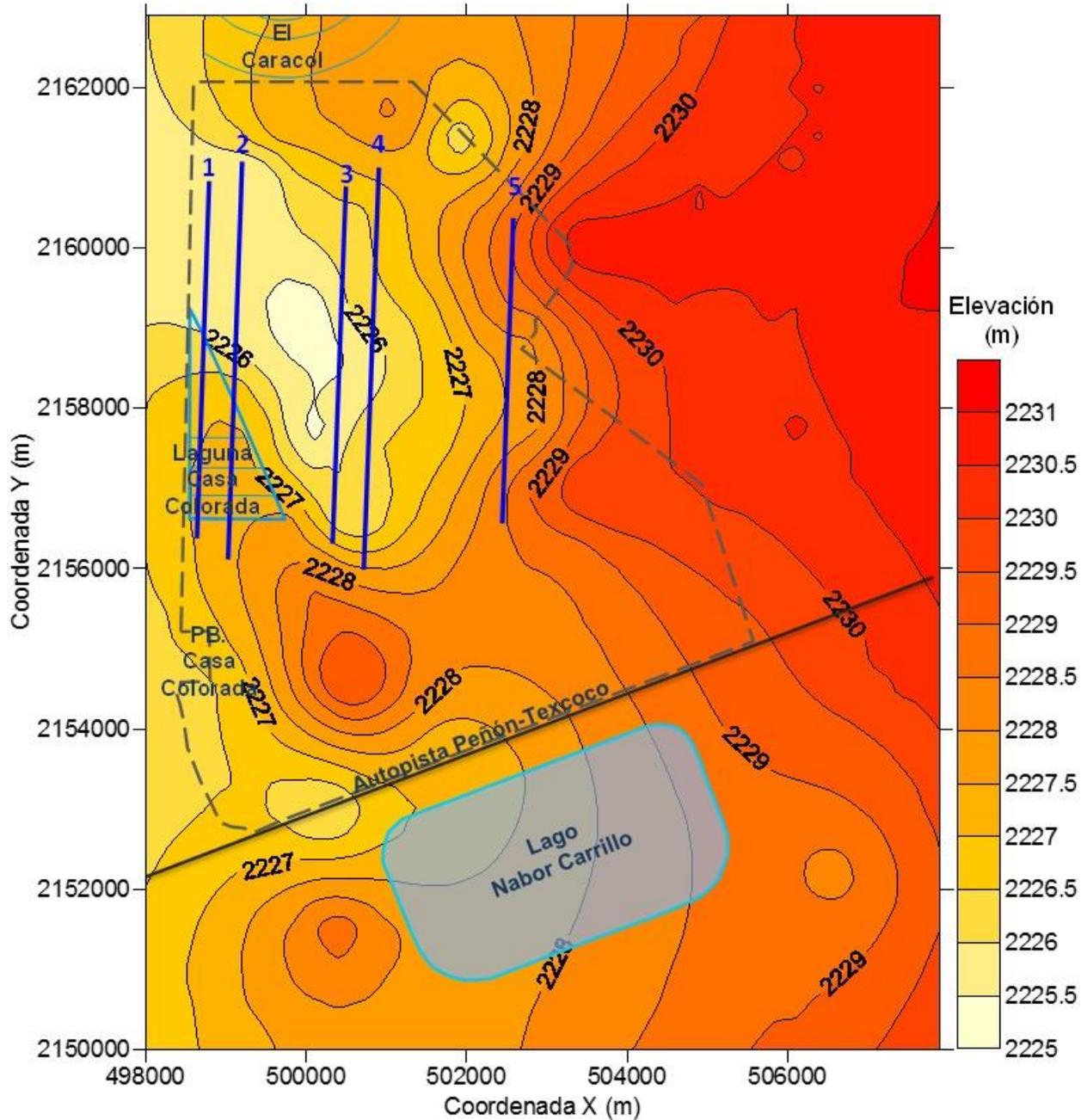


Fig 5.f.82 Mapa de contornos de la elevación estimada del NAF.

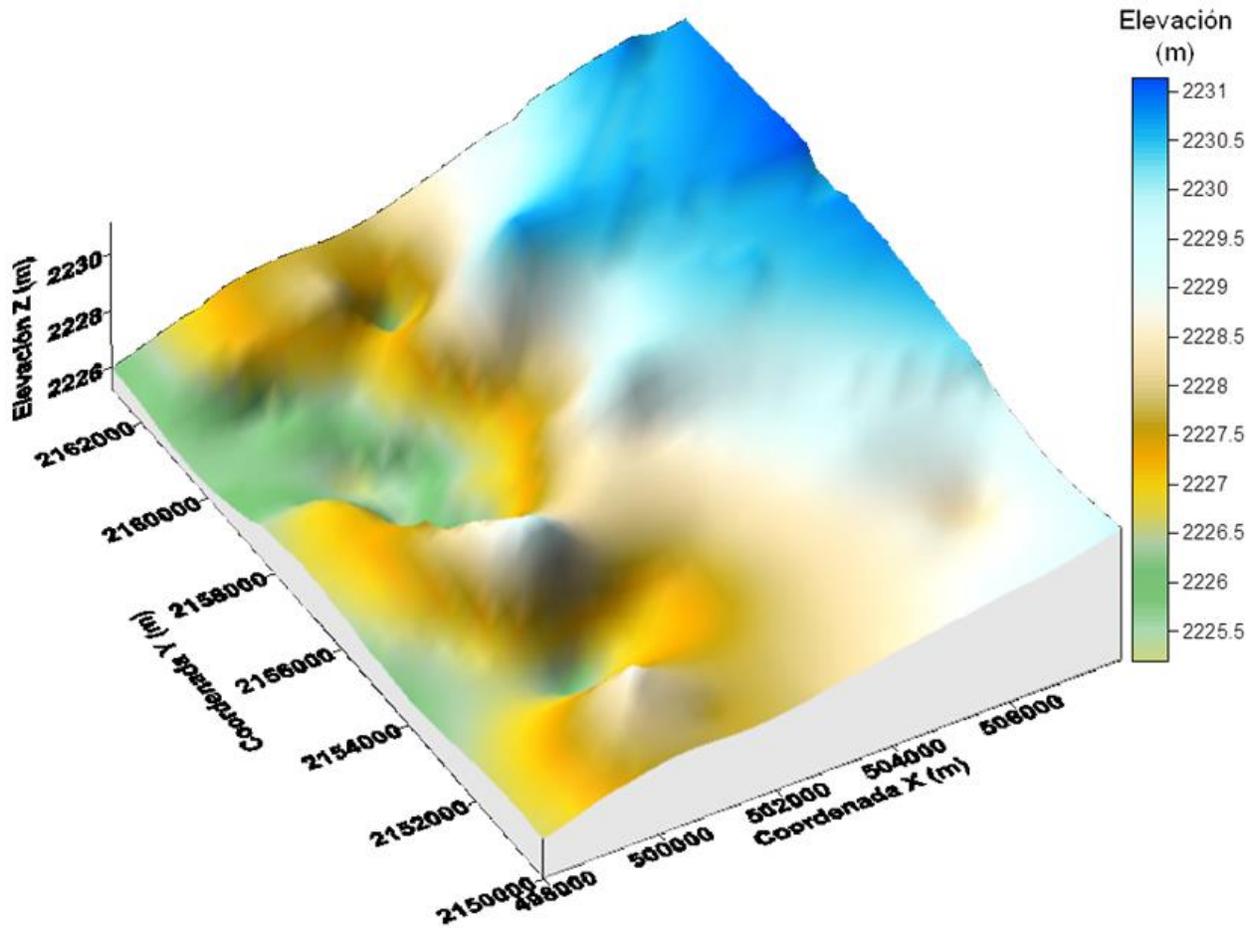


Fig 5.f.83 Superficie de la elevación estimada del NAF.

### 5.f.6 Definición de modelos geotécnicos

Con la ayuda de los sondeos y pruebas de laboratorio efectuadas por la empresa Geotec en el 2013 (Geotec, 2013), se están elaborando modelos geotécnicos de distintas zonas de interés del aeropuerto. Dichos modelos serán de gran utilidad para la realización de estudios y análisis preliminares del comportamiento geotécnico de las distintas estructuras que intervienen en el proyecto. En la Figura 5.f.84 se presenta la ubicación de los sondeos exploratorios respecto a la última versión de la planta de conjunto del desarrollo final del Plan Maestro (ARUP, 2013).

La metodología que se está empleando para la definición de los modelos geotécnicos, es:



- 1) Reunión de toda la información disponible, como: perfiles de sondeos exploratorios, registros de pruebas de laboratorio y mediciones efectuadas en tubos de observación y estaciones piezométricas.
- 2) Análisis e interpretación de todos los registros de laboratorio relacionados con pruebas triaxiales y de consolidación unidimensional. En el Anexo: *Propiedades geotécnicas del subsuelo* se presenta el resumen de las propiedades obtenidas para todos los suelos ensayados. Con respecto a las pruebas triaxiales, se interpretaron tanto pruebas UU (no consolidadas – no drenadas) como CU (consolidadas – no drenadas). Solamente algunas pruebas CU cuentan con medición de la presión de poro durante la segunda etapa del ensaye, por lo que la información respecto a las propiedades de resistencia al corte a largo plazo está muy limitada.

De las pruebas triaxiales se obtuvieron: la profundidad de la muestra, el contenido natural de agua ( $w$ ), la relación de vacíos inicial ( $e_0$ ), el peso volumétrico inicial ( $\gamma$ ), el módulo de elasticidad para el 33% de la deformación ( $E_{33}$ ), el grado de saturación y los parámetros medios de resistencia al corte ( $c$  y  $\phi$ ). De las pruebas de consolidación unidimensional se obtuvieron: la profundidad del ensayo,  $w$ ,  $e_0$ ,  $\gamma$ , el coeficiente de recompresión ( $C_r$ ), el coeficiente de compresión ( $C_c$ ) y la carga de preconsolidación ( $\sigma_p$ ). Dicha carga se está calculando con dos métodos: 1) mediante la intersección de las dos rectas logarítmicas definidas por los coeficientes  $C_r$  y  $C_c$ ; y mediante el método empírico de Casa Grande.

Como se muestra en las gráficas de las Figuras 5.f.85, 5.f.86 y 5.f.87, es posible observar que existe una correlación aceptable entre los valores obtenidos del contenido natural de agua y el peso volumétrico  $\gamma$  y los coeficientes  $C_r$  y  $C_c$ , respectivamente. Dicha correlación puede ser de gran utilidad para definir la compresibilidad media de los materiales en aquellos sitios en los que se cuente con el perfil de contenido de agua de los suelos.

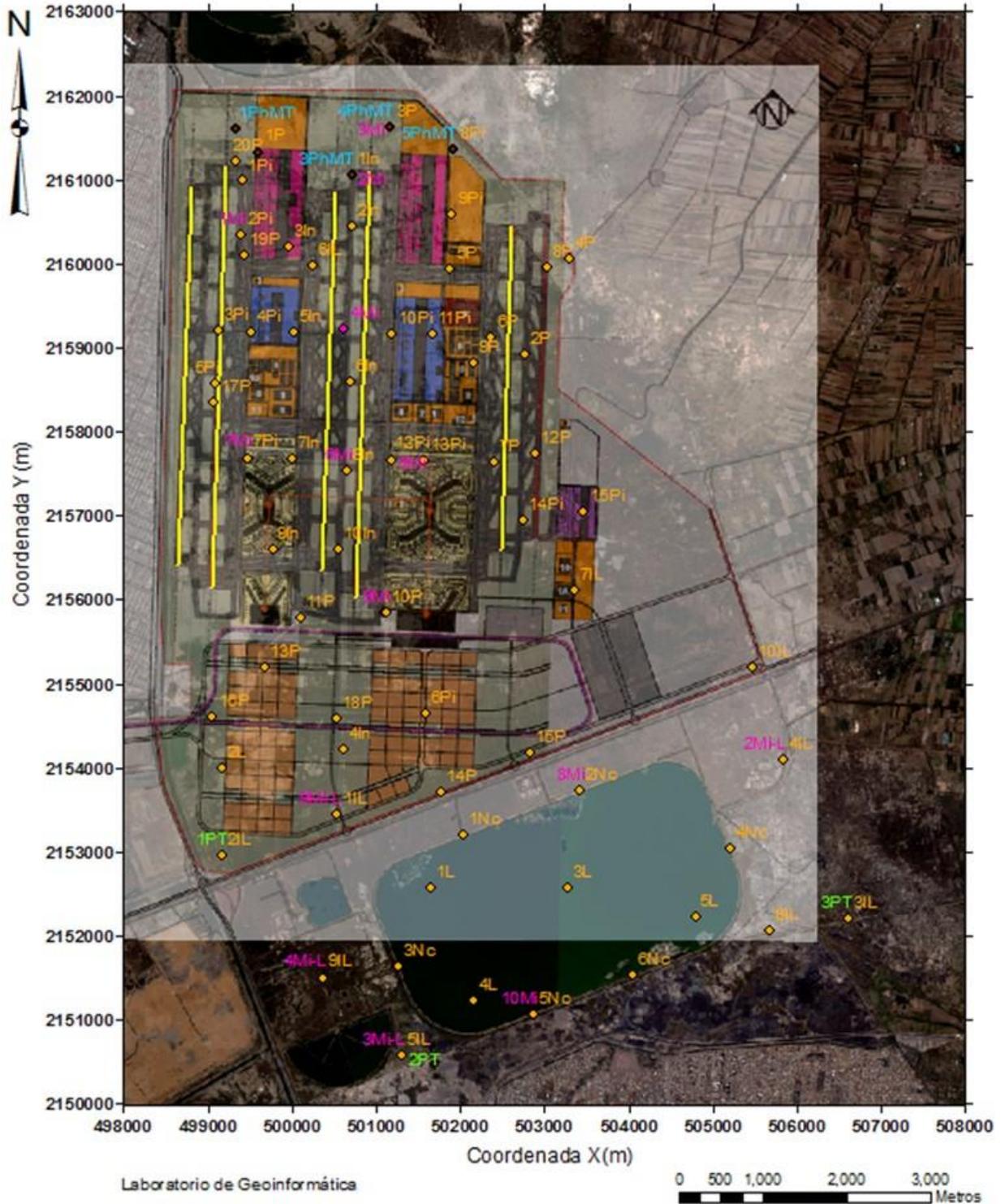


Fig 5.f.84 Ubicación de los sondeos respecto a la planta de conjunto del Plan Maestro (ARUP, 2013)

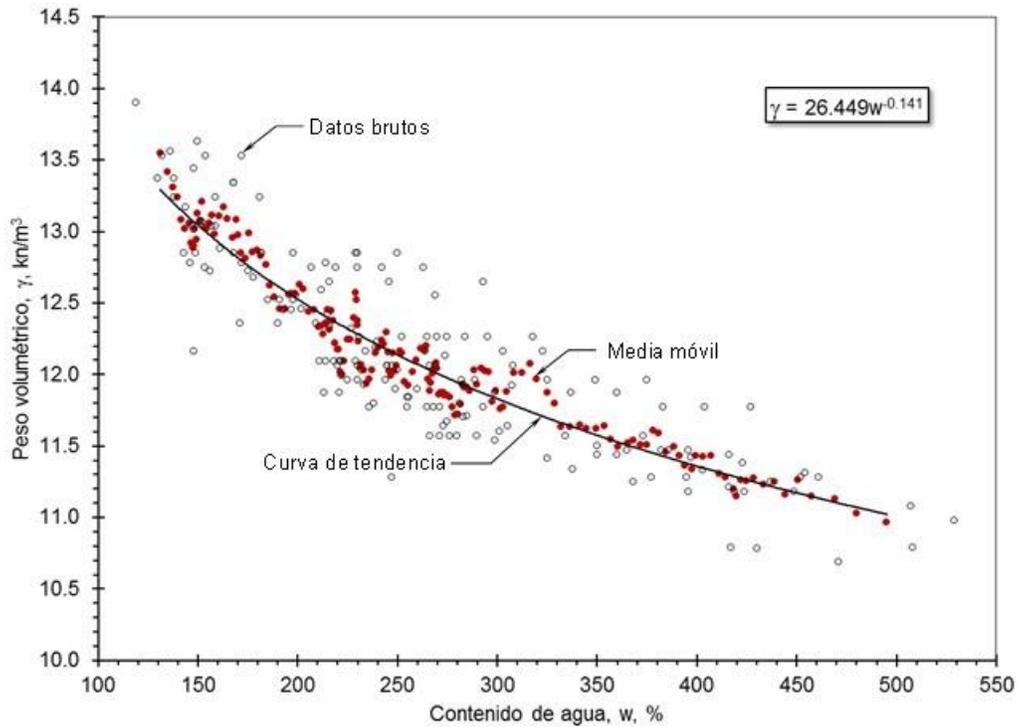


Fig 5.f.85 Variación del peso volumétrico  $\gamma$  con el contenido natural de agua  $w$ .

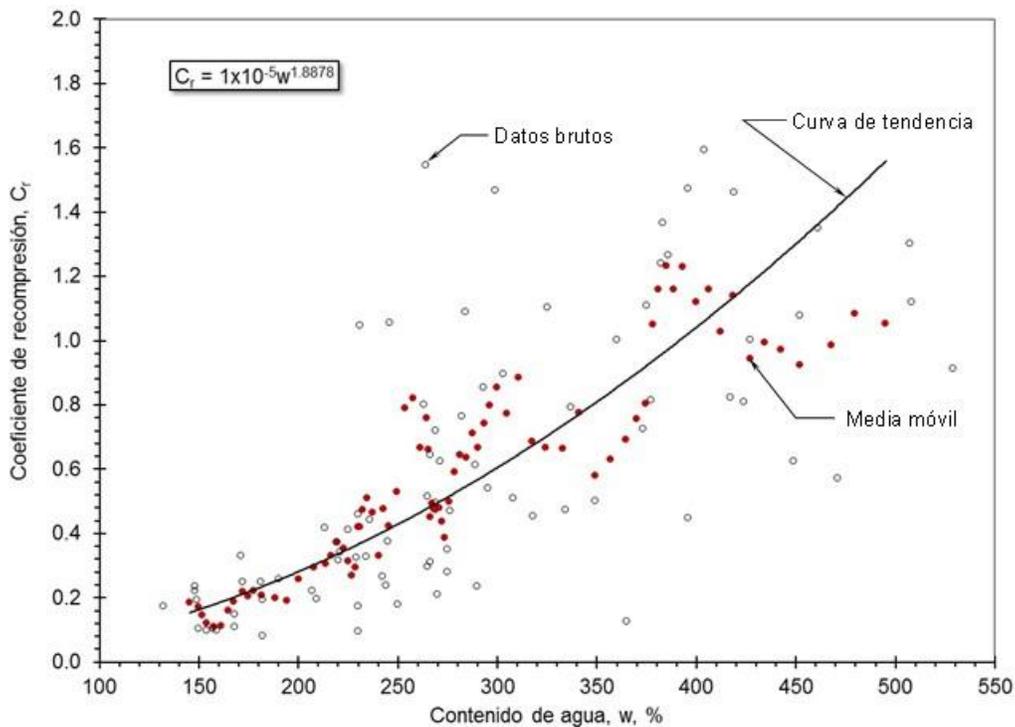


Fig 5.f.86 Variación del coeficiente de recompresión  $C_r$  con el contenido natural de agua  $w$ .

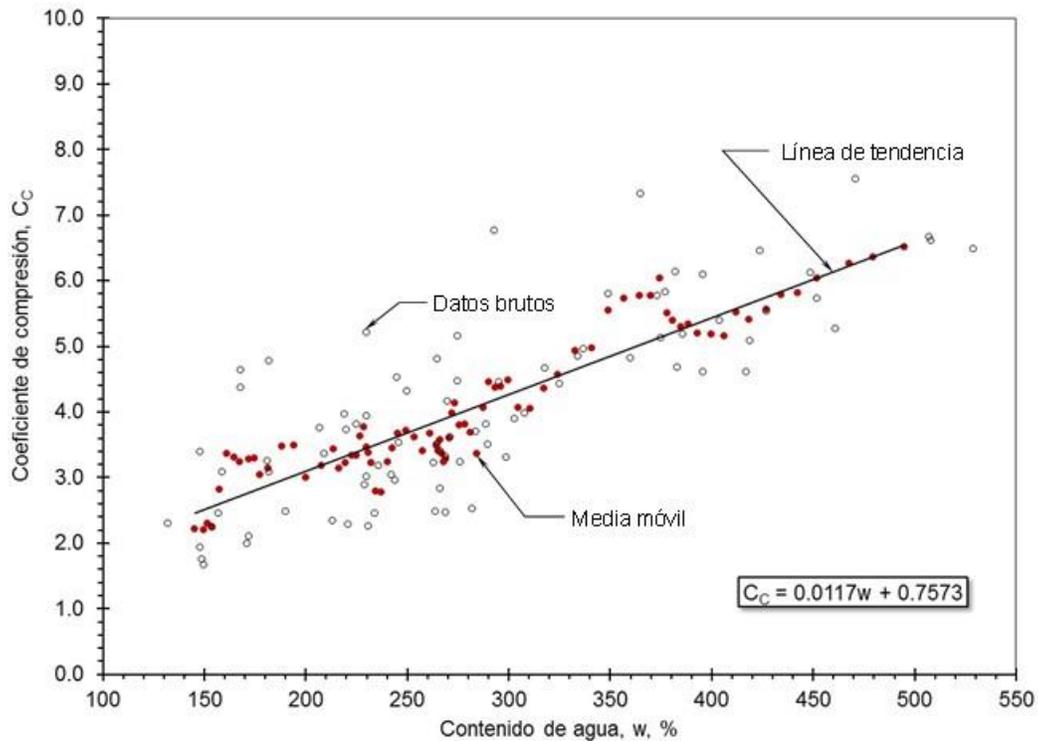


Fig 5.f.87 Variación del coeficiente de compresión  $C_c$  con el contenido natural de agua  $w$ .

- 3) Se definirá la ubicación y la estratigrafía de cada modelo geotécnico, de acuerdo con la planta de conjunto y con la localización de los sondeos exploratorios y de las estaciones piezométricas. El propósito es que estos modelos sean características de las distintas zonas que conformarán al aeropuerto, tales como: pistas y calles de rodaje, plataformas, terminales, edificios auxiliares, etc.
- 4) Con el perfil estratigráfico y con la interpretación de la información de las estaciones piezométricas se obtendrán los perfiles de esfuerzos efectivos y de presión de poro. Los esfuerzos geostáticos se calcularán a partir del producto del espesor de cada estrato por su peso volumétrico efectivo ( $\gamma' = \text{peso volumétrico de la muestra} - \text{peso volumétrico del agua}$ ), empleando el valor de la profundidad del Nivel de Aguas Freáticas (NAF) obtenido a partir de los pozos de observación. El esfuerzo efectivo inicial ( $\sigma'_0$ ) se calculará sumándole al esfuerzo geostático el valor del abatimiento de las presiones intersticiales obtenido de las estaciones piezométricas. Con el valor del  $\sigma'_0$  y del esfuerzo de pre-consolidación ( $\sigma'_p$ , obtenido de las pruebas de consolidación unidimensional) será posible obtener la relación de sobre-consolidación ( $\text{OCR} = \sigma'_0/\sigma'_p$ ) y, por tanto, definir si se tratan de suelos normalmente-consolidados ( $\text{OCR} = 1$ ) o pre-consolidados ( $\text{OCR} > 1$ ).



- 5) Con toda la información anterior se construirá el modelo geotécnico de cada zona de interés, el cual contará con información suficiente para poder efectuar: tanto análisis en términos de los esfuerzos efectivos con parámetros drenados (a largo plazo), como análisis en términos de los esfuerzos totales con parámetros no-drenados (a corto plazo). Se adicionará información adicional respecto a las propiedades de los suelos, como:  $K_0$  = coeficiente de presión de tierras en reposo,  $\sigma_x/\sigma_y$  = relación de esfuerzos totales,  $\nu'$  = relación de Poisson en condiciones drenadas,  $\nu_u$  = relación de Poisson en condiciones no-drenadas y  $k_x$  y  $k_y$  = coeficientes de permeabilidad horizontal y vertical, respectivamente.

### 5.f.7 Conclusiones

Con base en la caracterización estratigráfica presentada en este apartado puede decirse.

En el área del proyecto se encuentran presentes dos formaciones de arcilla de origen lacustre (FAS y la FAI), de baja resistencia y alta compresibilidad. El mayor espesor de estas formaciones se ubica al sur poniente y se reduce gradualmente hacia el norte.

La FAS y la FAI se encuentran separadas por una capa de suelo limo arenoso (CD) de espesor variable, el menor espesor de esta formación se encuentra en la zona suroeste de la zona de estudio y aumenta su espesor hacia el norte.

En general, las condiciones más difíciles del subsuelo se encuentran en el lado poniente del área de estudio, puesto que es donde se encuentra el mayor espesor de arcilla lacustre, en esta zona se ubican las pistas 1 y 2.

En la zona central del área estudiada se encuentran condiciones menos desfavorables del subsuelo, puesto que, el espesor de arcilla lacustre se reduce hacia el oriente.

Al lado oriente del área del proyecto las condiciones del subsuelo son más favorables, puesto que, es la zona donde se encuentra menor espesor de arcilla lacustre.

En el diseño de cimentaciones para las diferentes estructuras del proyecto (pistas, plataformas, calles de rodaje, edificios y obras especiales), se deberá tomar en cuenta las condiciones del subsuelo que prevalecen en el predio, particularmente en el cálculo de asentamientos. Debe preverse que que las estructuras que se desplanten en la zona surponiente del área de estudio serán susceptibles a mayores asentamientos a largo plazo.

Con base en la caracterización geotécnica, se concluye que es necesario realizar una campaña de exploración geotécnica complementaria, particularmente en los sitios



donde se ubicarán las diferentes estructuras que conforman el proyecto. Es conveniente que una empresa con experiencia y mano de obra especializada sea la que realice la exploración complementaria.

Así también, se hace evidente que la baja resistencia y espesor de la FAS y la FAI, serán determinantes en la solución de la cimentación para las diferentes estructuras (pistas, plataformas, calles de rodaje, edificios, torres control, entre otras).

### 5.f.8 Referencias

ARUP, 2013, SAADMCR, Volumen 1 Apéndice B - Planos, Informe de proyecto en archivo electrónico.

GEOTEC, 2013, Estudios de exploración del subsuelo y pruebas de laboratorio en el terreno, para atender la demanda de servicios aeroportuarios en el centro del país. Informe final para ASA, México.

Auvinet, 2002, Uncertainty in Geotechnical Engineering, *XV<sup>th</sup> Nabor Carrillo Lecture*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Mexico.

Krige, D. G., 1962, “*Statistical application in mine valuation*”, J. Institute Mine Survey, South Africa.

Matheron, G., 1965, “*Les variables généralisées et leur estimation*”, Masson et Cie, France.

Méndez, E., Juárez, M., Ovando, E. and Auvinet, G., 1995 “*Sistema de información geográfica para sondeos geotécnicos*”, Proceedings, Xth Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol 1, pp. 312-324, Guadalajara, México.

Juárez, M., Auvinet, G., y Rodríguez, M., 2008, “*Caracterización del Subsuelo del Ex Lago de Texcoco*”, Memorias técnicas, XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Agascalientes, Ags., México.

Gobierno del Distrito Federal a (GDFa), 2004, “*Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*”, Gaceta Oficial del Distrito Federal, 29 de enero del 2004, México, D. F.

Gobierno del Distrito Federal b (GDFb), 2004, “*Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones*”, Gaceta Oficial del Distrito Federal, 6 de Octubre del 2004, México, D. F.

Rodríguez Barrón, M. E., 2010, “*Caracterización geoestadística del subsuelo del ex-lago de Texcoco*”, Tesis de Maestría presentada en la ESIA-UZ, IPN, México.