

01149

46



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

PROGRAMA DE POSGRADO MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERIA

**"ANALISIS GEOESTADISTICO DE LA
ESTRATIGRAFIA DEL SUBSUELO MARINO
EN UN AREA DE LA SONDA DE CAMPECHE"**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN INGENIERIA

(G E O T E C N I A)

P R E S E N T A:

YOLANDA PATRICIA VALDEZ LLAMAS

DIRECTOR DE TESIS:

DR. GABRIEL AUVINET GUICHARD

MEXICO, D. F.

JULIO - 2002

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Con dedicatoria especial para:

*Dios por darme fuerzas para
seguir adelante,*

*Mis padres por sus oportunos
consejos y apoyo moral.*

*Mi único y especial hermano
menor, a quién admiro y del que
tengo mucho más que aprender.*

*Mi tutor por su paciencia y
sabiduría.*

*Todos mis nuevos y viejos amigos
por no olvidarse de mí.*

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a la Dirección General de Estudios de Posgrado (*DGEP*) por el apoyo económico otorgado durante toda la maestría,

Deseo agradecer al Dr. Gabriel Auvinet Guichard, así como a todos los miembros de mi jurado: Dr. Efraín Ovando, Dr. Víctor Taboada, Dr. Raúl Flores Berrones y al M en I Roberto Magaña del Toro, por su tiempo y comentarios aportados a mi tesis.

Agradezco al Instituto Mexicano del Petróleo (*IMP*) por las facilidades prestadas para contar con la información que aquí se analiza, así como el apoyo económico durante el desarrollo de mi tesis. En especial deseo agradecer a mi asesor interno M en C. Jaime Núñez Farfán y el Ing. Diego Cruz por todo el apoyo desinteresado para llevar a buen término mi tesis.

Por último agradezco al Ing. Luis Flores la revisión ortográfica y al M en I. Ismael Basilio por la edición, así como todo el apoyo que me brindaron en los momentos más adecuados, especialmente a la maestra Artemisa Pedroza, Ing. Sergio Herrera, Dra Sonia E. Ruiz, Dra Martha Suárez, M en I Fernando Lázares, M en I Rocío Villa y Ángel Hurtado. ¡mil gracias! –.

**ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LA ESTRATIGRAFÍA DEL
SUBSUELO MARINO EN UN ÁREA DE LA SONDA DE CAMPECHE**
(DATOS PROPORCIONADOS POR IMP)

Resumen

Ing. Yolanda Patricia Valdez Llamas

En este proyecto se analizan 89 sondeos geotécnicos convencionales localizados en la Sonda de Campeche, por medio de la geoestadística, la cual consiste en aplicar a una variable aleatoria las técnicas estadísticas y los conceptos de la probabilidad. Las variables analizadas son: el contenido de agua, la resistencia al corte (medida con datos de veleta miniatura y el torcómetro); y la variabilidad espacial geométrica del espesor del estrato blando caracterizada como una arcilla calcárea blanda a muy blanda, que corresponde a los sedimentos en la superficie del lecho marino. A estas variables se le aplicaron las técnicas de estadística descriptiva, análisis estructural y los métodos de estimación y simulación para generar los modelos que permitan obtener sondeos y cortes virtuales estimados y simulados para caracterizar la estratigrafía del subsuelo marino hasta 100 m de profundidad.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

NOMENCLATURA

$V(X)$	campo aleatorio
R^p	Dimensión del campo aleatorio
$P(x)$	Probabilidad del campo aleatorio asociada a los intervalos de una variable.
$\mu_v(x)$	Esperanza del campo aleatorio
$\sigma^2_v(x)$	Varianza del campo aleatorio
$\sigma^2_v(x)$	Desviación del campo aleatorio
$CV(x)$	Coefficiente de variación
$R_V(X_1, X_2)$	Función de autocorrelación
$C_V(X_1, X_2)$	Función de autocovarianza
$\rho(X_1, X_2)$	Coefficiente de correlación
$f_V(x)$	Densidad de probabilidad
h	Distancia vectorial de separación entre los puntos (x_1, x_2)
u	Vector unitario en la dirección considerada en el que se evalúa la autocovarianza
Ω	Dominio de un campo aleatorio (longitud, área o volumen)
v	Vector de dimensión, p de las variables k ,
λ	Coefficiente de peso de estimación en estimaciones de kriging ordinario.

ÍNDICE

ÍNDICE	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Antecedentes	2
1.2. Objetivos	3
1.3. Alcance	3
1.4. Método	3
1.5. Posibles aplicaciones	4
2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	6
2.1. Variables aleatorias	6
2.2. Campos aleatorios	7
2.2.2. Estimación estadística de los parámetros de un campo aleatorio	9
2.2.3. Efecto de escala	10
2.2.4. Estimación condicional	12
2.2.5. Kriging	15
2.2.6. Campos gaussianos	17
2.2.7. Simulación de campos aleatorios	18
2.2.7.1. Técnica general	18
2.2.7.2. Simulación incondicional	19
2.2.7.3. Simulación condicional	20
2.3. Algoritmos utilizados	21
3. APLICACIÓN AL SUBSUELO MARINO	20
3.1. Información disponible	20
3.1.1. Posición geográfica	21
3.1.2. Exploración de la Sonda de Campeche	21
3.1.3. Información geotécnica de la Sonda de Campeche	30
3.1.4. Selección de variables	39
3.2. Análisis estructural	42
3.2.1. Variabilidad espacial geométrica del espesor del estrato superficial	42
3.2.2. Contenido de agua	50
3.2.3. Resistencia al corte	94
3.3. Comparación de las técnicas de estimación	101
3.4. Implicaciones geotécnicas	106
3.4.1. Diseño de plataformas marinas en la Sonda de Campeche	106
3.4.2. Análisis de los parámetros de diseño	107
3.4.3. Aplicación de la geoestadística al diseño de cimentaciones de plataformas marinas	107
4. CONCLUSIONES	110
REFERENCIAS	113
BIBLIOGRAFÍA	115

1. INTRODUCCIÓN

Los antecedentes indican que es común que se generen riesgos y costos adicionales en los proyectos de ingeniería civil por la inadecuada interpretación de las condiciones del subsuelo en el sitio. Resulta por tanto importante que la información disponible sea aprovechada óptimamente. La geoestadística se presenta como una alternativa novedosa consistente en un método cuantitativo para la interpretación geotécnica de la estratigrafía del subsuelo marino.

Con base en una extensa campaña de exploración geotécnica y utilizando los sondeos convencionales, es factible evaluar las correlaciones espaciales de las variables geotécnicas relevantes en la región de estudio. A partir de esta información, es posible llegar a la mejor estimación posible de estas variables en las zonas donde no se tienen datos conocidos, además de cuantificar la incertidumbre residual asociada a esta estimación. La geoestadística permite, por otra parte, definir en forma racional los parámetros geotécnicos del subsuelo marino que deben utilizarse, por ejemplo, en el diseño de la cimentación de plataformas.

1.1. Antecedentes

A principios de los años sesenta, el matemático francés G. Matheron (1962) utilizó la estadística y la probabilidad como herramientas auxiliares en la descripción de la variación espacial de propiedades “regionalizadas” es decir, definidas en un cierto dominio y lo aplicó a la exploración minera. Así nació el concepto de la “geoestadística”. Atendiendo a este planteamiento, posteriores investigadores como, Vanmarcke, (1977), Journel, (1978), Deutsch, (1992), Auvinet, (1994) contribuyen a la definición de un concepto más general y amplio. En la actualidad, la geoestadística se define como la aplicación del formalismo matemático de las funciones aleatorias a las ciencias de la tierra.

La vasta extensión superficial de los suelos marinos complica la preparación y clasificación de la gran cantidad de datos extraídos de varios estudios, como son: geotécnicos (estáticos y dinámicos), geofísicos, geológicos y batimétricos (sólo por mencionar los de interés para los fines de esta investigación). Así, para optimizar el aprovechamiento de la información recabada en las campañas de exploración, el Instituto Mexicano del Petróleo, IMP, ha implantado la aplicación de las técnicas geoestadísticas. En la Subcompetencia Geotécnica, estas técnicas son relativamente nuevas, pero no así en el Departamento de Sismología de Exploración, donde se usa esta teoría para modelar yacimientos naturalmente fracturados, a través de programas comerciales (*el más importante llamado Isatis*¹).

¹ ISATIS Software, desarrollado por el Centre de Géostatistique de l'Ecole de Mines de Paris y Géovariances en Fontainebleau (Francia)

Lo expuesto anteriormente, así como los problemas e incertidumbres a resolver en una parte específica del Golfo del México, constituyen algunas de las razones por las cuales se propone esta investigación de las condiciones del subsuelo marino en el marco de la geoestadística.

1.2. Objetivos

Los objetivos generales se plantean en los incisos siguientes:

- a) **Estudiar los resultados de algunos ensayos de campo y de laboratorio efectuados en los suelos marinos que conforman un área de la Sonda de Campeche, considerando los 89 estudios geotécnicos existentes y las exploraciones realizadas, para seleccionar las variables geométricas, físicas y mecánicas que mejor representen las condiciones del subsuelo,**
- b) **Preparar una base de datos para la aplicación de las técnicas geoestadísticas a las variables seleccionadas,**
- c) **Generar mapas, sondeos y cortes virtuales, estimados, de las variables seleccionadas y evaluar la incertidumbre asociada a cada estimación,**
- d) **Interpretar la información generada por el modelo geoestadístico propuesto para sentar las bases de una caracterización del área de estudio,**

1.3. Alcance

El alcance de esta tesis comprende el análisis geoestadístico de la variabilidad espacial del espesor del estrato blando superficial, así como de la variabilidad del contenido de agua hasta una profundidad de 100 m y un análisis estadístico inferencial de la resistencia al esfuerzo cortante (obtenida utilizando la prueba del torcómetro y la de veleta miniatura). Asimismo se analizan en forma preliminar las implicaciones ingenieriles de los resultados obtenidos en el análisis y diseño geotécnico de las estructuras petroleras localizadas en los suelos marinos de la zona de interés.

1.4. Método

El tratamiento inicial consiste en aplicar la estadística descriptiva a cada variable: el contenido de agua, la resistencia al corte determinada con el torcómetro y con la veleta miniatura; se agrupan los datos de los diversos sondeos y también se analizan de forma individual. Como base para la aplicación de esta técnica, este estudio se enfoca a delimitar y analizar todas las características del estrato blando, que se asocia a una secuencia de

sedimentos marinos depositados en las primeras decenas de metros del subsuelo, presumiblemente posterior a cualquier evento orogénico que haya afectado la zona y, específicamente, la geología superficial presente en el área de estudio.

El procesamiento de los datos a los cuales se aplican las técnicas geoestadísticas utiliza los programas Microsoft Excel (como hoja electrónica) y Microsoft Access para crear una base de datos cómoda y accesible, así como el programa SAAG (Sistema de Apoyo para el Análisis Geoestadístico) desarrollado en el Instituto de Ingeniería, UNAM (Dávalos et al, 2001) para realizar estimaciones y simulaciones de sondeos y cortes virtuales.

La técnica de estimación condicional lineal multivariable (kriging simple) se utiliza para encontrar los valores desconocidos en los sondeos reales (perfiles verticales) utilizados. Para la simulación de sondeos y cortes virtuales se aplica el método de Monte Carlo por medio de la generación de números aleatorios, el cual está definido y condicionado al modelo probabilista de tipo *gaussiano* encontrado en el campo aleatorio analizado. En el caso de la variabilidad geométrica del estrato blando (lecho marino) se utiliza el método del kriging ordinario. El programa GSLIB² (Deutsch, 1992) es la herramienta para calcular las distancias de influencia y la variación espacial del estrato blando, así como las estimaciones y simulaciones.

Por último, apuntes más detallados sobre la metodología utilizada, se comentan directamente en los párrafos donde se desarrolla el procesamiento y análisis de los datos.

1.5. Posibles aplicaciones

Las aplicaciones actuales a la ingeniería, resultan muy variadas; sin embargo, un estudio posterior al aquí realizado incluye la ubicación y el diseño de la cimentación profunda de plataformas marinas utilizando la técnica de cokriging (una técnica muy útil donde dos variables aleatorias se relacionan espacialmente entre sí, usando la variable mayormente muestreada "*variable secundaria*" (como el contenido de agua) para estimar los parámetros de otra "*variable principal*" (como la resistencia al corte), medida con menor detalle y en menor cantidad. La geoestadística puede utilizarse para obtener la resistencia al corte de los estratos en contacto con el fuste del pilote, en profundidades donde no se cuenta con muestras. Este tópico está excluido del alcance de este estudio, pero se propone como tema doctoral y para futuras investigaciones.

Otra aplicación de la geoestadística consiste en que las técnicas aquí desarrolladas sirven de base para un estudio doctoral en proceso, donde se opta por analizar una zona de emanación de hidrocarburos, que llegan al ambiente marino a través de fisuras del estrato blando. Se considera que los hidrocarburos provienen desde el yacimiento petrolero, ascendiendo a través de una falla geológica hasta alojarse en un estrato arenoso confinado por el estrato arcilloso superficial.

² GSLIB, Geostatistical Software Library, desarrollado en la Universidad de Stanford, USA.

Por último, este trabajo se presenta como una técnica complementaria del método de interpretación convencional para las condiciones estratigráficas del subsuelo obteniéndose contribuciones interesantes en cuanto al área de exploración geotécnica, las cuales indican que la geoestadística es una herramienta muy útil para el modelado de la variabilidad espacial de parámetros geotécnicos, aplicado al subsuelo marino.

2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

Las características de los suelos presentan variaciones espaciales que constituyen una fuente importante de incertidumbre para la realización de los análisis o diseños geotécnicos. Esta incertidumbre puede modelarse recurriendo a variables aleatorias o a campos aleatorios.

2.1. Variables aleatorias

2.1.1. Definición

Una variable aleatoria es una función de los resultados, ε , obtenidos al realizar un experimento aleatorio E . Una función, $V(\varepsilon)$, asocia los resultados del experimento E a los elementos del conjunto de los enteros (variables aleatorias discretas), o al de los reales (variables aleatorias discretas o continuas), o bien, al de los complejos (variables aleatorias complejas). En el caso de los resultados obtenidos en una campaña de exploración geotécnica, el dominio de la variable aleatoria es generalmente el de los números reales, o subconjuntos del mismo, por lo que se utilizan variables aleatorias continuas.

Las probabilidades P , asociadas a los intervalos en los que se define una variable aleatoria V pueden modelarse a través de una densidad de probabilidad, $f_V(x)$, tal que (Auvinet, 1975):

$$\text{a) } f_V(x) \geq 0 \text{ para toda } x \quad (2.1)$$

$$\text{b) } \int_{-\infty}^{\infty} f_V(x) \, dx = 1 \quad (2.2)$$

$$\text{c) } P[a \leq V \leq b] = \int_a^b f(x) \cdot dx \quad (2.3)$$

Es posible representar las variaciones espaciales de una característica particular del suelo mediante una variable aleatoria. Esta técnica se emplea comúnmente por ejemplo en la interpretación de resultados de pruebas de compactación para fines de control de construcción de obras de tierra. Los histogramas formados con los resultados de pruebas de control pueden idealizarse mediante algún modelo de la teoría de la probabilidad. El modelo describe entonces la tendencia central y la dispersión de los valores medidos. Esta forma de proceder tiene sin embargo graves limitaciones puesto que reúne en una misma población resultados asociados a puntos con una localización indefinida y no le da

importancia a la correlación espacial que existe entre puntos vecinos. Un planteamiento más satisfactorio consiste en recurrir a campos aleatorios.

2.2. Campos aleatorios

2.2.1. Definición

Sea, $V(X)$, una variable geotécnica de interés de tipo físico (i.e., contenido de agua), mecánico (i.e. resistencia al corte no-drenada) o geométrico (i.e., espesor de algún estrato) definida en los puntos, X , del dominio estudiado, R^p ($p = 1, 2, \text{ ó } 3$). En cada punto del dominio, esta variable puede considerarse como aleatoria debido al desconocimiento que se tiene de su valor. El conjunto de estas variables aleatorias constituye un *campo aleatorio*.

Para describir este campo pueden emplearse diversos parámetros y funciones.

-Esperanza y varianza, respectivamente:

$$\mu_{V(X)} = E\{V(X)\} \quad (2.4)$$

$$\sigma_{V(X)}^2 = \text{var}[V(X)] \quad (2.5)$$

A la raíz cuadrada, de la varianza $\sigma_{V(X)}$, se le suele llamar *desviación estándar* y el cociente, $CV(X) = \sigma_{V(X)} / E\{V(X)\}$ se conoce como *coeficiente de variación*.

- Función de autocorrelación, definida sobre, $R^p \times R^p$:

$$R_V(X_1, X_2) = E\{V(X_1)V(X_2)\} \quad (2.6)$$

Esta función es un momento de segundo orden mixto que puede centrarse introduciendo el concepto de función de autocovarianza:

- Función de autocovarianza:

$$C_V(X_1, X_2) = \text{Cov}[V(X_1), V(X_2)] = E\{[V(X_1) - \mu_V(X_1)] [V(X_2) - \mu_V(X_2)]\} \quad (2.7)$$

La autocovarianza representa el grado de dependencia lineal entre los valores de la propiedad de interés en dos puntos diferentes del medio. Se puede escribir bajo la forma de un *coeficiente de autocorrelación* adimensional, cuyo valor queda siempre comprendido entre -1 y +1:

- Coeficiente de correlación:

$$\rho_V(X_1, X_2) = \frac{C_V(X_1, X_2)}{\sigma_{V(X_1)} \sigma_{V(X_2)}} \quad (2.8)$$

Conviene subrayar que las funciones de correlación anteriores no son propiedades intrínsecas de los dos puntos, X_1 y X_2 , ya que dependen también de la población, es decir del dominio en el que el campo se encuentra definido. Así, para dos “puntos” pertenecientes a una mismo estrato puede existir una alta correlación entre las propiedades respectivas si se considera globalmente una formación de gran espesor; sin embargo, esta correlación puede desvanecerse si el estudio se enfoca a la variación espacial dentro del estrato.

- Funciones de distribución de probabilidad:

$$F_{V_1, \dots, V_n}(v_1, \dots, v_n; X_1, \dots, X_n) = P[V(X_1) \leq v_1, \dots, V(X_n) \leq v_n] \quad (2.9)$$

y, en particular, la función de distribución de primer orden:

$$F_V(v; X) = P[V(X) \leq v] \quad (2.10)$$

o sus derivadas, las densidades de probabilidad:

$$f_{V_1, \dots, V_n}(v_1, \dots, v_n; X_1, \dots, X_n) \text{ y } f_V(v; X) \quad (2.11)$$

Si estas funciones (y los momentos asociados) son invariantes por traslación en el espacio para cualquier valor de, n , y cualquier conjunto de puntos, X_1, \dots, X_n , se dice que el campo aleatorio es *estrictamente estacionario*.

Si la esperanza, la varianza y los demás parámetros son constantes en el medio, se dice que éste es *estadísticamente homogéneo*. Si la esperanza y la varianza del campo no son constantes, se dice que presentan cierta *tendencia*, o *deriva*.

Cuando es posible aceptar la hipótesis de que el valor esperado de la variable de interés es constante en todo el dominio (eventualmente después de haber removido la tendencia) y que la autocovarianza espacial para una misma propiedad depende solamente de la distancia entre los puntos, X_1 y X_2 , se dice que el campo es *estacionario en el sentido amplio*, y se cumple:

$$C_V(X_1, X_2) = C_V(|X_2 - X_1|) = C_V(h) \quad (2.12)$$

donde h es un escalar igual a la distancia entre los puntos, X_1 y X_2 .

La ecuación 2.12 implica que la varianza de, $V(X)$, es también constante en todo el dominio.

En la misma forma, en este caso, el coeficiente de correlación puede ser escrito como:

$$\rho_V(X_1, X_2) = \rho_V(h) \quad (2.13)$$

En muchas aplicaciones, sin embargo, será más realista admitir que la relación anterior solamente es válida a lo largo de una dirección determinada, es decir, que la estructura de correlación del medio es *anisótropa*. En este caso, se usarán las notaciones, $C_V(h\mathbf{u})$ y $\rho_V(h\mathbf{u})$ donde \mathbf{u} es un vector unitario en la dirección considerada.

Algunos autores, especialmente en las aplicaciones mineras, han preferido usar el concepto de variograma, de preferencia al de autocovarianza. El variograma es el momento de segundo orden del incremento, $V(X+h)-V(X)$:

$$2\gamma(h) = E \left\{ [V(X+h) - V(X)]^2 \right\} \quad (2.14)$$

para un campo estacionario en el sentido amplio:

$$2\gamma(h) = \text{Var}[V(X+h) - V(X)] \quad (2.15)$$

$$\gamma(h) = C_V(0) - C_V(h) \quad (2.16)$$

En el tipo de aplicaciones consideradas en este trabajo, el uso de este concepto no trae ventaja, por lo que se usará siempre el de función de autocovarianza.

2.2.2. Estimación estadística de los parámetros de un campo aleatorio

Los parámetros descriptivos anteriores pueden ser estimados a partir de los resultados "discretos" (muestras aisladas) o "continuos" (sondeos) de las campañas de reconocimiento; en este último caso, aceptando que el campo es *estadísticamente homogéneo* y *ergódico* (es decir, que sus parámetros pueden ser estimados a partir de una sola *realización* del mismo), el valor esperado puede ser evaluado utilizando la aproximación:

$$\mu_V = \frac{1}{L} \int_0^L V(x) dx \quad (2.17)$$

donde L es la longitud del sondeo.

En la misma forma, es posible estimar la autocovarianza a lo largo de determinada dirección, como:

$$C_V(h\mathbf{u}) \cong \frac{1}{L} \int_0^L V(x)V(x+\lambda\mathbf{u})dx - \mu_V^2 \quad (2.18)$$

Donde \mathbf{u} es el vector unitario en la dirección en la que se evalúa la covarianza y h es un escalar. En esta expresión, se puede apreciar que la estimación de la autocovarianza presenta un ligero sesgo, como puede verificarse evaluando la esperanza del segundo miembro.

Por otra parte, si se introduce la función indicadora:

$$I_V(v, X) = \begin{cases} 1 & \text{si } V(X) \leq v \\ 0 & \text{si } V(X) > v \end{cases} \quad (2.19)$$

la función de distribución de probabilidad de primer orden del campo puede ser estimada a partir de los registros continuos con base en la relación:

$$F_V(v, X) = P[V(X) \leq v] \cong \frac{1}{L} \int_0^L I_V(v, x)dx \quad (2.20)$$

La determinación de los parámetros del campo a partir de los datos disponibles recibe generalmente el nombre de *análisis estructural*.

En el caso de muestras aisladas, este análisis tiene que realizarse usando expresiones discretas equivalentes a las expresiones anteriores (Deutsch, 1992). Esta situación es la más común cuando la variable de interés es de tipo geométrico (espesor de determinado estrato, por ejemplo) o en problemas de control de compactación.

2.2.3. Efecto de escala

El conocimiento de los parámetros principales del campo aleatorio representativo de las variaciones de las propiedades permite evaluar la esperanza y dispersión de los valores medios de dichas propiedades en áreas o volúmenes contenidos dentro del medio. Así, en un campo estacionario, la esperanza del valor medio, V_Ω , de la propiedad de interés en un volumen, Ω , es (Papoulis, 1984):

$$E\{V_\Omega\} = E\left\{\frac{1}{\Omega} \int_\Omega V(x)dx\right\} = E\{V(X)\} \quad (2.21)$$

y su varianza:

$$Var[V_{\Omega}] = E\{V_{\Omega}^2\} - E^2\{V_{\Omega}\} \quad (2.22)$$

es decir:

$$Var[V_{\Omega}] = \frac{1}{\Omega^2} \left[E\left\{ \int_{\Omega} V(x) dx \int_{\Omega} V(x) dx \right\} - E\left\{ \int_{\Omega} V(x) dx \right\}^2 \right] \quad (2.23)$$

lo que puede escribirse como:

$$Var[V_{\Omega}] = \frac{1}{\Omega^2} \int_{\Omega} \int_{\Omega} E\{V(x_1)V(x_2)\} dx_1 dx_2 - \int_{\Omega} \int_{\Omega} E\{V(x_1)\} E\{V(x_2)\} dx_1 dx_2, \quad (2.24)$$

es decir:

$$Var[V_{\Omega}] = \frac{1}{\Omega^2} \int_{\Omega} \int_{\Omega} C_V(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (2.25)$$

En la misma forma, se muestra que la covarianza entre valores medios de la propiedad en dos dominios, Ω_1 y Ω_2 , con o sin traslape, es:

$$Cov[V_{\Omega_1}, V_{\Omega_2}] = \frac{1}{\Omega_1 \Omega_2} \int_{\Omega_1} \int_{\Omega_2} C_V(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (2.26)$$

La ecuación 2.25 puede también escribirse:

$$Var[V_{\Omega}] = \frac{Var[V(X)]}{\Omega^2} \int_{\Omega} \int_{\Omega} \rho_V(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (2.27)$$

Dado que el coeficiente de correlación es inferior o igual en valor absoluto a la unidad, se observa que la varianza del valor medio de una propiedad aleatoria estacionaria en un dominio dado tiende a disminuir cuando las dimensiones de dicho dominio crecen (excepto en el caso trivial de la correlación perfecta). Esta formulación fue utilizada por Auvinet (1986) para estudiar el efecto de escala geométrico en los medios granulares. En la literatura, este fenómeno se conoce también como “*reducción de varianza*”. Soulié *et al.* (1983) han hecho notar que, debido a este efecto, es indispensable indicar las dimensiones de los especímenes cuando se proporciona el valor de la dispersión de los resultados de ensayos físicos o mecánicos sobre un material dado.

2.2.4. Estimación condicional

Un problema de gran interés en geoestadística es el de la estimación del valor de una propiedad de interés en un punto del medio donde no se cuenta con medición. Disponer de una solución a este problema permite en particular *interpolarse* entre datos disponibles e inclusive definir sondeos y cortes *virtuales*. El problema puede generalizarse a la estimación del valor medio de la misma propiedad en cualquier subdominio estudiado, por ejemplo, en un volumen dado o a lo largo de determinada superficie potencialmente crítica.

Una técnica que permite alcanzar este objetivo es la técnica de estimación lineal sin sesgo y con mínima varianza (*Best linear unbiased estimation* o "*BLUE*"), conocida también como filtro de Wiener o, en geología matemática, como *Kriging* (Krige, 1962; Matheron, 1965).

a) Estimación lineal bivariable

El modelado mediante un campo aleatorio de una propiedad definida en un dominio, Ω , permite evaluar el valor esperado condicional y la varianza condicional de, V_{Ω_1} , propiedad puntual o media en un subdominio, Ω_1 , a partir del valor, V_{Ω_2} , también puntual o medio, obtenido por medición directa en otro subdominio Ω_2 .

Se usa un estimador lineal, $V_{\Omega_1}^*$, tal que:

$$V_{\Omega_1}^* = aV_{\Omega_2} + b \quad (2.28)$$

y que sea, además, insesgado:

$$E\{V_{\Omega_1}^* - V_{\Omega_1}\} = 0 \quad (2.29)$$

Es posible obtener una expresión para los valores, a y b , tal que se satisfagan simultáneamente las ecuaciones (2.28) y (2.29), y que se minimice la esperanza del cuadrado del error o *varianza de estimación*:

$$E\{(V_{\Omega_1}^* - V_{\Omega_1})^2\} = \text{Var}[aV_{\Omega_2} + b - V_{\Omega_1}] \quad (2.30)$$

De acuerdo con (2.28), el valor de b es:

$$b = E\{V_{\Omega_1}\} - aE\{V_{\Omega_2}\} \quad (2.31)$$

Por otra parte, es fácil verificar que anulando la derivada de la expresión (2.30) respecto a la variable, a , para minimizar el error de estimación, se obtiene:

$$a = \frac{Cov[V_{\Omega_1}, V_{\Omega_2}]}{\sigma_{V_{\Omega_2}}^2} \quad (2.32)$$

La expresión (2.28) resultante es por tanto:

$$V_{\Omega_1}^* = E\{V_{\Omega_1}\} + \rho_V(V_{\Omega_1}, V_{\Omega_2}) \frac{\sigma_{V_{\Omega_1}}}{\sigma_{V_{\Omega_2}}} [V_{\Omega_2} - E\{V_{\Omega_2}\}] \quad (2.33)$$

donde $\rho_V(V_{\Omega_1}, V_{\Omega_2})$ es el coeficiente de correlación de V_{Ω_1} y V_{Ω_2} :

$$\rho_V(V_{\Omega_1}, V_{\Omega_2}) = \frac{Cov[V_{\Omega_1}, V_{\Omega_2}]}{\sigma_{V_{\Omega_1}} \sigma_{V_{\Omega_2}}} \quad (2.34)$$

La varianza de estimación minimizada correspondiente es:

$$E\{(V_{\Omega_1}^* - V_{\Omega_1})^2\} = Var[V_{\Omega_1}] (1 - \rho_V^2) \quad (2.35)$$

Si las dos variables tienen la misma esperanza y la misma varianza dos situaciones extremas pueden presentarse en cuanto al coeficiente de correlación:

- Si V_{Ω_1} y V_{Ω_2} están perfectamente correlacionadas, entonces: $\rho_V(V_{\Omega_1}, V_{\Omega_2}) = 1$ y $V_{\Omega_1}^* = V_{\Omega_2}$
- Si V_{Ω_1} y V_{Ω_2} no están correlacionadas, la información sobre Ω_2 no contribuye a reducir la incertidumbre sobre Ω_1 .

Se observa que, en el caso general, el conocimiento del campo en un subdominio dado conduce a una corrección de la esperanza y a una reducción de la varianza del campo o de su valor medio en otros subdominios.

b) Estimación lineal multivariable

El método puede generalizarse a la estimación de las esperanzas, varianzas y covarianzas condicionales de los valores puntuales o medios asociados respectivamente a diferentes puntos o subdominios del medio estudiado, a partir de cierto número de resultados de mediciones efectuadas en diferentes puntos o subdominios.

Sea V un vector de dimensión, p , conteniendo las k variables por estimar y las $p-k$ variables conocidas, definido como:

$$\mathbf{v} = \begin{pmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{pmatrix} \text{ con } \mathbf{v}_1 = \begin{pmatrix} V_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ V_k \end{pmatrix} \text{ y } \mathbf{v}_2 = \begin{pmatrix} V_{k+1} \\ \cdot \\ \cdot \\ V_p \end{pmatrix} \quad (2.36)$$

\mathbf{v}_1 es el vector de las variables por estimar y \mathbf{v}_2 es el vector de las variables conocidas.

Sea, \mathbf{U} , el vector, también de dimensión p de los valores esperados de las variables por estimar y de las variables conocidas, definido como:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \end{pmatrix} \text{ con } \mathbf{U}_1 = \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \mu_k \end{pmatrix} \text{ y } \mathbf{U}_2 = \begin{pmatrix} \mu_{k+1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \mu_p \end{pmatrix} \quad (2.37)$$

Por otra parte, sea \mathbf{K} la matriz de covarianza para el conjunto de las variables conocidas y por estimar:

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} \end{pmatrix} \quad (2.38)$$

con :

\mathbf{K}_{11} sub-matriz de las covarianzas entre las variables asociadas a los diferentes puntos o dominios de estimación, de orden, k ;

\mathbf{K}_{22} sub-matriz de las covarianzas entre las variables asociadas a los diferentes puntos o subdominios conocidos, de orden, $p-k$;

\mathbf{K}_{12} y \mathbf{K}_{21} sub-matrices de las covarianzas entre los diferentes datos y las variables asociadas a los diferentes puntos o subdominios de estimación, respectivamente de orden, k y $p-k$. Obsérvese que, $\mathbf{K}_{21} = \mathbf{K}_{12}^T$.

Es posible obtener un vector, \mathbf{v}_1^* , estimador del vector, \mathbf{v}_1 , conociendo, \mathbf{v}_2 , cuyos elementos sean lineales, insesgados, y conduzcan a una mínima varianza de estimación.

Los elementos de este vector serán combinaciones lineales de los elementos de, \mathbf{v}_2 :

$$\mathbf{v}_1^* = \mathbf{A}\mathbf{v}_2 + \mathbf{b} \quad (2.39)$$

La estimación será sin sesgo si:

$$E\{\mathbf{V}_1^* - \mathbf{V}_1\} = \mathbf{A}\mathbf{U}_2 + \mathbf{b} - \mathbf{U}_1 = 0 \quad (2.40)$$

La submatriz de las varianzas de estimación tendrá la forma:

$$\mathbf{K}_{11.2} = E\{(\mathbf{V}_1^* - \mathbf{V}_1)(\mathbf{V}_1^* - \mathbf{V}_1)^T\} \quad (2.41)$$

es decir:

$$\mathbf{K}_{11.2} = \mathbf{A}\mathbf{K}_{22}\mathbf{A}^T + \mathbf{K}_{11} - \mathbf{A}\mathbf{K}_{12}^T - \mathbf{K}_{12}\mathbf{A}^T \quad (2.42)$$

Procediendo nuevamente por derivación para minimizar los elementos de esta matriz, se obtiene que la matriz de los coeficientes óptimos es:

$$\mathbf{A} = \mathbf{K}_{12}\mathbf{K}_{22}^{-1} \quad (2.43)$$

Combinando las ecuaciones anteriores, se obtiene el vector de los valores estimados:

$$\mathbf{V}_1^* = \mathbf{U}_1 + \mathbf{K}_{12}\mathbf{K}_{22}^{-1}(\mathbf{V}_2 - \mathbf{U}_2) \quad (2.44)$$

y la submatriz de varianzas de estimación minimizadas resulta:

$$\mathbf{K}_{11.2} = \mathbf{K}_{11} - \mathbf{K}_{12}\mathbf{K}_{22}^{-1}\mathbf{K}_{21} \quad (2.45)$$

Este método permite estimar valores puntuales o medios del campo aleatorio en subdominios del medio (por ejemplo elementos finitos o grupos de estos elementos) tomando en cuenta ciertos resultados obtenidos por muestreo.

2.2.5. Kriging

La técnica del kriging, ampliamente usada en ingeniería minera, consiste, al igual que la anterior, en obtener estimadores lineales de mínima varianza; sin embargo, la técnica tiene algunas variantes que pueden ser de interés y se expone a continuación para el caso de la estimación puntual.

a) Kriging *simple*

El kriging *simple*, (Deutsch & Journel, 1992) es una técnica que puede usarse cuando, $E\{V(X)\}$, es una función conocida de, X (eventualmente constante). Consiste en obtener los estimadores puntuales en el campo de media nula, $V(X) - E\{V(X)\}$, en vez de, $V(X)$. Los elementos del vector, \mathbf{V}_1^* , de la ecuación 2.33, se sustituyen entonces por:

$$V^*(X) - E\{V(X)\} = \sum_{i=1}^n \lambda_i (V_i - E\{V_i\}) \quad (2.46)$$

donde los, V_i son los elementos conocidos del vector, V_2 , y $E\{V_i\}$ los elementos correspondientes del vector de esperanzas, U_2 .

Los coeficientes, λ_i , y los estimadores buscados pueden obtenerse usando las mismas ecuaciones del inciso 2.2.4. El kriging *simple* es, de hecho, rigurosamente equivalente a la técnica de estimación planteada en 2.2.4.a y 2.2.4.b

b) Kriging *ordinario*

El kriging ordinario es la variante más usada del kriging simple. Cuando el campo es estacionario, la ec. 2.46 del kriging simple puede escribirse:

$$V^*(X) = \sum_{i=1}^n \lambda_i V_i + \left[1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i \right] \mu_V \quad (2.47)$$

donde μ_V es la esperanza constante del campo.

Es posible encontrar un estimador lineal, insesgado y de mínima varianza que no requiera el conocimiento de la media, μ_V , imponiendo la condición:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (2.48)$$

La varianza de estimación:

$$\sigma_E^2(X) = Var[V(X) - V^*(X)] = E\{[V(X) - V^*(X)]^2\} \quad (2.49)$$

puede escribirse como:

$$\sigma_E^2(X) = Var[V^*(X)] + Var[V(X)] - 2Cov[V^*(X), V(X)] \quad (2.50)$$

pero:

$$Var[V^*(X)] = Var\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i V_i\right] = \sum_{i,j=1}^n \lambda_i \lambda_j C_V(X_i, X_j) \quad (2.51)$$

y

$$Cov[V^*(X), V(X)] = Cov\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i V_i, V(X)\right] = \sum_{i=1}^n \lambda_i C_v(X, X_i) \quad (2.52)$$

por tanto:

$$\sigma_E^2(X) = Var[V(X)] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j C_v(X_i, X_j) - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i C_v(X, X_i) \quad (2.53)$$

Debe minimizarse, $\sigma_E^2(X)$, respetando la condición de inesgamiento. Lo anterior puede lograrse recurriendo a la técnica de los multiplicadores de Lagrange, obteniéndose el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j C_v(X_i, X_j) - \nu = C_v(X, X_i), \quad i = 1 \text{ a } n \quad (2.54)$$

Con la ecuación (2.54), se cuenta en total con $n+1$ ecuaciones que permiten determinar los n coeficientes λ y el multiplicador de Lagrange, ν .

La varianza de estimación minimizada correspondiente es:

$$\sigma_E^2(X) = Var[V(X)] + \nu - \sum_{i=1}^n \lambda_i C_v(X, X_i) \quad (2.55)$$

El estimador proporcionado por el kriging *ordinario* se considera más robusto que el del kriging *simple*. Al no requerir el conocimiento de la esperanza, puede adaptarse mejor a variaciones locales. Sin embargo, debe reconocerse que en general la esperanza se conoce mejor que la autocovarianza.

2.2.6. Campos gaussianos

Un caso particular de gran importancia es el de los campos *gaussianos*. Conviene recordar que un campo aleatorio es *gaussiano* si su densidad de probabilidad conjunta de cualquier orden, n , está definida por la ecuación siguiente (Benjamin & Cornell, 1970):

$$f_{V_1, \dots, V_n}(v_1, \dots, v_n; X_1, \dots, X_n) = \frac{1}{|\mathbf{K}|^{\frac{1}{2}} (2\pi)^{\frac{n}{2}}} e^{-\frac{1}{2}(v-\mu)^T \mathbf{K}^{-1}(v-\mu)} \quad (2.56)$$

para $-\infty < v_i < +\infty$ e $i = 1, \dots, n$

Donde \mathbf{V} es el vector de las variables aleatorias $V(X_1), \dots, V(X_n)$; $\boldsymbol{\mu}$, es un vector de valores reales tales que, $\mu_i = E\{V(X_i)\}$, y \mathbf{K} es la matriz de covarianza de las variables aleatorias que contiene en la diagonal principal las varianzas respectivas de las diferentes variables y fuera de la diagonal sus covarianzas por pares.

El teorema del límite central (Benjamin, 1970) hace que este tipo de campo surja naturalmente cuando el fenómeno analizado es el resultado de la suma de los efectos de múltiples campos. No hay razón particular para pensar que esto ocurre en el caso de las variables geotécnicas, sin embargo este tipo de campo puede también ser utilizado como una primera aproximación de campos más complejos.

Los campos gaussianos, tienen la propiedad interesante de que los estimadores lineales de mínima varianza presentados en los incisos anteriores (2.2.4 a y b) son exactos. En otros términos, para un vector \mathbf{V} de dimensión p presentando una distribución p -gaussiana de vector esperanza \mathbf{U} y matriz de covarianza \mathbf{K} la distribución condicional del vector \mathbf{V}_1 de orden k conociendo \mathbf{V}_2 es una distribución k -gaussiana de vector esperanza \mathbf{V}_1^* , definido por la ecuación (2.44) y con matriz de covarianza dada por la ecuación (2.45) (Mood y Graybill, 1963)

2.2.7. Simulación de campos aleatorios

La *simulación* es el proceso por medio del cual se genera una posible configuración del campo aleatorio compatible con sus parámetros descriptivos (simulación *incondicional*) o con estos parámetros y, además, con los datos disponibles (simulación *condicional*). Se genera así una realización o imagen del campo que permite apreciar en particular valores extremos potencialmente problemáticos.

La forma más sencilla de simular un campo aleatorio consiste en considerar que el mismo está representado por n puntos X_1, X_2, \dots, X_n donde, para cada punto, se deben obtener realizaciones del grupo de variables aleatorias $V(X_1), V(X_2), \dots, V(X_n)$ con la estructura correcta del campo en cuanto a media y covarianza. La simulación se realiza generalmente sobre una malla de puntos en el dominio de interés y se reduce por tanto a generar un cierto número de variables aleatorias conjuntamente distribuidas. A continuación se presenta una introducción a este tema.

2.2.7.1. Técnica general

La técnica más común para obtener al azar un valor representativo de una variable aleatoria $V(X)$ con determinada distribución de probabilidad $F_V(v, X)$ consiste en adoptar un valor v tal que:

$$F_V^{-1}(v, X) = u \quad (2.57)$$

donde u es un número aleatorio con densidad de probabilidad uniforme entre 0 y 1 (Mood y Graybill, 1963). Los diversos algoritmos que permiten obtener números aleatorios con estas características han sido revisados por Fogli (1980).

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Si $V(X_1), V(X_2), \dots, V(X_n)$ es el conjunto de n variables aleatorias representativas del campo que se pretende simular y estas variables son estadísticamente independientes, entonces sus funciones conjuntas de densidad y de distribución de probabilidad pueden expresarse como:

$$f_{V_1, \dots, V_n}(v_1, \dots, v_n; X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n f_{V_i}(v_i; X_i) \quad (2.58)$$

$$F_{V_1, \dots, V_n}(v_1, \dots, v_n; X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n F_{V_i}(v_i; X_i) \quad (2.59)$$

donde $f_{V_i}(v_i; X_i)$ y $F_{V_i}(v_i; X_i)$ son respectivamente las funciones marginales (individuales) de densidad y distribución de probabilidad de $V(X_i)$. En este caso, los valores aleatorios de cada variable pueden generarse separada e independientemente por medio de la técnica descrita anteriormente (ec. 2.56).

Para un grupo de variables aleatorias dependientes $V(X_1), V(X_2), \dots, V(X_n)$, las funciones conjuntas de densidad y de distribución de probabilidad pueden expresarse como:

$$f_{V_1, \dots, V_n}(v_1, \dots, v_n; X_1, \dots, X_n) = f_{V_1}(v_1; X_1) \cdot f_{V_2}(v_2 | v_1; X_2) \dots f_{V_n}(v_n | v_1, \dots, v_{n-1}; X_n) \quad (2.60)$$

$$F_{V_1, \dots, V_n}(v_1, \dots, v_n; X_1, \dots, X_n) = F_{V_1}(v_1; X_1) \cdot F_{V_2}(v_2 | v_1; X_2) \dots F_{V_n}(v_n | v_1, \dots, v_{n-1}; X_n) \quad (2.61)$$

donde $f_{V_i}(v_i | v_1, \dots, v_{i-1}; X_i)$ y $F_{V_i}(v_i | v_1, \dots, v_{i-1}; X_i)$ representan respectivamente las funciones condicionales de densidad y distribución de probabilidad de $V(X_i)$ dado que $V(X_1) = v_1, V(X_2) = v_2, \dots, V(X_{i-1}) = v_{i-1}$. Debido a que las variables aleatorias son dependientes, ya no es válido usar directamente un conjunto de números aleatorios uniformemente distribuidos e independientes para generar los valores deseados. Cuando el campo es gaussiano o ha sido transformado en campo gaussiano por anamorfosis, es posible emplear el procedimiento indicado a continuación.

2.2.7.2. Simulación incondicional

Este tipo de simulación requiere inicialmente la generación de una secuencia de *variables aleatorias estándar independiente distribuidas normalmente* (con media cero y varianza unitaria), obtenidas a partir de dos variables aleatorias, U_i y U_{i+1} , distribuidas uniformemente entre 0 y 1 (Fogli, 1980):

$$\begin{aligned} Z_i &= \sqrt{-2 \ln(1 - U_i)} \cos(2\pi U_{i+1}) \\ Z_{i+1} &= \sqrt{-2 \ln(1 - U_i)} \operatorname{sen}(2\pi U_{i+1}) \end{aligned} \quad (2.62)$$

Por otra parte, la matriz de correlación ρ constituida por los elementos:

$$\rho_V(X_i, X_j) = \frac{C_V(X_i, X_j)}{\sigma_V(X_i)\sigma_V(X_j)} \quad (2.63)$$

puede descomponerse en el producto de una matriz triangular inferior y de su traspuesta:

$$\mathbf{LL}^T = \rho \quad (2.64)$$

esta operación, conocida como *descomposición de Cholesky*, presenta ciertas desventajas: no puede llevarse a cabo cuando algunas de las $V(X_i)$ están perfectamente correlacionadas entre sí, es difícil de calcular cuando el número de puntos en el campo es demasiado grande, y tiende a generar errores de redondeo numérico. Sin embargo, ya existen algoritmos estándar eficientes para su cálculo.

A partir de la matriz \mathbf{L} de la ec. 2.64, se puede obtener un *campo aleatorio normal estándar correlacionado*, como una combinación lineal de las variables normales estándar independientes, Z_j :

$$G(X_i) = \sum_{j=1}^i L_{ij} Z_j; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.65)$$

Finalmente, se puede introducir los valores conocidos de la media y la varianza para generar realizaciones de $V(X_i)$, lo cual proporciona la simulación del campo:

$$V(X_i) = \mu_V(X_i) + \sigma_V(X_i)G(X_i) \quad (2.66)$$

Cuando la simulación del campo aleatorio $V(X)$ ya haya sido generada, esta realización puede utilizarse como punto de partida para un análisis determinista y la simulación puede repetirse para evaluar la variabilidad del resultado del mismo dentro de un análisis de *Monte Carlo*.

2.2.7.3. Simulación condicional

Se supone ahora que el campo aleatorio $V(X)$ ha sido medido en los puntos X_1, X_2, \dots, X_p y que será simulado en los puntos $X_{p+1}, X_{p+2}, \dots, X_{p+n}$. Se desea generar realizaciones de $V(X)$

que igualen de manera exacta los datos en p puntos y que sean aleatorias en los $n - p$ puntos restantes.

La *simulación de un campo aleatorio condicional* puede hacerse directamente por el método del inciso anterior, pero usando las esperanzas, varianzas y covarianzas condicionales sobre los datos disponibles. Se pueden generar varios puntos al mismo tiempo o generar uno a la vez e incorporar el punto generado a los datos. Esta última forma de proceder parece ser la más eficiente (Shinozuka & Zhang, 1996).

2.3. Algoritmos utilizados

Dos programas son utilizados principalmente como herramientas del análisis geoestadístico.

El primero, llamado *Geostatistical Software Library* (GSLIB), es el desarrollado en lenguaje Fortran por Deutsch, (1992) en la Universidad de Stanford; el programa se basa en la técnica de estimación del kriging ordinario (OK) y se utiliza para analizar la variabilidad geométrica espacial del primer estrato del suelo marino. A continuación se muestra una tabla explicativa de las subrutinas utilizadas en el programa GSLIB:

Tabla 2.3.1 Subrutinas utilizadas en el programa GSLIB.

Subrutina de GSLIB	Utilización de la subrutina
localmap.exe	Localización de los valores en un plano
gamv.exe	Cálculo del variograma que permite ingresar una base de datos con distribución de coordenadas en forma aleatoria.
kb2d.exe	Estimación en dos dimensiones del kriging ordinario
draw.exe	Simulación estocástica de Monte Carlo simple.

El segundo programa llamado temporalmente: *Sistema de apoyo para el análisis Geoestadístico* (SAAG), se elaboró en la Coordinación de Geotecnia del Instituto de Ingeniería de la UNAM, por Dávalos *et al.* (2001), en el lenguaje C++ Builder, y se utiliza para estimar la variabilidad de un campo aleatorio en el espacio a partir de datos de variación con la profundidad (perfiles geotécnicos). Este programa se apoya en la teoría de los campos aleatorios y su técnica de estimación es el kriging simple (SK).

Los 89 perfiles de contenido de agua se analizaron mediante el programa SAAG. El modelado de la variabilidad espacial incluido en el programa está basado en las funciones de correlación estandarizadas vertical y horizontal, las cuales se reproducen utilizando funciones exponenciales; éstas se integran para representar la dependencia lineal de las propiedades del medio en tres dimensiones, aceptando que existe ortotropía. Para la estimación condicional de las propiedades, se utilizan los datos recabados en la campaña

de exploración (únicamente perfiles verticales) y estima sondeos y cortes virtuales (verticales) utilizando un estimador lineal insesgado de mínima varianza (inciso 2.2.4).

Antes de utilizar el programa SAAG, se realiza un estudio de la variable de interés (contenido de agua) mediante estadística descriptiva. Los análisis de estadística descriptiva se realizaron en Microsoft Excel, de Office 2000. Para realizarse el análisis estructural, se ajustaron algunos programas ya elaborados para el desarrollo de las ecuaciones matemáticas propuestas, como en el caso de la función de tipo exponencial, tanto del modelo vertical como el modelo horizontal.

El paquete de programas MESCAL (Medición, Estimación y Simulación de Campos Aleatorios), fue desarrollado en lenguaje de programación Basic (Auvinet, 1988) Estos programas existen actualmente en Turbo Basic. Del paquete MESCAL, se utiliza el programa *ergodico.bas*, con su algoritmo original, para calcular la autocovarianza y el coeficiente de autocorrelación. Además, el programa *expo.bas*, el cual calcula la función exponencial, se modifica, para esta tesis, de su original de MESCAL para hacer el ajuste por el método de los mínimos cuadrados en el lenguaje *Fortran*, añadiéndose la función expo-cosenoidal, según Li, & Lump, (1987), lo cual se incluye en el programa SAAG.

3. APLICACIÓN AL SUBSUELO MARINO

3.1. Información disponible

La Sonda de Campeche es una porción del Golfo de México localizada al oeste de la Península de Yucatán, con un área aproximada de 5000 km². Petróleos Mexicanos (PEMEX) extrae, desde hace varias décadas, parte de los hidrocarburos allí producidos (Informe PEMEX, 1985). Debido al continuo desarrollo de la infraestructura petrolera en la zona (en las áreas de: Akal, Chac, Cantarell y Nohoch), desde 1977 PEMEX efectúa los sondeos necesarios para el diseño de las plataformas petroleras.

En el presente trabajo se consideran los 89 sondeos geotécnicos realizados en las áreas mencionadas, de los cuales se utilizan las propiedades índices (perfiles de contenido de agua) y mecánicas del suelo (datos de veleta miniatura y torcómetro), a fin de presentar un análisis complementario del convencional (la geostatística) para la interpretación de las condiciones del suelo marino que se utiliza en el diseño de la cimentación de plataformas.

Los sondeos, efectuados en el lapso de 1977 a 1998, están ubicados en una superficie de 280 km², en un marco virtual de 14 km de ancho por 20 km de largo. Su posición está definida mediante coordenadas UTM y coordenadas polares dentro la sonda (figura 3.1.1).

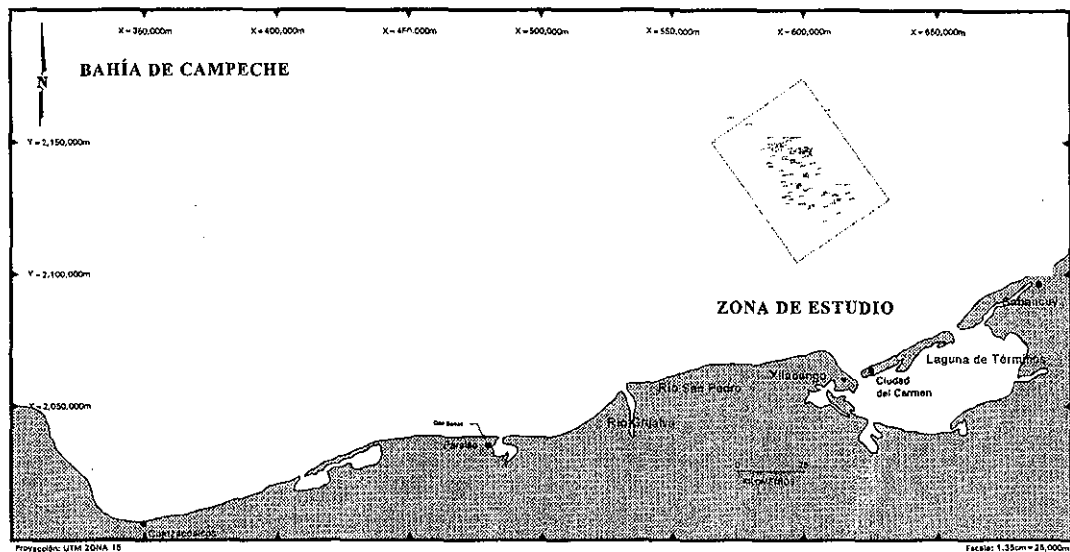


Figura 3.1.1 Localización de los 89 sondeos geotécnicos. Modificada de Fugro 020i-2927-11 Volumen 1, (1998).

Los 89 sondeos están referenciados al nivel medio del mar (N.M.M.), con un tirante de agua variable entre 36.6 m en su profundidad mínima (sondeo NOD) y 55.1 m como mayor

tirante (sondeo KUTC1). Las profundidades de los sondeos están comprendidas entre 95.2 m (sondeo AKB1) y 162.46 m (sondeo AKH1).

Cinco compañías fueron contratadas para efectuar los estudios geotécnicos y en cada informe se presenta un amplio marco de estudio de las características geológicas y geotécnicas de la zona, los métodos y las técnicas usadas para la realización de los sondeos, así como los ensayos de campo y laboratorio necesarios para diseñar los pilotes de la cimentación de cada plataforma. Solo algunas de las compañías presentan estudios de geofísica somera y una breve interpretación geológica.

3.1.1. Posición geográfica

La Sonda de Campeche se localiza en el Golfo de México, al oeste de la Península de Yucatán, al norte de la Ciudad del Carmen, Campeche, y constituye junto con el Banco de Campeche la parte occidental de la Plataforma Marina de Yucatán. La Sonda de Campeche tiene por lindantes las isobatas 0 y 200, y un tirante medio de 40 m. Las coordenadas geográficas que limitan esta región, corresponden aproximadamente a (figura 3.1.2):

90° y 94° Longitud oeste
18° y 22° Latitud norte.

y la zona de estudio se ubica en:

91°57'-92°10' Longitud oeste
19°19'-19°30' Latitud norte.

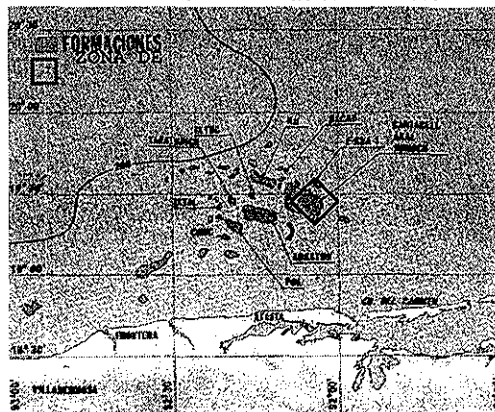


Figura 3.1.2 Las formaciones estudiadas y su localización son Akal, Nohoch, Cantarell, Eka y Ku las cuales se localizan en la parte superior norte de la Sonda de Campeche. (Informe PEMEX, 1985)

3.1.2. Exploración de la Sonda de Campeche

Los estudios geológicos de la plataforma marina y continental de Yucatán se inician formalmente con el reconocimiento geológico superficial realizado por Sapper en 1896. Por su parte, PEMEX participó sistemáticamente en los estudios geológicos de la provincia

desde 1945, con un reconocimiento al sur de Quintana Roo y al oeste del Río Hondo. En 1947, aplicando métodos gravimétricos y magnetométricos, PEMEX realiza campañas de exploración en forma sistemática. En 1971, PEMEX inicia formalmente la prospección marina de la Sonda y Banco de Campeche, exploración que le permitió identificar y definir la geología estructural de esa zona (PEMEX, 1985).

a) Información geológica

La información existente respecto a las formaciones superficiales se ha obtenido mediante los estudios geotécnicos y geofísicos con sísmica de alta resolución que se realizaron en esta zona. Estos estudios indican que las expresiones geológicas relevantes en el área son: las formaciones de arrecifes, montículos carbonatados, paleocanales enterrados, fallas y fracturas. En lo referente a las características del lecho marino, los estudios geofísicos han permitido dividir a la sonda en una zona norte y otra sur, perteneciendo el área del presente estudio a ésta última (figura 3.1.3). Estos suelos están constituidos principalmente por sedimentos recientes, clásticos, carbonatados y térreos, teniendo como dominantes a éstos últimos. La zona sur se localiza frente a las costas limitadas por la desembocadura del Río Grijalva, Punta Xicalango e Isla del Carmen, hasta la desembocadura del Río Champotón, con una amplitud máxima de 120 km y una mínima de 36 km; es de pendiente pronunciada, con un tirante medio de 40 m, aproximadamente. Los sedimentos son arcillas y limos de manera predominante, provenientes del acarreo de los ríos Grijalva (desde el SW), San Pedro y de la desembocadura de la Laguna de Términos, por sus abundantes corrientes fluviales.

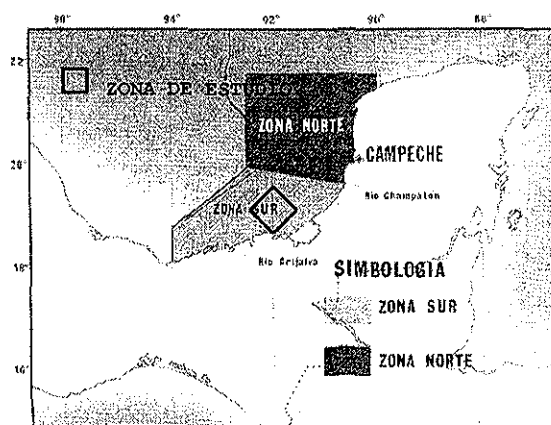


Figura 3.1.3 División convencional de la Sonda de Campeche. El estudio que nos atañe se localiza en la zona sur. (Informe PEMEX, 1985)

Una característica muy común de estos materiales sedimentarios recientes en este ambiente, es la propiedad de transportarse y distribirse sobre el lecho marino como una secuencia de arcilla y arena. Un ejemplo particular de este aporte de material, se presenta frente a la desembocadura del Río Grijalva, donde los movimientos del mar son turbulentos y se depositan arenas finas uniformes, mientras que hacia mar adentro el flujo se comporta como laminar y permite la depositación de los sedimentos arcillosos (Informe PEMEX,

1985). Más adelante, se describirán con un poco más de detalle las características de las formaciones superficiales.

b) Información físico-química

La concentración porcentual de carbonatos recientes en la Sonda de Campeche está representada por cuatro zonas: A, B, C y D; la zona de estudio solamente se traslapa con las áreas B y C (tabla 3.1.1).

Tabla 3.1.1 Distribución porcentual de carbonatos.

Zona	Porcentaje de carbonatos	Presencia en la zona de estudio
A	<25%	No hay
B	25-50%	Presente
C	50-75%	Presente
D	>75%	No hay

La zona A se localiza frente a la desembocadura de los ríos Grijalva y San Pedro. La zona B se localiza más al norte, lo cual predice una mayor profundidad, y está representada por sedimentos arcillosos, cuyo tamaño aumenta al aproximarse hacia la zona norte. Debido a la granulometría fina de sus sedimentos, se infiere que los carbonatos están constituyendo el material cementante y que han sido precipitados mediante procesos físico-químicos directos. Hacia el este, los porcentajes de carbonato de calcio aumentan de una manera gradual, encontrándose el área C frente a la Laguna de Términos y aún hasta más allá de las costas de Sabancuy, Campeche. Esta área es de poca profundidad y la distribución de carbonatos es prácticamente homogénea en los sedimentos recientes (figura 3.1.4).

c) Información estructural

Esta sección contempla una descripción breve de la geología estructural del área de estudio, con base en los reportes geotécnicos (DV-FG, 1997; PC, 1983 y PM-MC, 1978) y geofísicos-geológicos (Informe PEMEX, 1985; DV-FG, 1997 y PM-MC, 1978), atendiendo principalmente a los rasgos relevantes de la parte superficial de la zona.

Regionalmente, el área de estudio se localiza en el cinturón calcáreo plegado de Reforma Akal, casi en los límites con la Plataforma de Yucatán (figura 3.1.5). El cinturón calcáreo plegado tiene una tectónica compleja, tanto en su parte marina como en la continental, caracterizada por fallas normales o inversas, discordancias angulares y plegamientos compresionales pronunciados (estructura Akal Nohoch, de 30 km de largo por 12 km de ancho) por lo que se considera factible la existencia de fallas de corrimiento horizontal (Informe PEMEX, 1985).

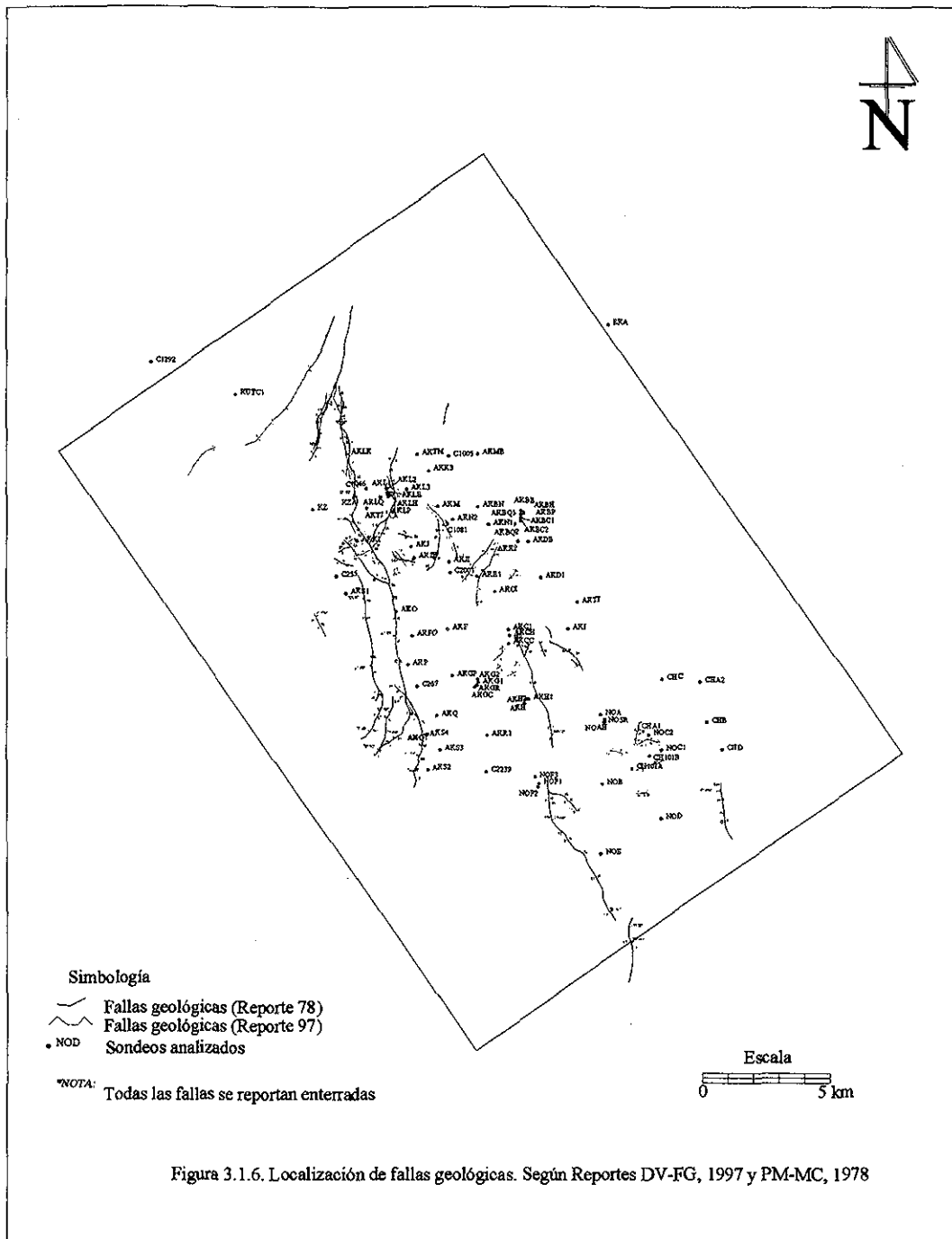


Figura 3.1.6. Localización de fallas geológicas. Según Reportes DV-FG, 1997 y PM-MC, 1978

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

El fallamiento regional principal tiene una tendencia NNW, uno secundario que varía entre NNE y NE, y por último, uno local hacia el W. Es común la característica de traza de falla muy sinuosa y de gran longitud, lo cual ocasiona que un mismo lineamiento no tenga una misma dirección de rumbo, sino que éste varíe a lo largo de la estructura. En cuanto al grado de inclinación, existe una tendencia general a echados muy pronunciados alrededor de 76° , con direcciones muy variables al E y W (figura 3.1.7).

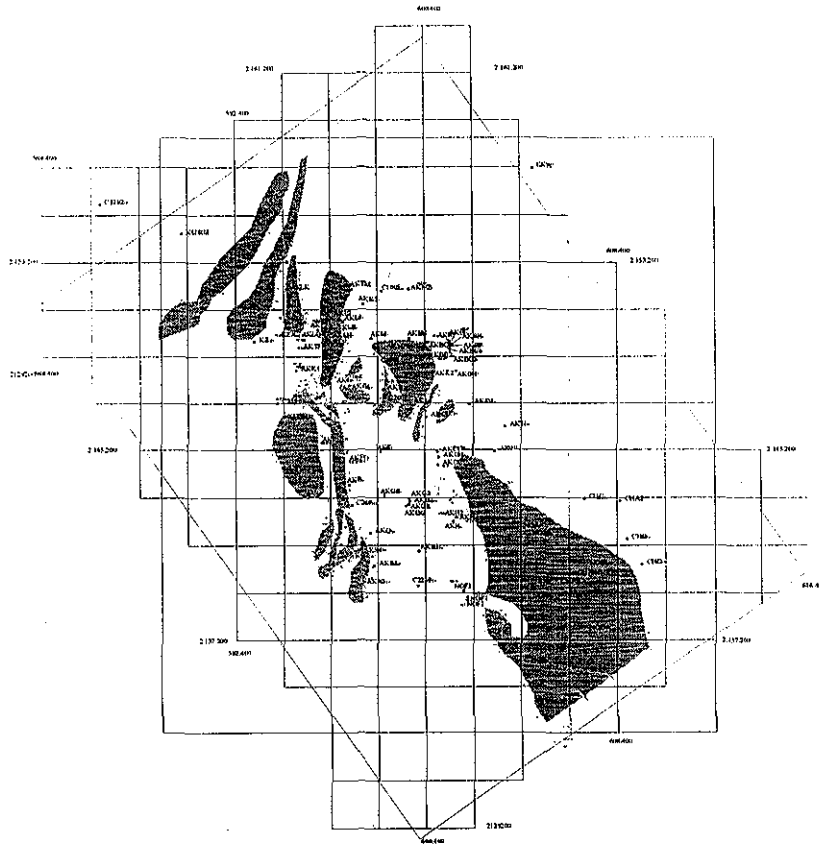


Figura 3.1.7 Mapa de cuencas en dirección de echados. Las zonas sombreadas representan cuencas (graben) y las zonas no sombreadas depresiones (horst).

Hacia la costa, el espesor de los estratos no afectados por las fallas geológicas es mayor (75m aproximadamente); esto indica que, en la costa, los sedimentos superficiales no están muy alterados, por lo cual es muy probable la existencia de una alta correlación horizontal en el estrato de arcilla blanda, aún cuando se debe considerar que la deposición de las arcillas depende de las corrientes y velocidades marinas, las cuales van disminuyendo al alejarse de la costa.

De acuerdo al estudio DV-FG (1997), el fallamiento a profundidad no alcanza a afectar los sedimentos blandos superficiales, con lo cual se infieren dos hipótesis: la primera, que los esfuerzos más recientes generados en las fallas sean anteriores a la deposición de dichos sedimentos; y la segunda, que dichos esfuerzos no hayan superado el umbral de

plastificación de este material para romperlo, lo que explicaría la ausencia de expresión en superficie. Sin embargo, esta última hipótesis no se aplicaría estrictamente para las arenas de los sedimentos subyacentes, por su misma naturaleza.

d) Zonificación según la estructura geológica

Con base en la cartografía de las trazas de fallas obtenidas a partir de los reportes (DV-FG, 1997; PM-MC, 1978), se han identificado cinco zonas que se diferencian por su geología estructural (principalmente polaridades de las fallas, bloque levantado y bloque caído), forma, extensión y la población de sondeos (figura 3.1.8). Por su forma alargada, en dirección NW-SE, serán llamadas franjas, particularmente para cuatro de ellas.

La franja I, dispuesta según NW-SE, corresponde regionalmente a un graben que se abre hacia la parte SE de la zona y cubre un área de 58.7 km². Localmente presenta pequeños grabens orientados NE-SW, tanto en la parte sur como en la parte norte. Esta franja está limitada al SW por dos fallas normales de gran longitud, muy sinuosas (12.5 y 9.5 km), que buzanan al NE.

En el sector NW, esta franja colinda con la franja II a través de una pequeña falla normal N-S. A lo largo de toda la frontera NE de la franja, no hay una estructura geológica importante que delimite la zona. Su creación se debe a la densidad de sondeos que caen fuera del graben.

Como ya se mencionó, el ancho de este graben no es constante, presentando un ancho máximo de 6 km hacia la parte SE. Por otro lado, hacia el NW se presenta una caída paulatina a través de fallas normales dispuestas N-NW y donde la franja se va estrechando hasta alcanzar alrededor de 2.5 km de ancho.

Los informes geofísicos muestran que las fallas centrales que forman el graben principal de esta franja, tienen un azimut comprendido entre 100° y 240°, con buzamientos al NE de 90 a 75°.

Los 19 sondeos contenidos en esta zona son: NOE, NOD, NOB, CH101A, CH101B, NOC1, NOC2, CHA1, NOAH, NOSR, NOA, AKCI, AKE1, C2001, AKA1, C1081, AKN1, AKN2, AKBN.

La franja II está ubicada entre las franjas I y IV; tiene una forma alargada más uniforme que la franja I. Esta zona presenta un ancho muy constante desde la parte SE (4 - 5 Km), hasta la parte NW, donde disminuye a 1.2 - 2.2 km cerca de los sondeos AKJ y AKJH, y cubre un área de 35 km².

El límite de esta franja al ESE corresponde a la falla de gran longitud y sinuosa descrita en la franja I. Al SW, colinda con la franja IV, donde se origina el sistema de fallas con dirección NN-W que recorren toda la franja IV. En la parte norte, continua el ambiente estructural de "Horst", donde dos fallas de corta extensión limitan en ambos costados esta franja.

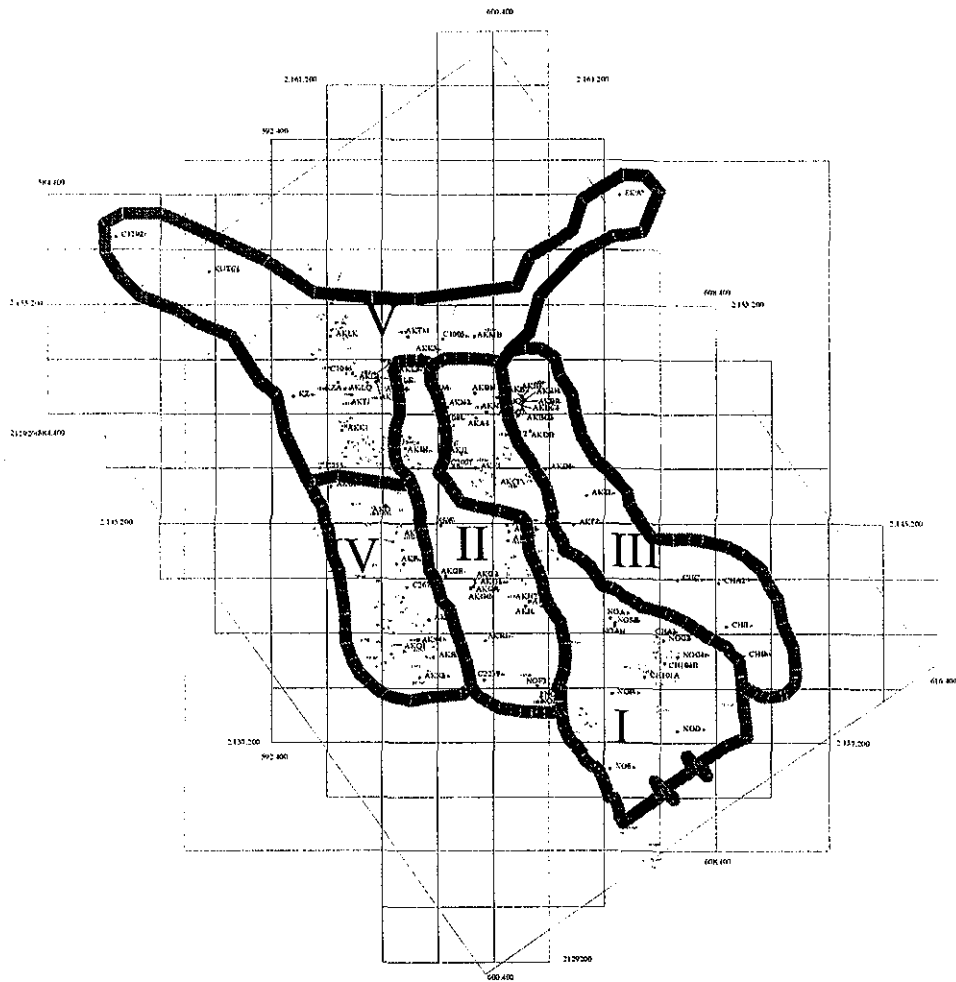


Figura 3.1.8 Mapa de franjas guía según la geología estructural de la zona de estudio.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Esta franja representa una zona estructural a manera de "Horst", que delimita dos grabens (franja I y IV), siendo entonces al nivel de fallamiento un alto estructural, compuesto por los bloques levantados respecto a los dos grabens laterales. No muestra grabens internos importantes como la franja I, sólo algunos locales y de poca extensión en el centro NE de la franja.

Los 22 sondeos contenidos en esta zona son: NOF1, NOF2, NOF3, C2239, AKR1, AKH1, AKH2, AKH3, AKGC, AKGR, AKG1, AKG2, AKGP, AKCC, AKCH, AKC1, AKF, AKJI, AKJH, AKJ, AKM, y AKL3.

La franja III está localizada al E del primer graben descrito (franja I); presenta una dirección NW-SE y ocupa un área de 40 km². Representa una región donde la cartografía elaborada a partir de los estudios anteriores (FG-DV, 1997) no muestra ningún tipo de falla geológica a profundidad. Es un área aparentemente estable. Tiene una forma y un ancho muy regular a todo lo largo de la franja (entre 2 y 2.5 km).

Los 18 sondeos agrupados en esta zona son: CHD, CHB, CHA2, CHC, AKI, AKTI, AKD1, AKDB, AKK2, AKBC1, AKBC2, AKBP, AKBQ1, AKBQ2, AKBH, AKBE, AKB1, y AKB2.

La franja IV se encuentra localizada al SW de la zona en estudio y comprende dos fallas paralelas de gran longitud con dirección NN-W, variando ligeramente al S. Una de ellas, la más oriental, está cortada por el límite de las franjas IV y V (15.8 km en la franja IV, 5.2 km en la franja V y la segunda falla del occidental, 12.8 km). El azimut estimado varía entre 170° y 195°, con buzamientos al W de 75 a 90°. La longitud de esta franja es menor que todas las anteriores, pero su ancho es el más regular con 3.3 km.

Los 10 sondeos de esta franja son: AKS2, AKS3, AKS4, AKQ, AKQ1, C267, AKP, AKFO, AKO, y AKS1.

La franja V se distingue de las demás porque hay cambios locales en el sistema estructural y variaciones importantes de espesor del estrato blando superficial que se observaron en los reportes geotécnicos, por lo que se decidió formar esta última zona en lugar de ampliar las franjas anteriores hacia el norte.

Esta última franja limita con la franja IV, muy cerca del sondeo AKS1 (franja IV) y sondeo C255 (franja V). Se sitúa al N del área con una orientación principal E-W. Está limitada por un conjunto de fallas importantes al NW de la franja II. En su forma alargada E-W, comprende los sondeos de EKA y C1292, que son los sondeos más alejados de la zona de estudio, al NE y NW respectivamente.

Un sistema de dos fallas importantes con dirección NE-SW corta el área NW de esta franja, y otras pequeñas con dirección N-S se encuentran en esta zona. Los buzamientos son al NW en su mayoría, lo cual lleva a un sistema escalonado de grabens con orientación al W-NW y NW de la zona de estudio.

Los 20 sondeos restantes contenidos en esta última franja son: C255, AKK1, AKTJ, KZ, KZA, C1046, AKLQ, AKL1, AKL2, AKL3, AKLE, AKLH, C1292, KUTC1, AKLK, AKTM, AKK3, C1005, AKMB y EKA.

Estas franjas serán tomadas en cuenta como límites dentro de la zona de estudio en el modelado de correlación espacial entre sondeos, puesto que se asume que tienen características geológicas que las agrupa en áreas estructuralmente similares.

e) Batimetría

La determinación del tirante de agua con los registros de ecosonda es un proceso que se realiza en forma automática a lo largo del trazo planeado en el fondo marino, así los registros de perfil facilitan la presentación de los planos batimétricos. Para la zona de estudio, las curvas de nivel han sido definidas con variaciones de 0.5 m. La batimetría obtenida de esta manera muestra una pendiente hacia la dirección NW del área. Los informes geotécnicos realizados denotan que la pendiente se presenta a razón de 0.9 m por km (figura 3.1.9).

La presencia de una pendiente en el fondo marino se toma en cuenta en el cálculo de los correlogramas que inciden en la comparación del nivel de un mismo estrato horizontal de un sondeo con respecto a otro, lo que se aborda con más detalle en el apartado 3.2.1.

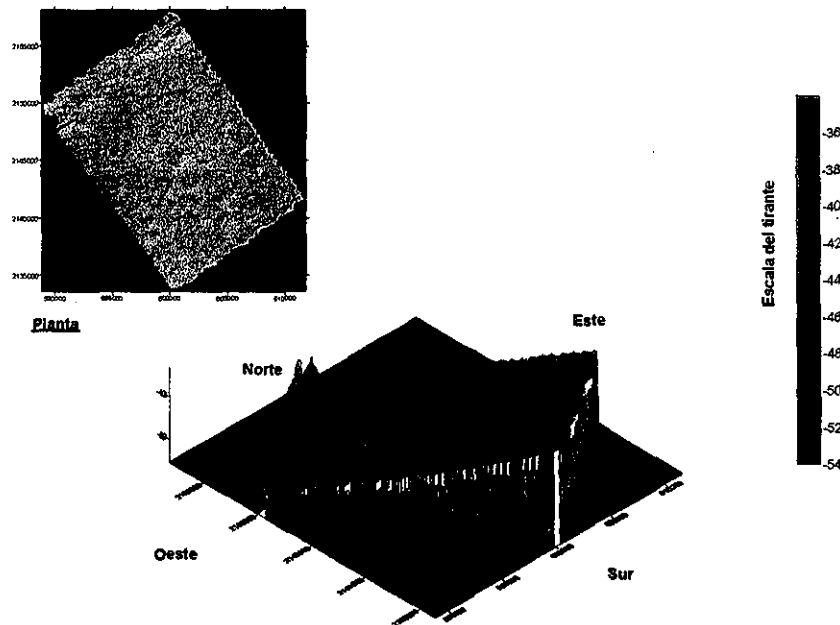


Figura 3.1.9. Perspectiva batimétrica de la zona de estudio

3.1.3. Información geotécnica de la Sonda de Campeche.

El método usual de exploración marina en el campo es el sondeo mixto, que combina el uso de la penetración estándar (recuperación de muestras alteradas) en suelos granulares y el muestreo inalterado en suelos arcillosos por medio del tubo Shelby de pared delgada,

obteniendo muestras representativas del subsuelo para pruebas de laboratorio con el objeto de determinar los parámetros de diseño.

a) Estratigrafía

En general, la Sonda de Campeche presenta una estratificación de lentes de arena fina y arcilla muy firme a dura, finamente intercalados, como se muestra en la tabla 3.1.2.

Granulométricamente, el subsuelo marino está representado por una secuencia de arenas carbonatadas de grano fino, medio y grueso, cuya clasificación varía desde arenas bien graduadas hasta uniformes, o localmente mal graduadas, pero todas tienen un contenido de agua similar que permite tipificarlas como un estrato único. (véase 3.2.2).

Las arenas se intercalan con capas arcillosas que tienden a aumentar en espesor hacia mar adentro; esta secuencia se observa cuando se calcula el coeficiente de autocorrelación de cada sondeo, obteniéndose una función armónica de tipo expo-cosenoidal (véase 3.2.3.4).

El estrato superficial tiene un alto contenido de agua y una consistencia que varía de muy blanda a blanda, por lo que posee características diferentes a los estratos del resto del sondeo.

Para tener una idea de cómo se distribuyen los estratos en la Sonda de Campeche se muestra la sección A-A' (figura 3.1.10), elaborada por correlación de los estratos entre sondeos (método tradicional de interpolación lineal, donde se une la base de un estrato de un sondeo con la base del mismo estrato en otro sondeo). La sección A-A' es del orden de 40 km de longitud y su orientación es NW-SE, cruzando los campos de Ku, Akal, Cantarell y Nohoch. Como se puede observar en este corte, los estratos muestran continuidad horizontal, evidenciando su similitud en sus características física y su pertenencia a una misma formación sedimentaria (PEMEX, 1985).

b) Ensayes de campo y laboratorio

Las variables espaciales tomadas en cuenta en este análisis geoestadístico son: el contenido de agua (laboratorio), la resistencia al corte (medida con veleta miniatura y torcómetro) y el espesor del estrato superficial.

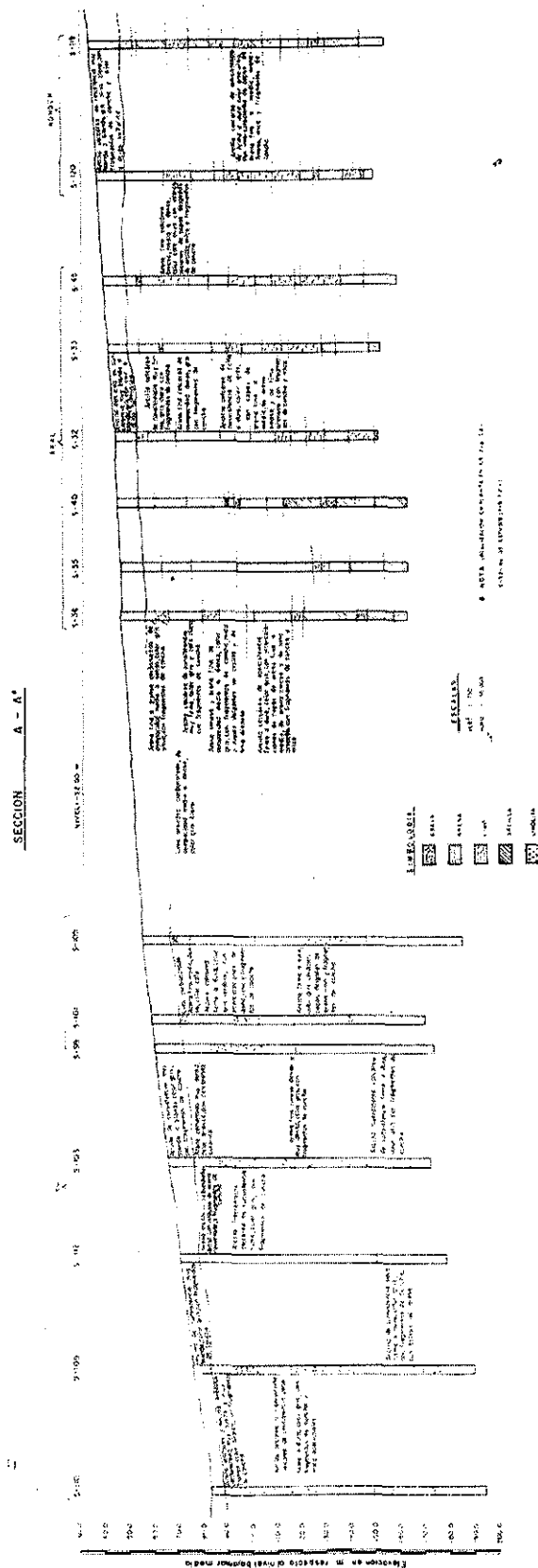
La variable con mayor número de datos es el contenido de agua; este ensaye se realiza siguiendo la norma ASTM D-2216-92, que especifica que una porción representativa del suelo sea pesada antes y después de ser colocada para su secado en un horno de convección a una temperatura de 105°, para luego calcular el contenido de agua natural de la muestra.

Se realizan determinaciones del contenido de agua en todas las muestras incluyendo las que sirven de apoyo para las pruebas triaxiales sin consolidación y sin drenaje. Este último tipo de resultado también se tomó en cuenta en este análisis.

Tabla 3.1.2 Perfil estratigráfico típico de la Sonda de Campeche (Informe PEMEX, 1985)

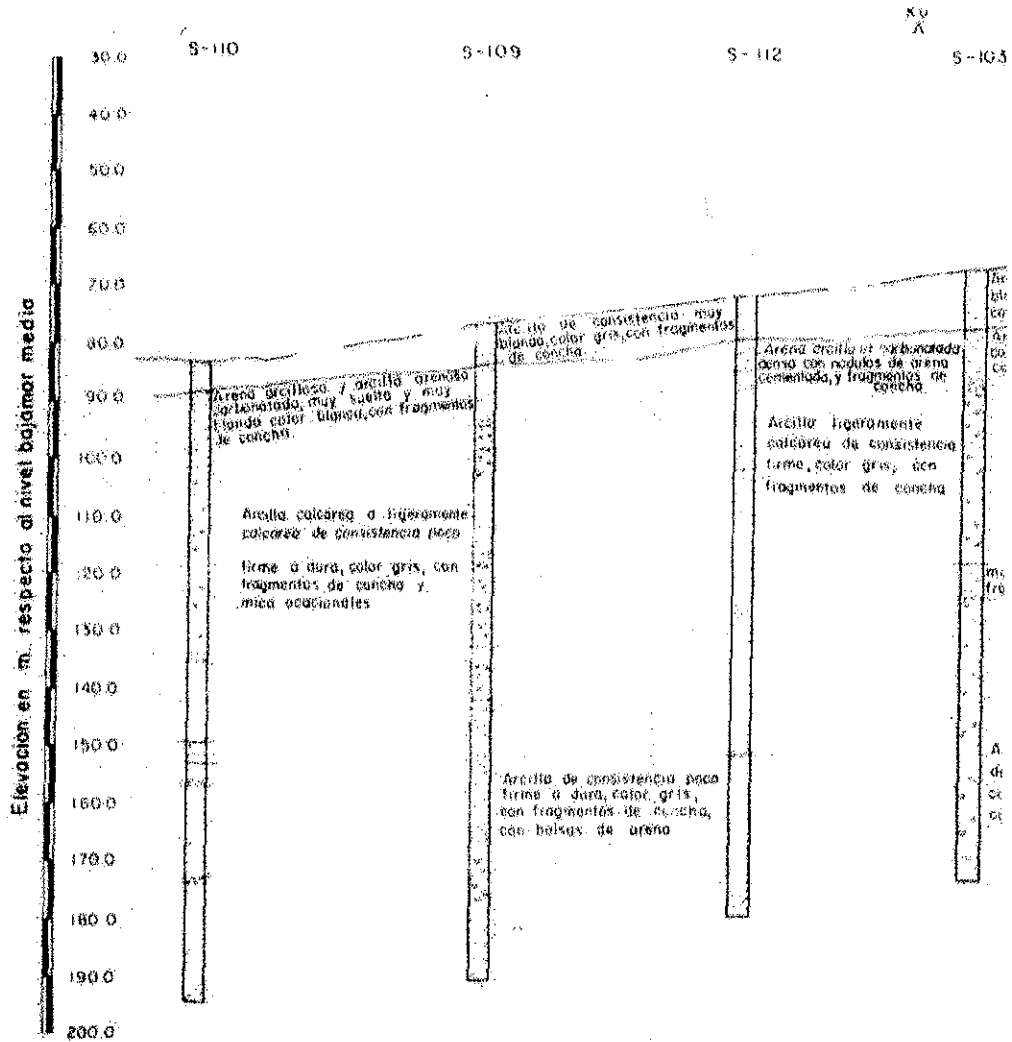
Tipo	Contenido de agua W% (aprox.)	Profundidad (m)		Descripción del suelo
I	66-100	0-18		<i>Arcilla de muy blanda a blanda gris, con fragmentos de concha.</i>
II	18-26	18-25		<i>Arena de gruesa a fina, carbonatada, de medio densa a densa, gris claro.</i>
III	33	25-35		<i>Arcilla de muy dura a firme, gris, con fragmentos de concha.</i>
IV	18-26	35-50		<i>Arena de gruesa a fina, carbonatada, de medio densa a densa, gris claro.</i>
V	34	50-70		<i>Arcilla muy firme gris con fragmentos de concha..</i>
VI	18-26	70-78		<i>Arena fina limosa, carbonatada, medio densa, gris, con fragmentos de concha.</i>
VII	29-33	78-95		<i>Arcilla muy firme a dura, gris, con fragmentos de concha.</i>
VIII	18-26	95-100		<i>Arena de gruesa a fina, carbonatada de densa a muy densa, gris.</i>
IX	36-40	100-115		<i>Arcilla de muy firme a dura, floculada, gris, con fragmentos de concha</i>
X	18-26	115-125		<i>Arena fina calcárea muy densa, gris, con fragmentos de concha</i>
XI	22-33	125-		<i>Arcilla de muy firme a dura, gris, con fragmentos de concha</i>

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



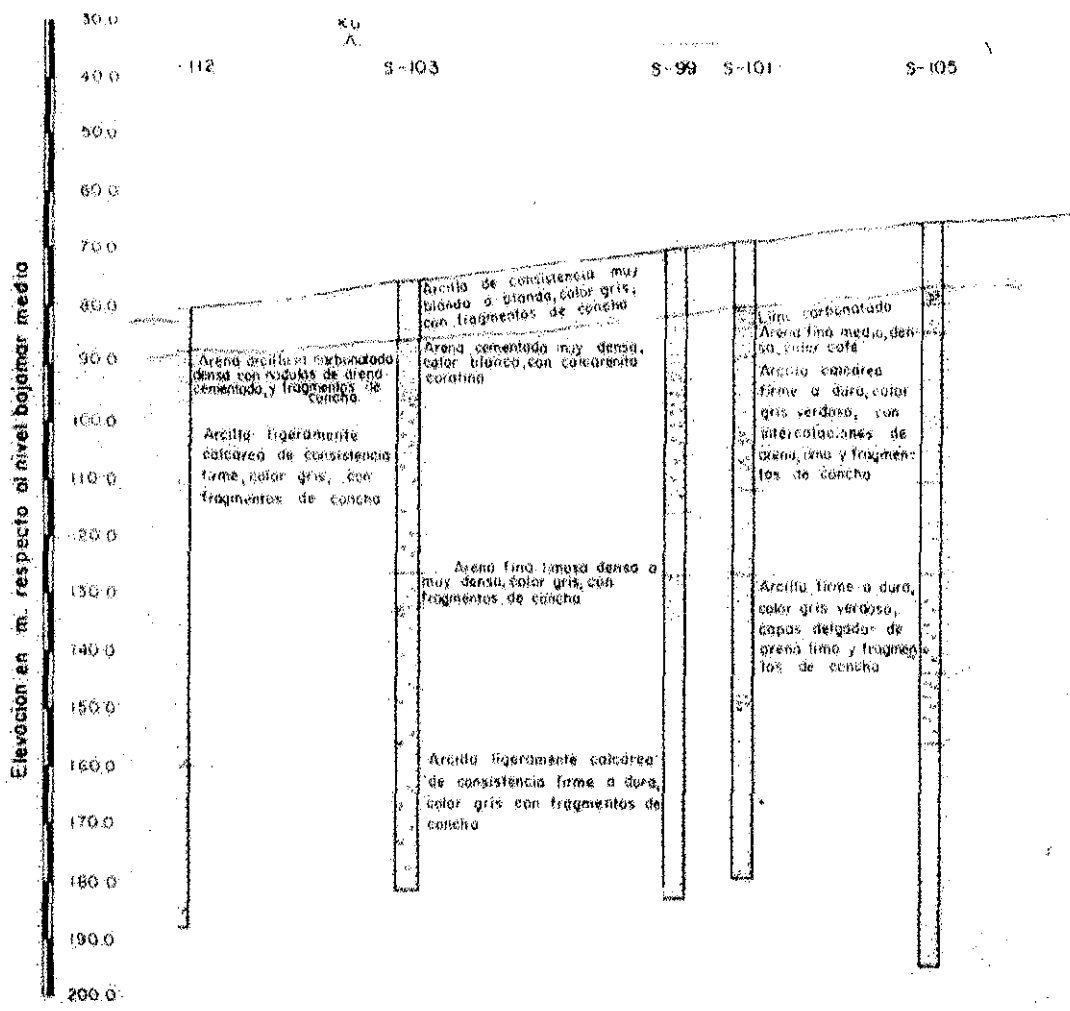
3.1.10 Corte estratigráfico de la sección A-A'

**TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN**



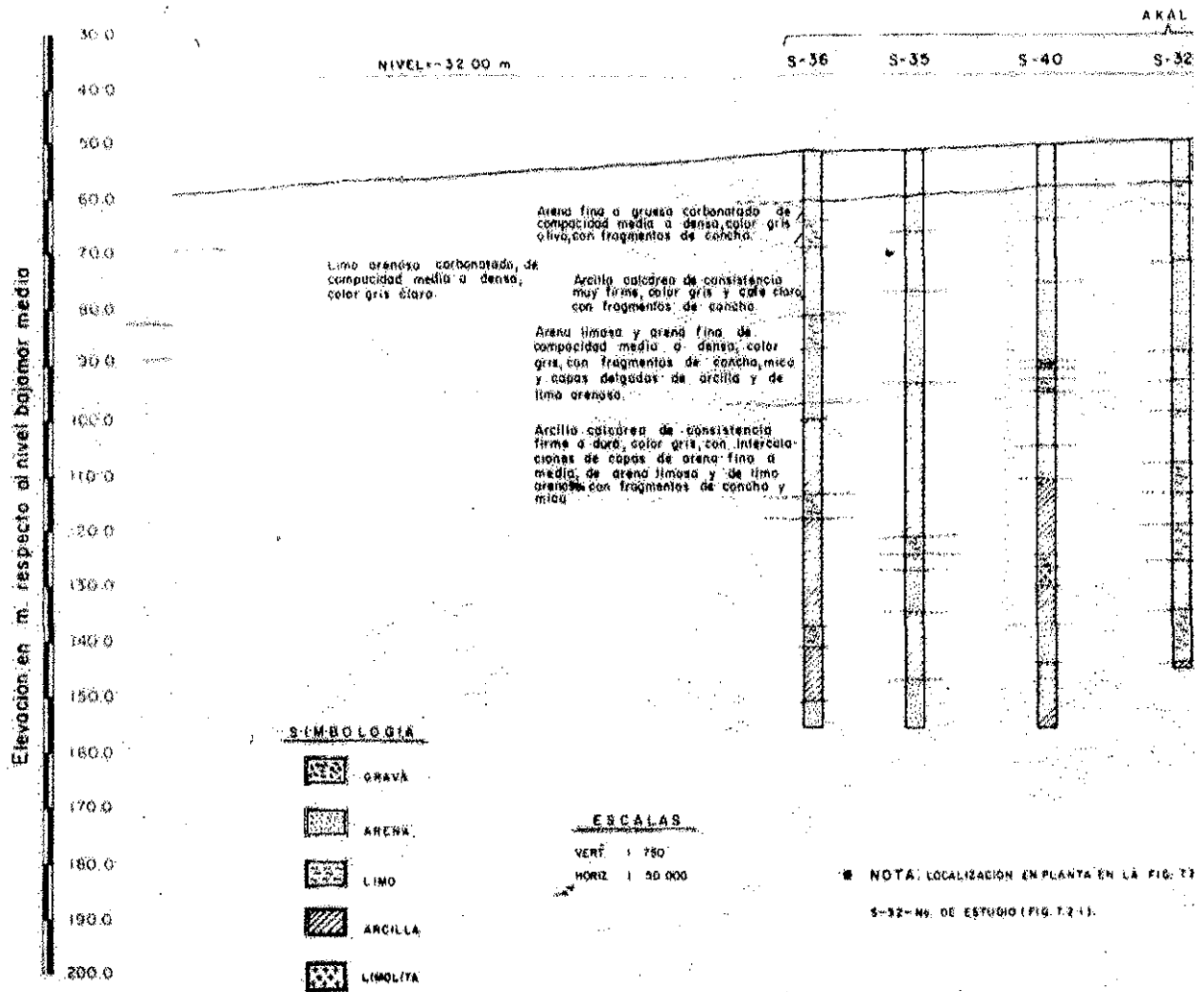
a) Corte A-A' parte 1

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



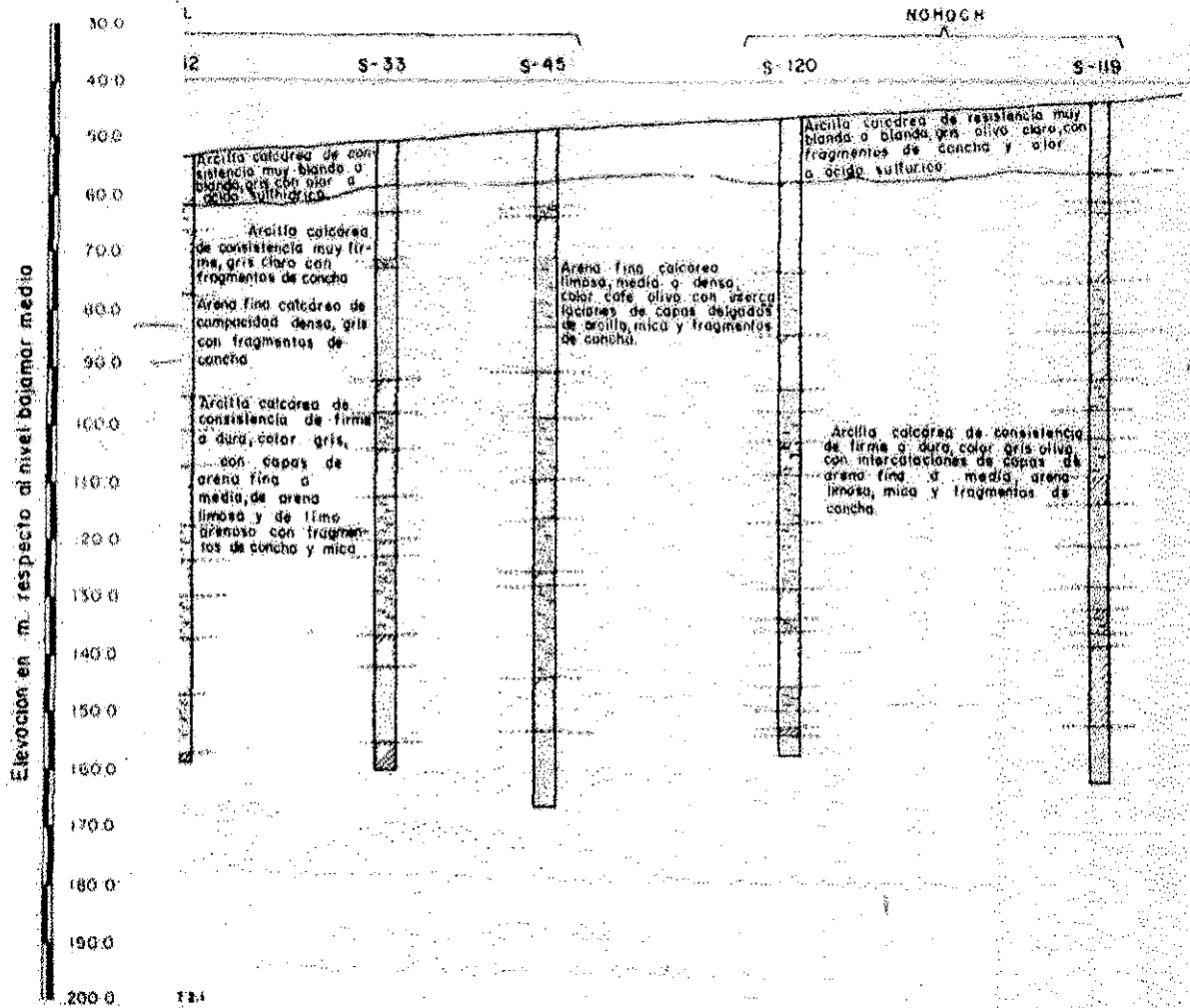
b) Corte A-A' parte 2

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



c) Corte A-A' parte 3

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



d) Corte A-A' parte 4

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

El torcómetro (un aparato que se opera manualmente) consiste en un disco metálico y veletas radiales delgadas que se proyectan desde la superficie. El dispositivo se presiona en forma manual contra una superficie plana del suelo hasta que las veletas penetran completamente. El aparato se rota por medio de un resorte de torsión hasta que el suelo falla por corte. El aparato está calibrado para medir la resistencia al corte sin drenaje directamente a partir de la rotación del resorte. El resultado de este ensaye está influenciado por la habilidad del operador, por lo que sus valores deben tomarse con reservas (figura 3.1.11).

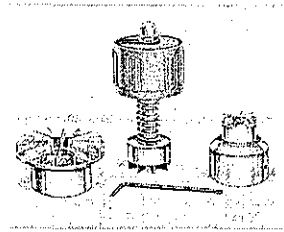


Figura 3.1.11 Torcómetro. Aparato para medir la resistencia al corte en el campo.

La veleta miniatura consiste en una veleta pequeña de 4 aspas que se introduce en una muestra de suelo cohesivo inalterado. Un par de torsión es aplicado a la veleta a través de un resorte calibrado activado por un sistema motorizado de polea y banda, causando la rotación lenta de la veleta hasta que ocurre la falla por corte. La resistencia al corte del suelo inalterado se calcula a partir de la fuerza de torsión transmitida por el resorte calibrado multiplicando la rotación neta en grados, por el factor de calibración del resorte. La resistencia máxima al corte sin drenaje que puede ser medida por la veleta miniatura es de 219 kPa (4.58ksf) figura 3.1.12.

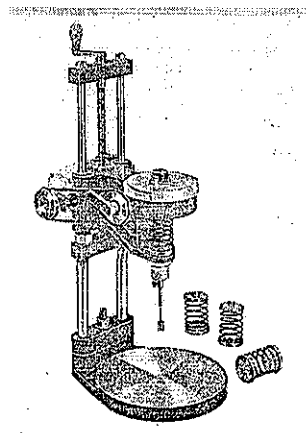


Figura 3.1.12 La veleta miniatura es un instrumento que mide la resistencia al esfuerzo cortante.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El ensaye de veleta miniatura es uno de los más representativos puesto que la fuerza aplicada es mecánica, disminuyendo así la influencia del operador. Si se compara con el torcómetro, la veleta arroja resistencias menores como se muestra en el apartado 3.2.3.a.

3.1.4. Selección de variables

Cualquier variable geotécnica puede ser utilizada como variable aleatoria para un análisis geostatístico. No obstante, se debe considerar en primer término cual es el objetivo del estudio para escoger la más adecuada que ayude a resolver el problema y la cantidad de datos disponibles.

El análisis de los 89 sondeos geotécnicos y de las características principales de la zona de estudio define que ciertas variables son más idóneas que otras, específicamente por la cantidad de valores disponibles y por la continuidad de muestreo y desde luego la capacidad que guarda para resolver el problema, pero no todas pueden ser analizadas puesto que el tiempo de cálculo es muy extenso y entre más variables se analizan, más recursos de computo se requieren.

El criterio de selección de las variables aleatorias por analizar se estableció considerando las aplicaciones a futuras investigaciones en los suelos de la zona en estudio.

La finalidad de este proyecto es la interpretación de la estratigrafía del subsuelo marino, por lo que se escogen las variables que caractericen la zona de estudio dentro de un contexto de propiedades índice y de resistencia. Una de las pruebas índice más solicitadas en geotecnia es el contenido de agua puesto que a partir de esta propiedad es posible inferir mediante correlaciones estadísticas las principales propiedades mecánicas. En este trabajo el contenido de agua tiene valores bien definidos en el subsuelo marino por lo que es posible proponer asociaciones de los estratos a contenidos de agua específicos como se observa en la tabla 3.1.3.

La resistencia al corte es la resistencia límite que el suelo presenta cuando es sometido a un esfuerzo. Se mide con los ensayos de veleta miniatura, penetrómetro, torcómetro, compresión no confinada y diversas pruebas triaxiales en condiciones especiales de confinamiento y de drenaje (UU, CU, CD) por mencionar las más usadas. El análisis de una resistencia al corte como variable aleatoria nos acerca al modelo de variación de la propiedad dentro del campo estudiado y finalmente a la obtención de los parámetros de diseño que se requieren para un análisis geotécnico.

Como tercera variable, se prestó una atención especial al espesor del primer estrato encontrado bajo el fondo marino por su importancia en problemas geotécnicos y debido a que el presente trabajo es la primera etapa de un análisis para detectar zonas de trampas de hidrocarburos entre el estrato superficial y el primer estrato subsecuente a éste, por lo que una estimación que modele la variación espacial del primer estrato y el inmediato inferior incluyendo posibles fallas que transporten el gas biogénico entrampado es un modelo aceptable en esta etapa de análisis.

a) Contenido de agua

El contenido de agua fue la variable aleatoria analizada en primer término. Para la selección de los valores a utilizar, inicialmente se hizo un estudio preliminar de los datos registrados en los perfiles presentados en los reportes geotécnicos, datos que se proporcionaron en formato analógico y que fueron digitalizados para poder ingresarlos a la base de datos. Analizando cada perfil se observó que, en algunos casos, los datos proporcionados eran escasos, por lo cual para incrementar el número de valores de esta variable, con espaciamentos verticales más cercanos entre sí (datos @ 15 cm en el estrato superficial y 50 cm en el sondeo del resto), se recurrió a determinar valores teóricos a través de la relación volumétrica siguiente:

$$w\% = \frac{G_s - (\gamma' + \gamma_{salada})}{G_s[(\gamma' + \gamma_{salada}) - 1]} * 100 \quad (3.1.1)$$

donde se entiende que:

- w = contenido de agua, %
- G_s = gravedad específica
- γ_{salada} = peso volumétrico, kN/m³
- γ' = peso volumétrico sumergido del suelo, kN/m³

La ecuación 3.1.1 se dedujo a partir de una ecuación reportada en los informes geotécnicos y se utiliza para estimar el peso volumétrico sumergido de las muestras obtenidas que permitan calcular valores representativos del contenido de agua donde no se tienen datos.

Cuando la gravedad específica no está reportada en los informes geotécnicos, se considera la variabilidad del peso específico sumergido y ésta se relaciona con los datos medidos del contenido de agua para obtener una gravedad específica que permita la obtención de más información en profundidades donde no hay un muestreo con la ecuación siguiente:

$$G_s = \frac{\gamma}{(1+w) - [(\gamma)(w)]} \quad \text{donde: } \gamma = \frac{\gamma' + \gamma_{salada}}{\gamma_{dulce}} \quad (3.1.2)$$

donde:

- w = contenido de agua, %
- G_s = gravedad específica
- γ_{salada} = peso volumétrico, kN/m³
- γ' = peso volumétrico sumergido del suelo, kN/m³

El objetivo de usar las correlaciones geotécnicas es introducir valores adecuados que representen un estrato existente no muestreado (sin datos), de lo contrario se genera una estimación no representativa del área de interés.

b) Veleta miniatura y torcómetro

La seguridad de cualquier estructura geotécnica de plataformas marinas depende de la resistencia al corte del suelo, la cual se requiere para calcular la capacidad de carga y la estabilidad en un análisis geotécnico de pilotes.

Las campañas de exploración geotécnica buscan definir perfiles de resistencia al corte, que se obtienen mediante ensayos de veleta miniatura y torcómetro. Sin embargo, debido a la escasez de datos en ciertas zonas, no es recomendable aplicar la técnica geoestadística usada en los perfiles del contenido de agua por lo que se sugiere una correlación entre las variables medidas.

El propósito de establecer una correlación entre las pruebas de resistencia como son la veleta miniatura y el torcómetro es para obtener un diagrama de dispersión gráfica y determinar si existe una relación lineal entre las dos variables analizadas. Entre más fuerte sea la relación lineal entre la veleta miniatura y el torcómetro, el valor obtenido estará más cerca de 1 o -1, cuanto más débil sea la relación, la correlación se acercará a cero. Además se obtendrá a su vez una tendencia que puede ser validada dentro de un modelo que se usará en un campo aleatorio para obtener la resistencia a lo largo del perfil estratigráfico. Es posible aplicar el concepto aplicado por Auvinet (1975), el cual especifica que cuando dos variables tienen cierto grado de correlación lineal es posible estimar una variable a partir de otra (análisis de predicción).

c) Variabilidad espacial geométrica del espesor del estrato blando

La geoestadística no se limita al estudio de las propiedades índice o mecánicas sino que se extiende al estudio de las características geométricas de los estratos típicos del suelo como la profundidad y el espesor (Juárez, 2000). En este caso, el análisis de la profundidad y el espesor del estrato blando superficial representan la misma variable. La técnica de estimación utilizada es el kriging ordinario en dos dimensiones (obtención de estimadores lineales insesgados) descrita en el capítulo 2.

El análisis particular de la zona superficial del lecho marino (donde se encuentra el suelo blando, de igual formación geológica) permite tipificarlo debido a las características inherentes de este estrato que se distinguen del resto del sondeo. El estrato está constituido por arcilla calcárea, color gris y gris olivo, de consistencia blanda a muy blanda, con fragmentos de concha y olor a ácido sulfúrico. El espesor de este estrato tiende a aumentar hacia el NW (PEMEX 1985).

Una comparación simplista entre la profundidad del estrato superficial y el análisis de la variabilidad del contenido de agua mayor a 50% se verá más adelante (apartado 3.3) en los cortes estimados.

3.2. Análisis estructural

El análisis estructural de una variable consiste en modelar cuantitativamente los parámetros de un campo aleatorio para estimar y simular la variabilidad espacial geométrica de las propiedades en estudio, las cuales para este trabajo son: el espesor del estrato blando superficial del lecho marino, el contenido de agua y la resistencia al corte. Estas variables permiten interpretar la estratigrafía del subsuelo marino en la zona de estudio.

3.2.1. Variabilidad espacial geométrica del espesor del estrato superficial

A continuación se describe la metodología aplicada a los parámetros del campo aleatorio y finalmente se presenta la estimación del espesor del estrato superficial; así como los resultados obtenidos.

a) Definición del campo aleatorio

El dominio de definición del campo aleatorio es la región superficial del lecho marino tipificada como una arcilla blanda formada a partir de deposiciones recientes, definida con claridad en cada perfil geotécnico disponible. El campo se representa por $V(X)$ dentro de un espacio, R^p , con $p=2$, como se definió en el capítulo 2 (figura 3.2.1).

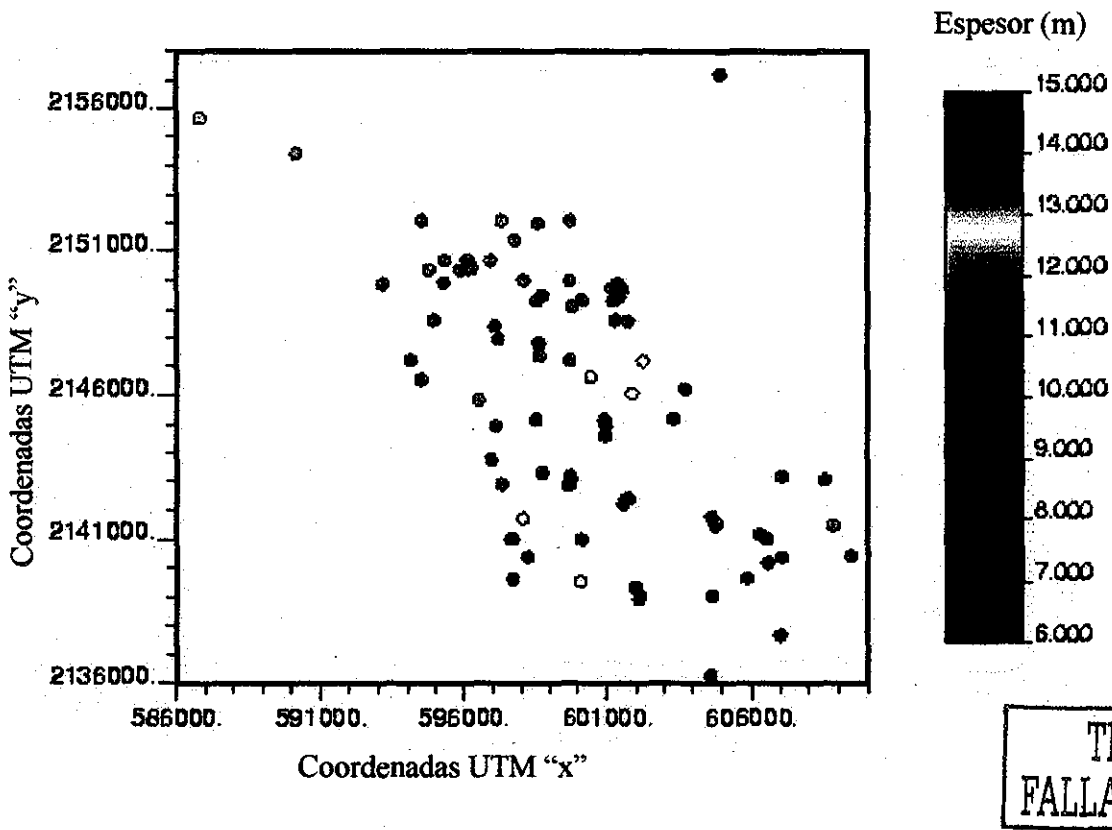


Figura 3.2.1 Distribución en planta de los 89 sondeos con su correspondiente espesor.

El estrato blando se define en términos de: altos contenidos de agua, avance por peso propio de herramienta durante el muestreo y baja resistencia al esfuerzo cortante. Este estrato se denomina para fines prácticos como: “*estrato superficial*”.

b) Descripción estadística

Los parámetros estadísticos que definen este campo aleatorio se muestran en la tabla 3.2.1:

Tabla 3.2.1 Variabilidad espacial del espesor del estrato blando.

Parámetros determinados	
Media	11.88m
Coefficiente de variación	32%
Mediana	10.85m
Moda	11m
Varianza de la muestra	14.81
Desviación estándar	3.84
Curtosis	7.86
Coefficiente de asimetría	2.30
Rango	22.2m
Mínimo	7.3m
Máximo	29.5m
No. de datos	88

Note que, las medidas de tendencia central son muy cercanas entre sí (del orden de 12 m), lo cual corresponde al espesor medio del estrato blando. La dispersión es relativamente pequeña (desviación estándar del orden de 4 m y el coeficiente de variación un poco mayor a 30%). Existe una gran acumulación de valores cercanos a la media como lo indica el valor de la curtosis.

c) Análisis de tendencia

Un análisis de tendencia pondera los espesores encontrados en cada sondeo para definir una dirección representativa en el campo aleatorio.

El análisis de tendencia, se realiza a través del ajuste por mínimos cuadrados a los datos de un plano, $Z = Ax + By + C$, donde las variables, x e y , corresponden a las coordenadas geográficas en la dirección norte y este, respectivamente, del estrato superficial reportado.

La ecuación que describe esta tendencia es:

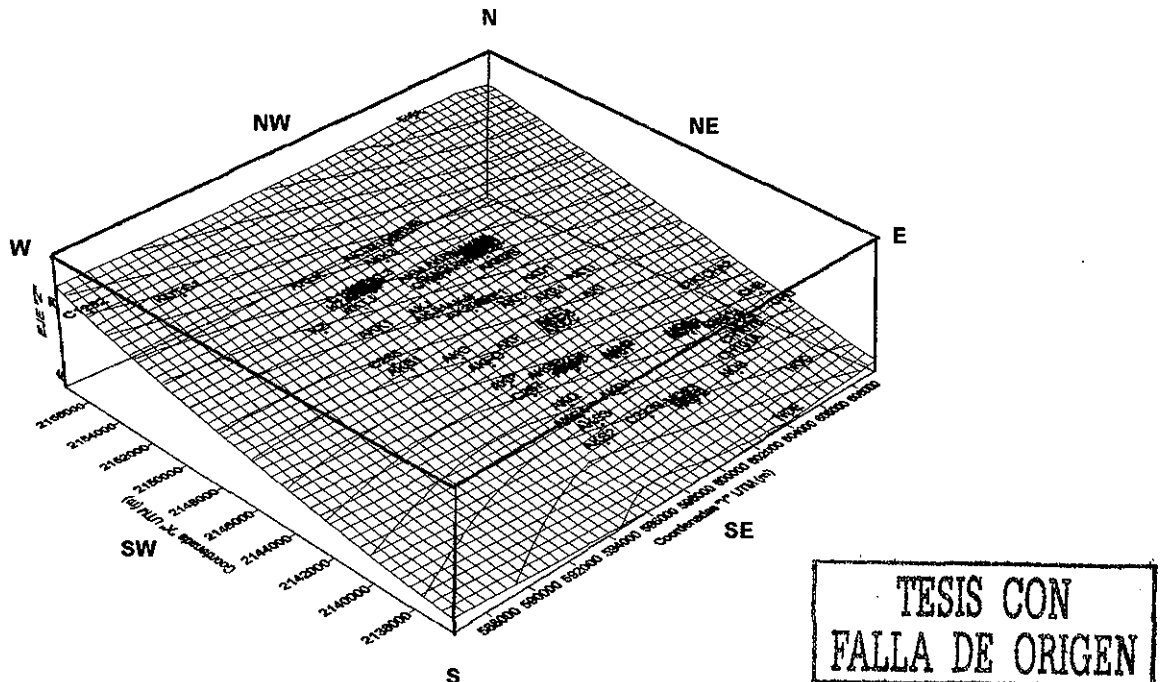
$$Z = 0.0001 x + 0.0004 y - 870.42 \tag{3.2.1}$$

En la figura 3.2.2, se muestran los puntos representativos del espesor de los sondeos considerados; además, se observa la traza del plano ajustado en el eje vertical, el cual indica

que al NW de la zona, se localizan los sondeos con menor espesor (sondeo C1292 con 9 m) mientras que con espesores mayores, (16 m) están los sondeos ubicados al SE.

Esta tendencia se debe a que, en la parte SE, hay mayor concentración de sondeos con sedimentos de gran espesor (como la depresión formada por los sondeos CH101A, CH101B, NOC2, CHA2, CHA1, con espesores de más de 20 m); mientras que la mayoría de los sondeos tienen un espesor medio de casi 12 m.

Esta tendencia se debe tomar en cuenta para el cálculo de los correlogramas y la estimación de la variabilidad geométrica.



3.2.2 Plano tridimensional de la tendencia de la base del espesor del estrato blando. La línea recta superior representa la superficie del lecho marino.

d) Funciones de variabilidad espacial

La función de correlación es un modelo cuantitativo de similitud (distancia de influencia) del espesor del estrato blando superficial de un sondeo con respecto a otro, graficada en una dirección o sentido. La distancia de influencia es el área bajo la curva del modelo de correlación ajustado (exponencial) cuando el coeficiente de correlación se aproxima a un valor muy cercano a cero (baja similitud y correlación)

El correlograma se obtiene con el programa *gamv.exe* del software GSLIB (Deutsch, 1992) en cuatro direcciones principales encontradas en el campo aleatorio, no necesariamente las convencionales: un azimut = 0° representa la dirección N, un azimut=35° la dirección NE-SW, un azimut = 90° la dirección E y el azimut =145° la dirección NW-SE (dirección de

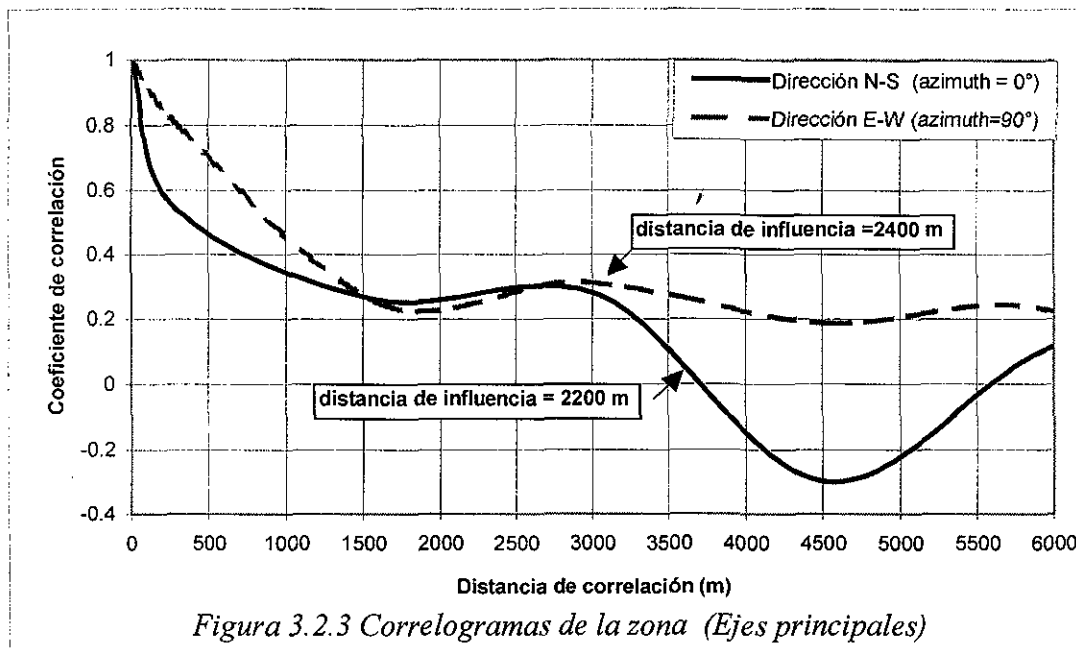
máxima variabilidad y dirección de la tendencia obtenida en el campo). El espaciamiento horizontal es de 500 m, en sendas direcciones y con una tolerancia de ancho de banda de 250 m. Estas direcciones son suficientes para el análisis de todo el campo debido a que cubren todas las tendencias posibles definidas para la zona de estudio. Las figuras 3.2.3 y 3.2.4 presentan los correlogramas resultantes del análisis efectuado.

- **Correlogramas en dirección N-S y E-W**

En la figura 3.2.3 se observa la variabilidad del espesor del estrato blando con relación a la distancia de correlación horizontal calculada en dos ejes principales (N-S y E-W).

Distancia de influencia en la dirección N-S (eje x) = 2200 m
Distancia de influencia en la dirección E-W (eje y) = 2400 m

Se observa que las dos direcciones tienen distancias de influencia parecidas, sin embargo, la dirección E-W es ligeramente mayor, por 200 m.



- **Correlogramas en dirección NE-SW y NW-SE**

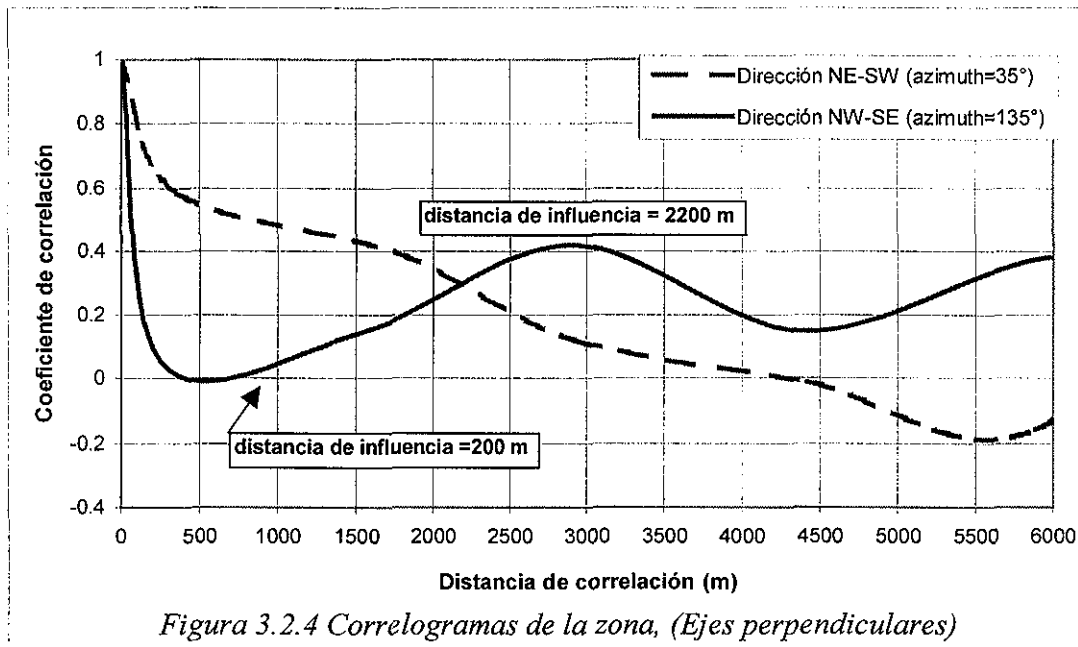
Las direcciones NW-SE y NE-SW se analizan debido a que la primera dirección es la tendencia que mantienen los datos conocidos, la cual coincide con la pendiente del lecho marino (batimetría) como dirección principal. Por su parte, la segunda dirección es perpendicular a ésta, y no presenta gradiente de variación batimétrica por estar a lo largo de las curvas de nivel. En la figura 3.2.4, se muestran las distancias de influencia para esas direcciones:

Distancia de influencia en la dirección NW-SE = 200 m

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Distancia de influencia en la dirección NE-SW = 2200 m

La dirección principal NW-SE muestra una distancia de correlación muy pequeña, con respecto a las demás direcciones. Este es el comportamiento esperado, debido que en esa dirección se tiene la mayor variabilidad espacial de espesor del estrato blando. En contraste, en la dirección NE-SW, ese espesor no varía a lo largo de un par de kilómetros porque la pendiente es muy pequeña.



- **Representación en planta de la variabilidad**

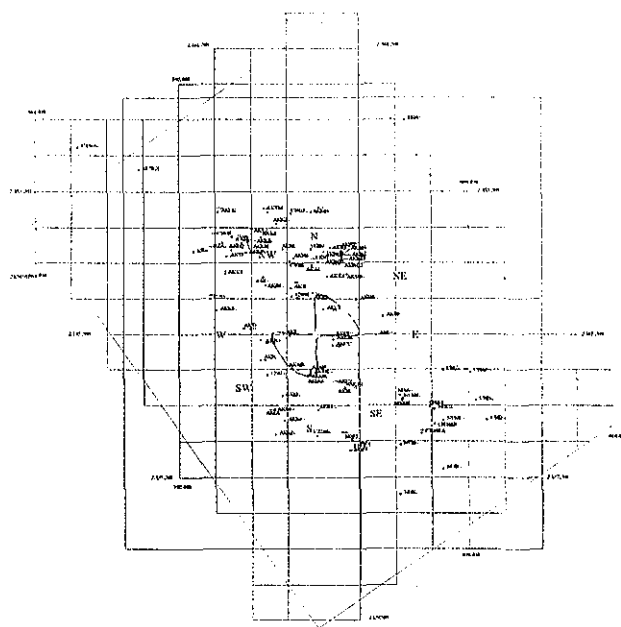
Con el propósito de visualizar en planta la variabilidad del espesor del estrato blando considerando los ejes analizados en los correlogramas, se graficaron las distancias horizontales de influencia encontradas, tomando al origen coordinado como punto de simetría, lo cual constituye la anisotropía que tiene el campo aleatorio en esas direcciones (figura 3.2.5).

e) Estimación de la variabilidad espacial

Para valorar la variabilidad espacial del espesor del estrato blando se aplicó la técnica de estimación lineal (kriging ordinario), la cual encuentra el mejor estimador a partir del dominio definido en las coordenadas: (586000, 2136000) y (610000, 2158000) de la región de estudio.

Primero se introducen los valores puntuales conocidos de los distintos espesores sobre una malla de interpolación, y a continuación, usando el modelo obtenido de los correlogramas y la tendencia que describen la variabilidad de los espesores, se obtienen los valores desconocidos en lugares no muestreados.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Figura 3.2.5 Modelo anisótropo de la variación geométrica del espesor del estrato blando.

En la figura 3.2.6.a se representa en planta la distribución del espesor del estrato blando (utilizando curvas de isoespesor) incluyendo la localización de los 89 sondeos en el dominio de estudio, y en la figura 3.2.6.b se observa una representación 3D del espesor del estrato blando.

En las gráficas se observa que en las zonas N y NE hay espesores menores de 10 m, mientras que en las zonas S, SE y SW los espesores son mayores de 14 m. En la zona central con dirección NE-SW se mantienen los espesores medios entre 10 y 14 m.

El espesor del estrato blando estimado concuerda con el intervalo de los contenidos de agua mayores (66 a 100%) registrados en la estratigrafía típica del área de estudio. Lo anterior se aprecia en los cortes definidos a lo largo de las líneas señaladas, en la figura 3.2.6 (cortes del A al H) que se presentan más adelante en 3.2.2.

El resultado de una estimación siempre va asociado a un error de estimación que se expresa mediante una desviación estándar. La gráfica de la desviación estándar que se observa en la figura 3.2.7 (mapeo y 3D, respectivamente) presenta zonas circulares de valores con muy baja desviación estándar, (menor a 1%, zonas de luz), las cuales concuerdan con las zonas donde se encuentran ubicados los sondeos conocidos, por lo que se verifica la incertidumbre asociada, la cual siempre es muy baja en los "focos de luz" correspondientes al área de influencia de dichos sondeos. Las zonas externas tienen mayores desviaciones estándar (de 1.1 a 1.5%), lo cual constituye una base para decidir respecto a la conveniencia de sondeos adicionales.

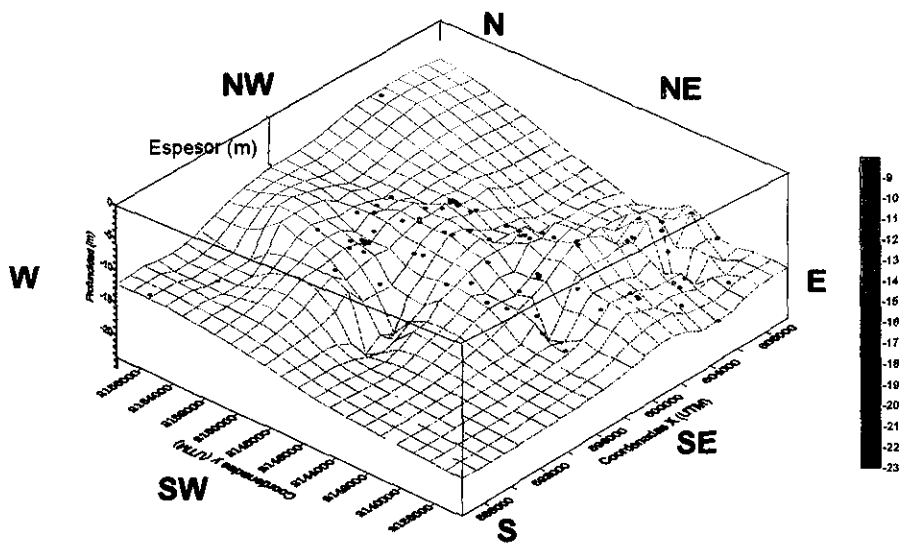
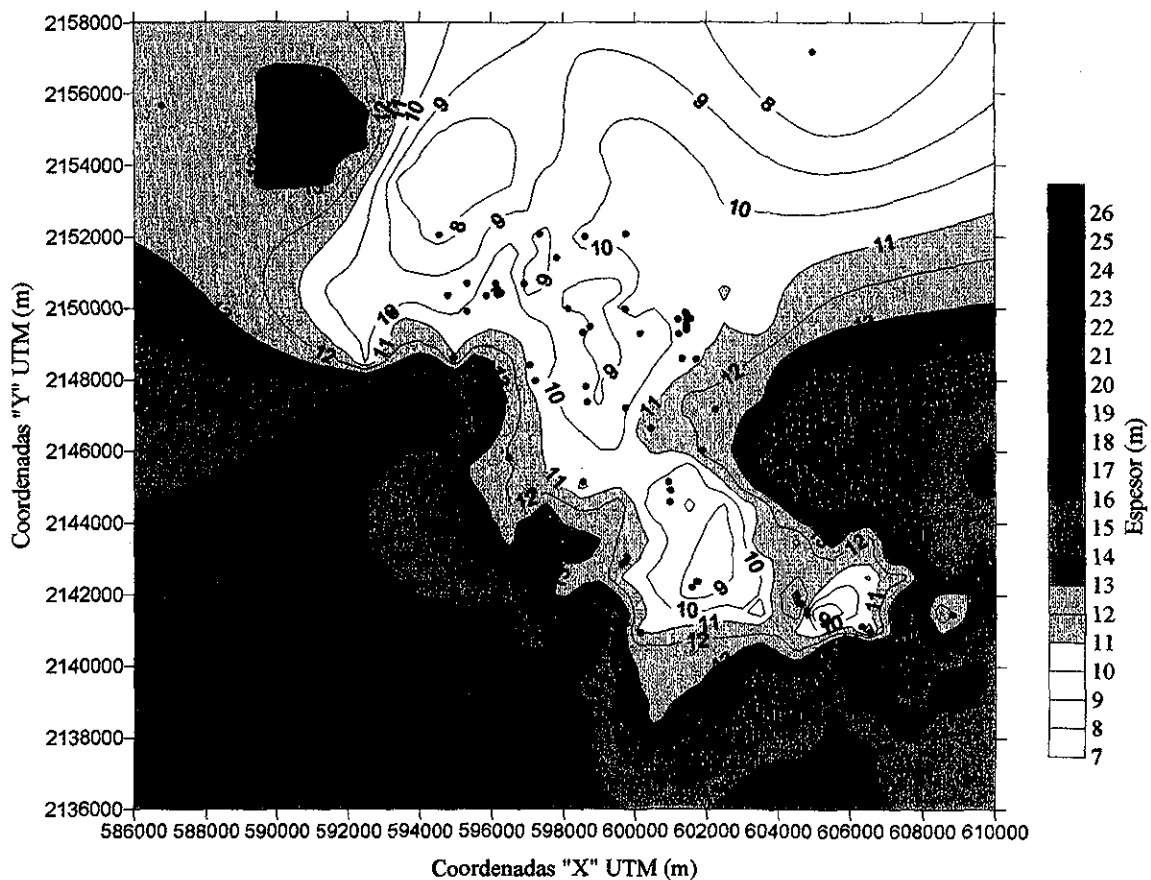


Figura 3.2.6 Estimación de la variabilidad espacial geométrica del espesor del estrato blando, a) en planta y b) en 3D.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

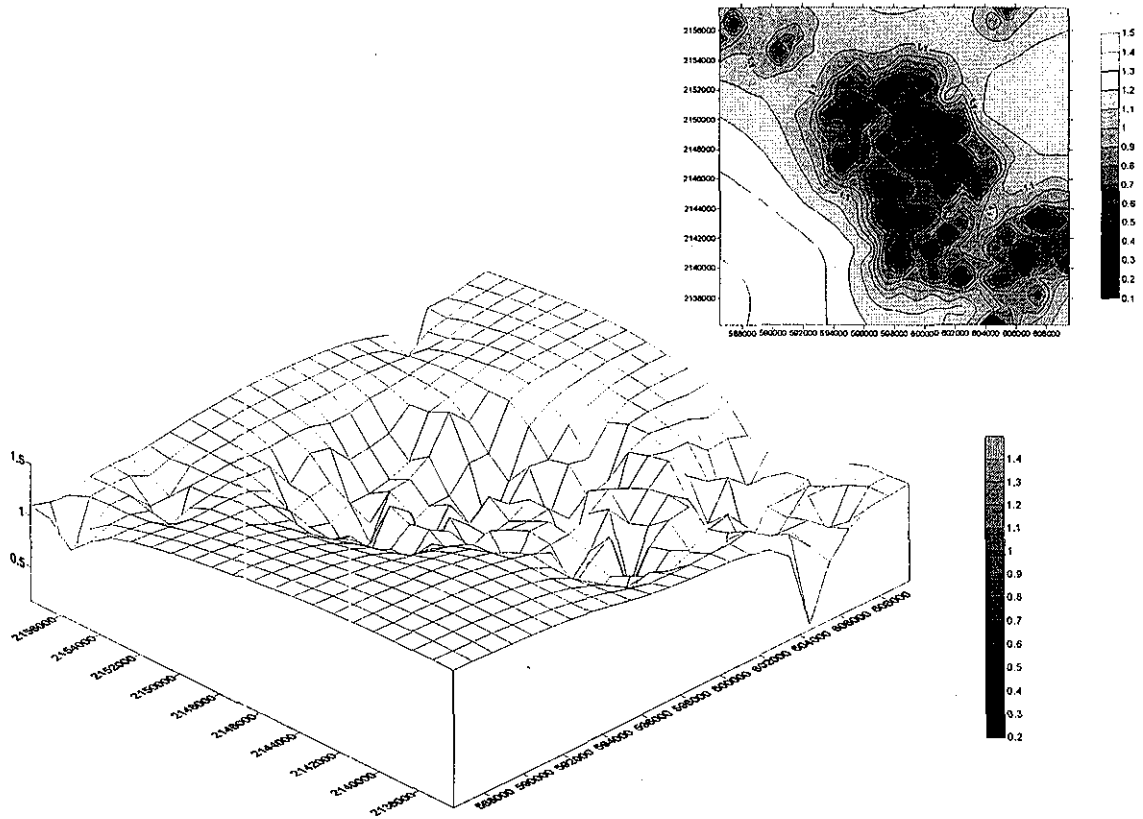
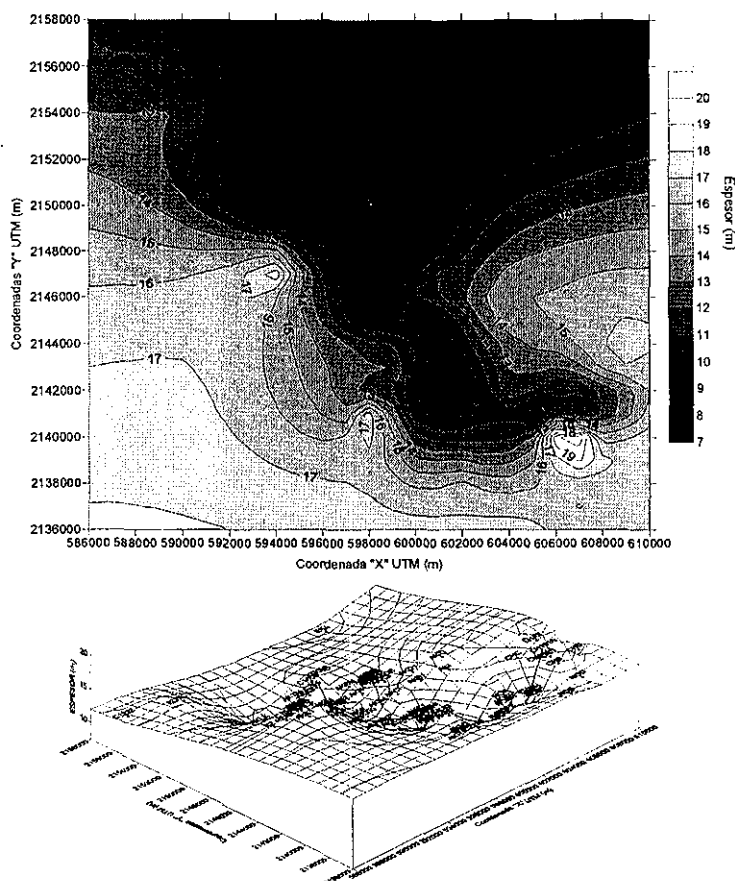


Figura 3.2.7 Desviación estándar de la variabilidad espacial del estrato blando en planta (recuadro izquierdo) y perspectiva (central).

f) Simulación de la variabilidad espacial

Para la simulación de la variabilidad espacial del espesor del estrato blando, se aplicó la técnica de simulación estocástica de Monte Carlo simple (se explica ampliamente en el inciso 2.2.7). El dominio está definido en las coordenadas: (586000, 2136000) y (610000, 2158000) de la región de estudio.

La simulación que se representa en la figura 3.2.8, es sólo una posible realización de la variabilidad espacial del espesor del estrato blando, en la cual se observan las zonas conflictivas identificadas a través de valores extremos, en este caso, localizadas en la dirección NW-SE y parte del NE del área de estudio con espesores que varían entre 7 y 11 m, por debajo del promedio del campo aleatorio. Es necesario recordar que se deben generar tantas simulaciones como sean necesarias a fin de detectar todas las posibles zonas de valores extremos, con el fin de que estos resultados puedan ser útiles para la toma de decisiones de la investigación del sitio.



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Figura 3.2.8 Simulación de la variabilidad del espesor del estrato blando, a) en mapa y b) en 3D.

3.2.2. Contenido de agua

La propiedad índice del contenido de agua es la primera variable que se sugiere analizar en un estudio geoestadístico debido a la vasta información que se genera a partir de ella y la multitud de correlaciones que se pueden utilizar para caracterizar un suelo con las condiciones de erraticidad más marcadas.

Primeramente, se obtiene un histograma general para observar las características estadísticas de los 89 sondeos geotécnicos (perfiles convencionales de contenido de agua), encontrándose que dos máximas frecuencias son las que predominan de forma muy bien delimitada (figura 3.2.9).

El histograma general presenta dos poblaciones que se distinguen con la forma bi-modal, correspondiendo las frecuencias mayores a contenidos de agua de 30% y 80%. La primera población se ubica entre 6% y 54% los cuales corresponden a los valores representativos del contenido de agua en todo el sondeo, sin tomar en cuenta el estrato superficial. La segunda población está entre 54% a 96% y se asocia a contenidos de agua del estrato

superficial que se encuentra a partir del lecho marino característico en esta zona (como se observa en el perfil típico de la estratigrafía de la Sonda de Campeche, tabla 3.1.2). Las frecuencias mostradas corresponden a la cantidad de datos ponderados dentro de las barras del histograma, por lo que las mayores frecuencias corresponden a los datos del resto del sondeo y las menores son las del *estrato superficial*.

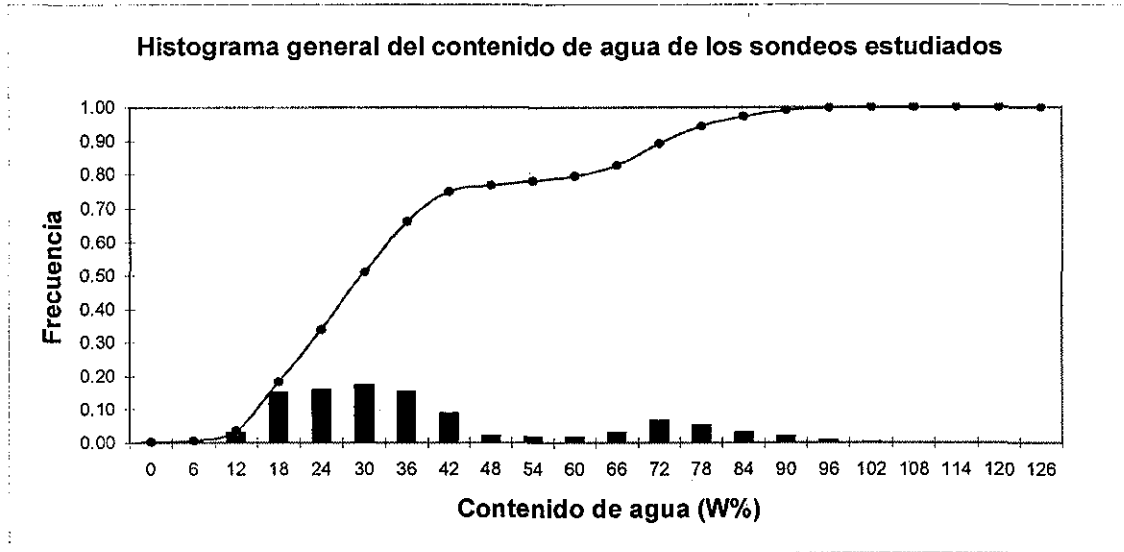


Figura 3.2.9 Histograma que contiene las dos poblaciones de los valores del contenido de agua y la curva CDF.

Este primer planteamiento obliga a analizar las dos poblaciones en forma separada y a la vez simplifica los modelos probabilísticos que resulten del análisis estructural geostadístico. Por tal motivo se consideran en forma separada la primera población con contenidos de agua mayores a 50% como *estrato superficial (ES)* y la población con valores menores a 50% como *estratos profundos (EP)*.

a) Descripción de los perfiles del contenido de agua

En la mayoría de los perfiles analizados de los 89 sondeos geotécnicos se tiene la presencia del estrato blando en la superficie del lecho marino y en los estratos subyacentes se observa una interestratificación de materiales arcillosos con suelos de tipo granular como arenas y limos de tipo cementado como el perfil típico mostrado en la tabla 3.1.2.

Los datos se agrupan en dos perfiles, uno correspondiente al *ES* y el otro al *EP*, y se observa que hay una tendencia representativa de acuerdo con la cual, el contenido de agua disminuye con la profundidad (figura 3.2.10). Sin embargo, un análisis a detalle muestra que mientras que el contenido de agua del *estrato superficial* siempre disminuye con la profundidad, para los *EP*, existen dos modelos de variación:

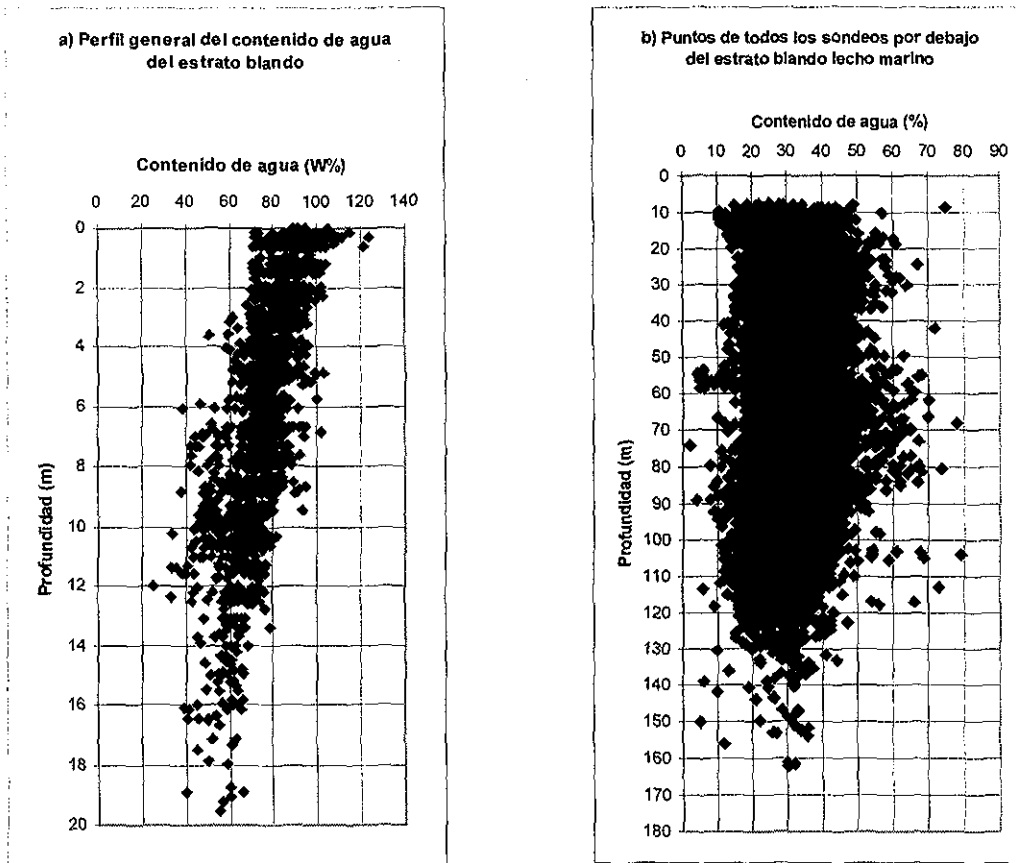
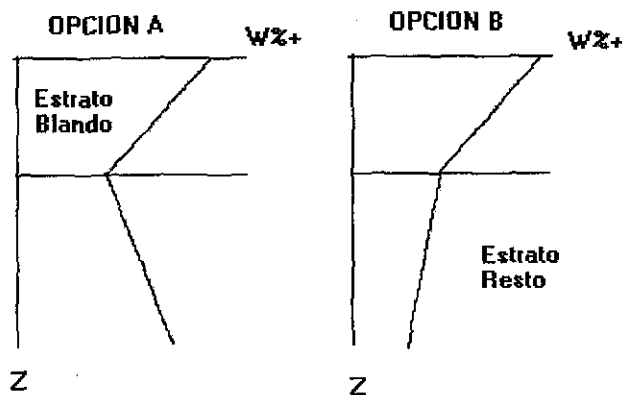


Figura 3.2.10 Contenido de agua de todos los sondeos, en la gráfica (a) se puede apreciar los pertenecientes al estrato blando y en la gráfica (b) los del resto que empiezan entre un promedio de 11 a 20 m de profundidad y llegan hasta los 160 m de profundidad total.



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Figura 3.2.11 Modelos de variación del contenido de agua con respecto a la profundidad.

La mayoría de los sondeos presenta la opción B, disminución del contenido de agua con respecto a la profundidad, no obstante algunos sondeos bien identificados presentan la

opción A, un aumento del contenido de agua con la profundidad, los cuales son: AKBC1, AKBC2, AKBE, AKBP, AKBQ1, AKBQ2, AKCC, AKF, AKFO, AKG1, AKK1, AKLH, AKLP, AKLQ, AKLK, AKM, AKMB, AKN1, AKO, AKS1, AKS2, AKTJ, AKTM, C1046, C1292, C255, CH101B, EKA, KZA, NOD y NOF1. Al parecer estos sondeos no siguen un patrón de ubicación definido (figura 3.2.12), sin embargo la mayoría se localizan en el extremo NW de la zona de estudio.

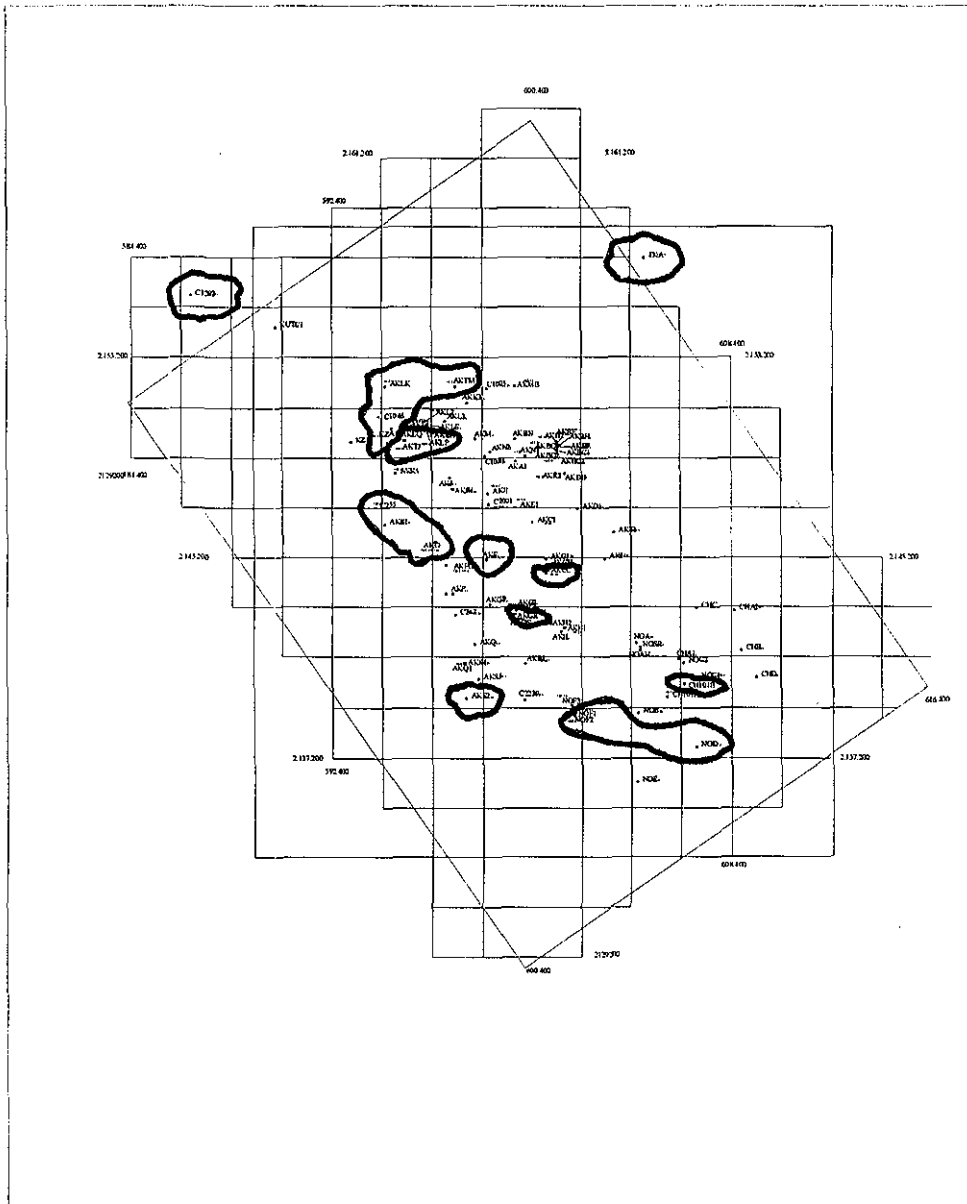


Figura 3.2.12 Opción A. Estratos profundos donde el w% aumenta con la profundidad.

b) Caracterización gráfica y numérica

- **Estrato superficial**

El análisis mediante estadística descriptiva de cada sondeo del *ES* (tabla 3.2.2) muestra que en su población característica el valor medio del contenido de agua es de 77.16% variando entre 65% y 92% .

La desviación estándar varía entre 2.5% y 15.40% , siendo el promedio de todos los valores un 9.21%; el coeficiente de variación se ubica entre 0.03 y 0.25 y con un promedio de 0.12 en general para todos los sondeos.

Comparando los histogramas resultantes del estrato superficial, se observa que presentan un comportamiento muy similar debido a que las mayores frecuencias varían en un intervalo de clase de 66% a 78% y muestran un comportamiento de distribución de probabilidad de tipo normal en la mayoría de ellos, característica de un campo homogéneo.

- **Estratos profundos**

Asimismo, el promedio del contenido de agua para los *EP* varía entre 22% y 40.3% y el contenido de agua medio de todos los sondeos es de 31.7%.

La desviación estándar varía entre 4.8% y 10.4% con promedio para todos los sondeos de 8.16%. Por su parte el coeficiente de variación presenta valores comprendidos entre 0.12 y 0.35 (tabla 3.2.2).

c) Evaluación de la tendencia

La tendencia o deriva del contenido de agua con la profundidad puede ser representada con la ecuación $W\% = mZ + b$, donde W es el contenido de agua y Z la profundidad,

- **Estrato superficial**

El análisis de tendencia del *ES* muestra que el contenido de agua disminuye con la profundidad; la variación de los coeficientes m y b se muestra en la tabla 3.2.2. La mayor pendiente m encontrada es de -6.32 en el sondeo EKA y el menor valor de este parámetro (contenido de agua casi uniforme) es de -0.27 en el sondeo NOF3. El término independiente b se mantiene entre 73.4 y 103.8 (figura 3.2.13).

- **Estratos profundos**

En el caso de los *EP*, el contenido de agua aumenta con la profundidad en algunos sondeos y en otros disminuye. El sondeo donde más disminuye con una pendiente de -0.16 es C1046 y el sondeo donde más aumenta con la profundidad es CHD con 0.19. Para el grupo restante, la deriva, m , es muy pequeña. El término independiente, b , varía entre 23.5 y 42 (tabla 3.2.2, figura 3.2.14).

Tabla 3.2.2 Resumen de la estadística descriptiva y del análisis estructural de los 89 sondeos.

Clase	SUPERFICIAL				BONDO DEL BOMBEO				Ecuación lineal superficial				Ecuación lineal del resto				Función exponencial E ₀			
	Medio	Varianza	Dev. Std.	Vz.	Medio	Varianza	Dev. Std.	Vz.	a	b	r _s	b	superficial	Residuo	coef. de inf.	resto	Residuo	coef. de inf.		
AKA1	81.08	75.10	8.67	0.11	31.70	87.50	9.22	0.25	-3.49	95.2	-0.05	36.0	-2.14	80	0.9	-0.37	72.9	5.4		
AKA200	84.70	81.50	7.84	0.09	33.10	73.80	8.80	0.28	-2.71	94.5	-0.01	33.1	-1.25	79.5	1.6	-0.31	67	6.5		
AKB1	78.37	59.01	7.67	0.09	29.26	83.13	9.17	0.27	-2.14	92.6	-0.10	32.8	-0.89	90	2.0	-0.24	74	5.3		
AKB2	74.86	127.10	11.30	0.15	30.03	66.49	8.10	0.27	-4.14	84.0	-0.04	32.7	-1.94	89.7	1.7	-0.26	78.9	7.1		
AKB21	78.26	111.59	11.47	0.15	34.20	65.10	7.40	0.27	-2.78	95.8	0.07	35.9	-0.89	87.3	2.1	-0.32	80	6.3		
AKB22	78.30	57.87	8.10	0.12	34.70	65.60	6.90	0.12	-2.58	92.7	-0.05	34.3	-1.45	90.3	1.4	-0.36	69	5.8		
AKB6	79.50	109.86	10.34	0.13	34.40	81.20	9.80	0.28	-3.13	95.7	0.01	35.0	-2.97	87.5	0.7	-0.25	76.5	8.0		
AKB4	73.49	131.49	11.48	0.16	33.50	76.20	7.00	0.25	-3.50	91.2	-0.005	32.7	-2.11	81.3	0.9	-0.38	61.3	5.6		
AKB8	78.57	67.00	8.24	0.10	35.20	87.00	9.40	0.27	-2.87	93.4	0.05	32.8	-1.97	84.2	1.0	-0.35	77	5.7		
AKB201	74.50	119.30	10.90	0.14	33.17	65.90	6.12	0.24	-3.31	93.4	0.03	32.3	-1.28	79.8	1.6	-0.28	81.8	7.1		
AKB27	78.30	83.60	9.15	0.12	36.27	85.74	9.26	0.28	-2.89	93.5	0.06	34.1	-3.47	72	0.6	-0.43	83.4	4.7		
AKB28	78.30	48.00	6.93	0.09	29.26	89.50	6.34	0.28	-2.72	93.0	-0.06	38.2	-2.06	85.7	1.0	-0.28	82.8	7.7		
AKC1	81.30	77.50	8.80	0.11	27.00	55.49	7.45	0.28	-2.90	86.0	-0.07	31.9	-1.55	84.9	1.3	-0.28	89.3	7.1		
AKC5	82.10	44.90	6.99	0.09	29.15	91.93	7.87	0.27	-2.26	94.2	0.04	38.5	-2.14	80.2	0.9	-0.35	84.6	5.7		
AKC8	72.09	238.70	15.40	0.21	31.81	102.21	10.11	0.32	-3.36	86.0	-0.02	32.9	-1.14	88	1.8	-0.16	88.9	12.5		
AKC11	82.20	47.40	6.88	0.08	30.30	63.00	6.99	0.28	-2.71	94.3	-0.05	33.6	-3.09	87.4	0.6	-0.29	84	6.9		
AKD1	77.20	151.80	13.30	0.19	32.68	59.10	7.00	0.28	-3.14	97.0	-0.04	35.2	-0.8	81.4	2.2	-0.32	66.5	6.3		
AKD5	76.40	82.80	8.45	0.12	31.34	37.70	7.30	0.22	-2.57	90.1	-0.02	34.6	-1.86	85.6	1.2	-0.32	82.4	8.3		
AKE1	81.10	122.49	11.72	0.14	37.03	49.50	6.83	0.18	-3.54	88.2	-0.03	39.8	-1.91	76.5	1.0	-0.14	88	14.3		
AKF	81.20	51.80	7.50	0.09	34.70	42.44	6.90	0.10	-2.44	93.0	0.03	33.8	-0.45	85.3	4.4	-0.34	78.3	5.9		
AKF0	78.20	22.28	4.83	0.06	31.50	45.20	6.70	0.21	-1.35	89.5	0.03	29.9	-2.32	91.4	0.9	-0.42	74.7	4.8		
AKG1	82.07	45.90	6.78	0.08	32.04	69.29	6.37	0.24	-2.14	95.1	0.00	32.1	-0.65	85.8	3.1	-0.12	80.1	18.7		
AKG2	78.09	7.19	2.68	0.03	32.50	84.50	8.04	0.24	-3.70	82.7	-0.03	35.2	-0.78	75.9	2.8	-0.32	85.7	5.3		
AKG3	72.80	87.30	9.20	0.11	31.80	59.50	7.30	0.23	-1.92	87.4	-0.03	33.7	-4.21	79.1	0.8	-0.4	85.4	3.0		
AKG5	72.90	123.08	11.90	0.14	31.51	74.28	8.73	0.28	-2.20	92.8	-0.12	30.2	-1.14	80.1	1.8	-0.32	80.5	19.7		
AKG8	75.74	83.20	9.12	0.13	29.14	78.95	8.77	0.25	-1.84	84.5	-0.11	35.7	-1.85	82.4	1.8	-0.32	81.4	15.4		
AKH	81.50	22.80	5.70	0.07	29.10	95.12	9.25	0.34	-2.32	98.8	-0.10	33.0	-3.08	75.5	2.8	-0.18	90.6	11.1		
AKH1	82.30	44.50	6.67	0.08	28.00	79.80	6.40	0.30	-2.57	93.2	-0.14	36.9	-2.49	78.8	0.9	-0.41	84	4.9		
AKH4	75.50	18.30	4.30	0.06	27.50	89.00	8.35	0.30	-1.40	81.2	-0.09	33.4	-5.46	81.1	0.4	-0.45	78.9	4.4		
AKI	78.70	62.18	7.88	0.10	32.20	69.00	7.70	0.24	-2.07	91.6	-0.10	38.9	-3.22	78.3	0.8	-0.18	93.3	12.5		
AKI1	80.00	111.90	10.80	0.13	33.12	73.09	6.55	0.26	-3.68	88.8	-0.01	34.9	-0.42	89.8	4.8	-0.28	85.4	7.7		
AKI4	77.70	92.30	9.92	0.13	33.52	72.07	6.90	0.25	-3.25	94.7	-0.01	34.4	-1.97	84.2	1.0	-0.21	92	9.5		
AKJ	81.72	65.04	8.08	0.10	26.78	68.56	6.28	0.28	-3.27	86.6	-0.03	32.8	-3.59	86.3	0.6	-0.22	88.0	7.4		
AKJ1	82.68	37.40	6.90	0.11	34.45	94.35	9.14	0.29	-3.36	88.0	0.07	30.9	-1.78	70.9	1.1	-0.24	86.7	9.3		
AKJ2	72.50	149.20	12.90	0.15	30.94	75.58	8.68	0.28	-3.78	90.9	-0.04	34.5	-4.21	78.1	0.6	-0.31	85.8	6.5		
AKJ3	81.08	38.40	6.90	0.09	31.20	102.20	10.11	0.32	-1.30	97.0	-0.07	37.4	-2.23	74.4	0.9	-0.22	86.9	6.1		
AKJ4	81.60	122.27	11.31	0.14	34.83	59.45	6.97	0.29	-3.68	101.3	0.00	34.7	-2.89	74.5	0.8	-0.23	81.7	8.7		
AKL2																				
AKL3	80.50	51.60	7.18	0.09	31.35	107.47	10.37	0.33	-3.05	91.9	-0.04	31.4	-1.80	72.7	1.0	-0.28	84.7	7.7		
AKL6	77.20	180.20	13.40	0.17	34.95	75.47	6.88	0.25	-3.92	100.0	0.04	33.3	-1.93	77.7	1.0	-0.22	88.4	7.4		
AKM1	78.30	151.90	12.30	0.16	34.15	71.80	6.90	0.26	-3.87	104.0	0.08	29.2	-4.09	87.7	0.5	-0.24	87.8	8.3		
AKM4	80.50	72.09	8.42	0.11	33.98	87.34	6.21	0.24	-2.45	94.3	0.01	33.4	-1.28	83.8	1.1	-0.3	79.8	8.7		
AKM6	78.60	181.80	12.72	0.16	33.80	71.32	6.45	0.25	-3.86	99.7	0.05	31.2	-2.30	70.8	0.9	-0.3	80.6	9.7		
AKM8	73.50	69.80	8.38	0.11	34.08	73.99	6.90	0.25	-3.80	88.2	0.02	27.1	-2.21	69.9	0.3	-0.28	84.2	7.7		
AKN1	82.58	196.60	14.00	0.12	33.83	82.51	8.08	0.27	-3.85	100.8	0.01	33.5	-1.32	81.8	1.3	-0.28	88.9	7.2		
AKN4	78.30	38.40	6.90	0.11	32.04	74.29	8.96	0.28	-2.93	90.5	0.02	31.9	-3.14	88.3	0.6	-0.28	82.7	5.1		
AKN5	81.14	115.40	10.65	0.13	34.40	78.95	8.77	0.25	-1.74	82.9	0.05	35.7	-1.80	88.4	1.8	-0.32	80.8	5.4		
AKN7	77.80	148.13	12.17	0.16	32.00	78.00	8.05	0.27	-4.24	92.2	-0.01	33.8	-4.42	83.5	0.8	-0.24	85.5	8.3		
AKO	89.85	77.60	8.81	0.11	33.21	107.04	10.35	0.31	-2.96	95.8	0.06	29.1	-2.14	90.2	0.9	-0.29	78.4	6.9		
AKP	78.00	151.10	13.45	0.15	35.58	81.51	7.84	0.22	-2.80	96.5	0.01	34.5	-1.15	88.2	1.7	-0.31	82.7	6.5		
AKP0	77.81	71.80	8.50	0.10	30.00	89.80	10.00	0.33	-1.81	87.9	-0.05	34.4	-0.19	78.1	2.5	-0.17	87.1	11.9		
AKP1	78.70	45.90	6.78	0.09	31.17	54.68	6.04	0.26	-1.81	89.0	-0.08	35.8	-1.15	87.5	1.3	-0.32	78.6	6.3		
AKR1	79.00	111.35	10.50	0.13	28.90	55.38	8.09	0.27	-2.74	93.5	-0.00	33.9	-2.28	81.3	0.9	-0.28	82.9	7.7		
AKS1	78.50	107.50	10.37	0.14	34.41	84.78	9.48	0.28	-2.14	89.3	0.04	32.8	-0.63	88.3	2.4	-0.22	79	2.1		
AKS2	73.20	118.10	11.87	0.15	33.30	59.10	7.96	0.21	-2.12	91.1	0.01	32.0	-2.48	78.9	0.8	-0.42	85.6	4.8		
AKS3	71.48	84.90	9.17	0.11	32.04	74.29	8.97	0.23	-1.84	86.5	-0.09	34.0	-0.48	85.2	4.2	-0.25	71.8	8.6		
AKS4	65.50	124.40	11.05	0.14	30.89	62.82	6.81	0.22	-2.89	84.8	-0.04	33.2	-0.62	82.4	1.9	-0.29	87.1	5.9		
AKT1	71.11	81.80	9.04	0.13	29.24	54.50	7.40	0.26	-1.93	85.3	-0.09	35.8	-6.44	82.1	0.3	-0.43	81.5	4.7		
AKT2	89.80	79.80	8.77	0.11	34.19	49.03	7.00	0.20	-2.95	92.2	0.00	28.2	-2.57	84.8	0.8	-0.18	84.9	11.1		
AKTM	89.50	89.35	8.33	0.10	33.11	87.04	9.06	0.27	-2.96	89.7	0.08	27.8	-3.01	77.7	0.7	-0.25	80.4	8.0		
C1005	80.10	30.30	5.50	0.07	32.20	78.85	8.87	0.28	-1.05	88.5	-0.11	39.1	-1.87	84.6	1.1	-0.2	80.2	10.0		
C1040	78.34	68.80	8.27	0.11	33.61	67.05	6.59	0.28	-3.12	92.4	0.18	24.9	-0.95	90	2.1	-0.22	82.9	8.1		
C1081	77.88	181.90	13.20	0.16	32.17	70.12	8.37	0.28	-4.12	92.1	-0.05	35.2	-1.81	78.4	1.1	-0.41	67.9	4.9		
C1202	82.72	92.48	9.67	0.12	40.27	72.41	8.51	0.21	-3.02	103.3	0.01	39.8	-1.17	88.2	1.7	-0.22	88.9	9.1		
C2209	78.80	33.60	5.79	0.07	31.49	22.76	4.77	0.15	-1.37	88.8	-0.03	31.7	-2.4	82.1	0.8	-0.44	77.9	4.5		
C255	79.40	151.11	11.46	0.16	32.05	31.95	6.16	0.19	-1.85	89.6	0.07	26.7	-1.19	81	1.7	-0.28	83.4	2.1		
C282	72.50	97.20	9.85	0.13	34.11	48.20	7.00	0.20	-1.81	89.2	-0.01	34.1	-0.81	88.2	2.2	-0.22	84.6	4.8		
CH010A	64.77	68.12	8.28	0.13	21.98	41.43	6.44	0.29	-1.32	72.2	-0.05	25.9	-1.04	78.1</						

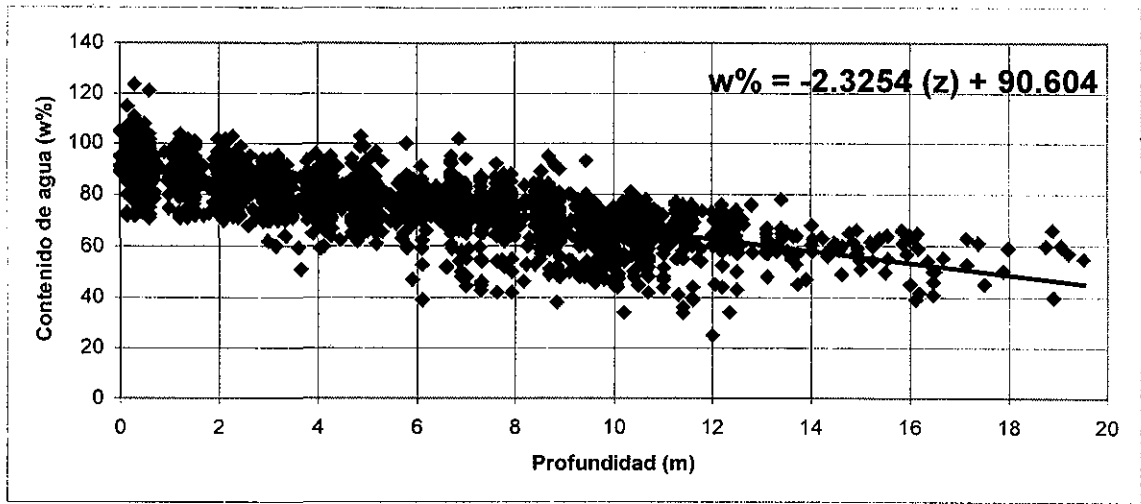


Figura 3.2.13 Tendencia general de los valores de contenido de agua del estrato superficial.

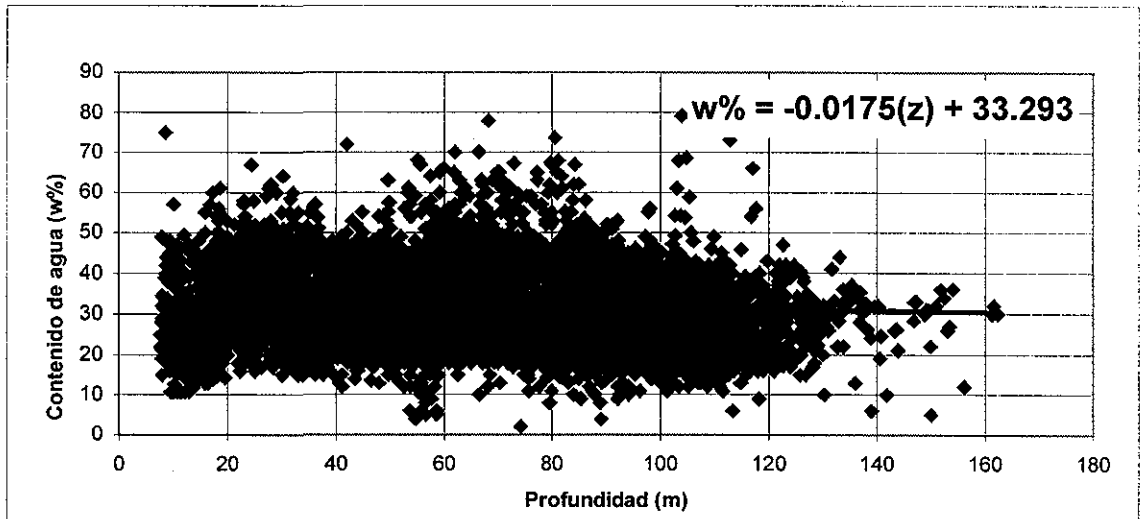


Figura 3.2.14 Tendencia general de los valores del contenido de agua de los estratos profundos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- **Tendencia general del campo aleatorio**

La ecuación del hiperplano obtenida mediante el programa SAAG (Dávalos et al, 2001) se establece con los datos del contenido de agua de los perfiles completos, sin separar ambas poblaciones, para observar una tendencia a lo largo de un plano tridimensional, donde las variables, x , y , y z corresponden a la coordenadas UTM de los sondeos estudiados y la profundidad respectivamente, y la ecuación que mejor se ajusta en general es:

$$W\% = -0.0003x + 2.532y - 0.349z + 244.41 \quad (3.2.3)$$

d) Función de autocorrelación estandarizada

Los coeficientes de autocorrelación de cada sondeo fueron ajustados a una función de tipo exponencial (Li & Lump, 1987), para obtener un valor cuantitativo de la distancia de influencia que corresponde en cada sondeo y confirmar su zonificación. Los resultados se muestran en la tabla 3.2.2.

- **Estrato superficial**

El análisis estructural de la función de autocorrelación estandarizada de cada sondeo permite delimitar zonas de interés en subgrupos de similar distancia de influencia.

Las gráficas de autocorrelación normalizada que se muestran agrupadas en la figura 3.2.15 presentan una correlación no lineal parecida. Esta autocorrelación nos indica que la similitud de un contenido con respecto a otro se pierde entre 0.6 m a 2.0 m de profundidad, después el coeficiente de autocorrelación se mantiene muy bajo (sin correlación) y empieza a subir ligeramente en los 4 m, sin embargo; no se observa interestratificación como en los EP, puesto que se trata de un solo estrato.

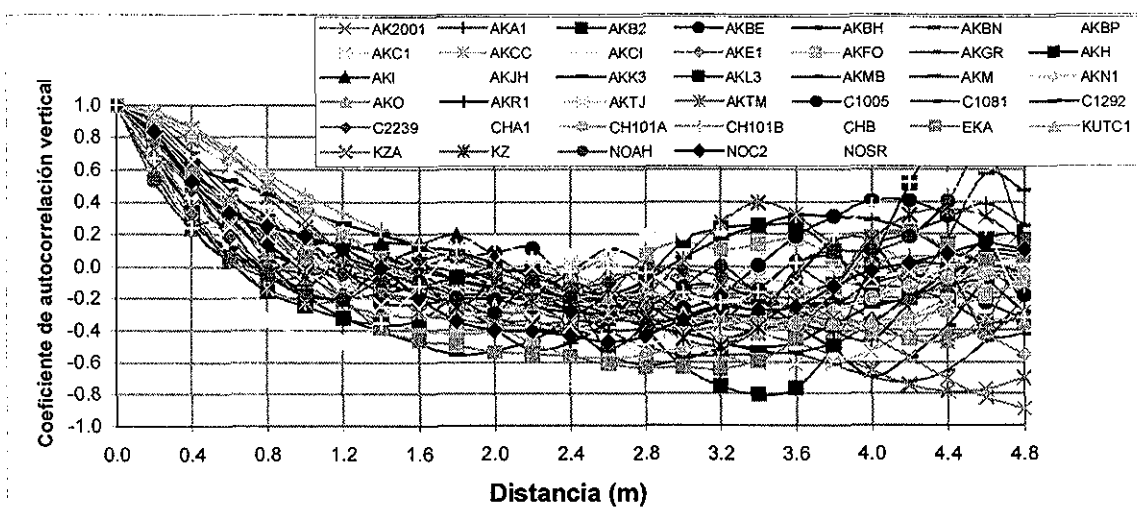


Figura 3.2.15 Autocorrelación de algunos sondeos del estrato blando superficial.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Otros grupos de sondeos muestran fuertes similitudes entre sí y pueden agruparse en zonas como en la denominada zona sur de la figura 3.2.16.

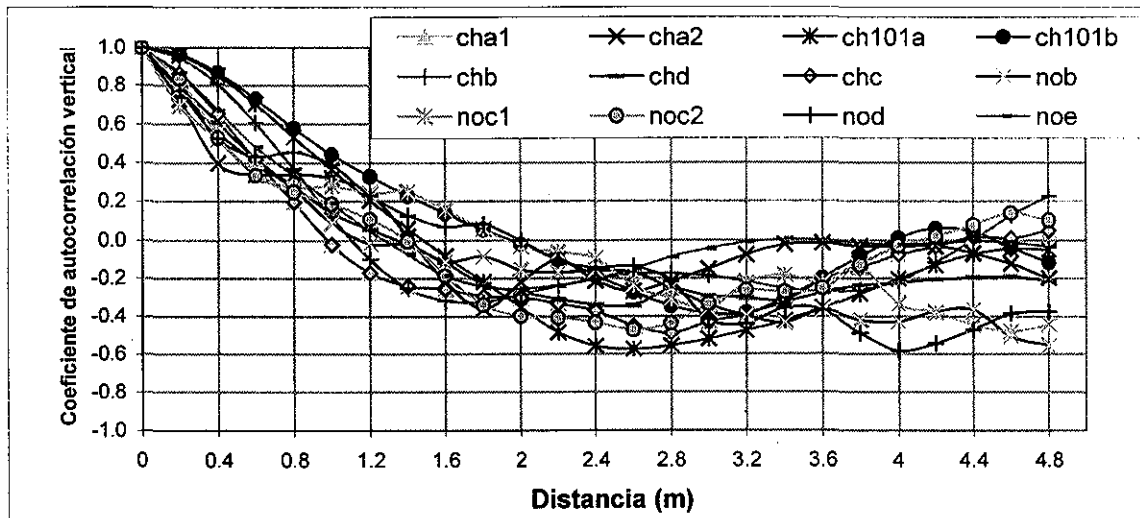


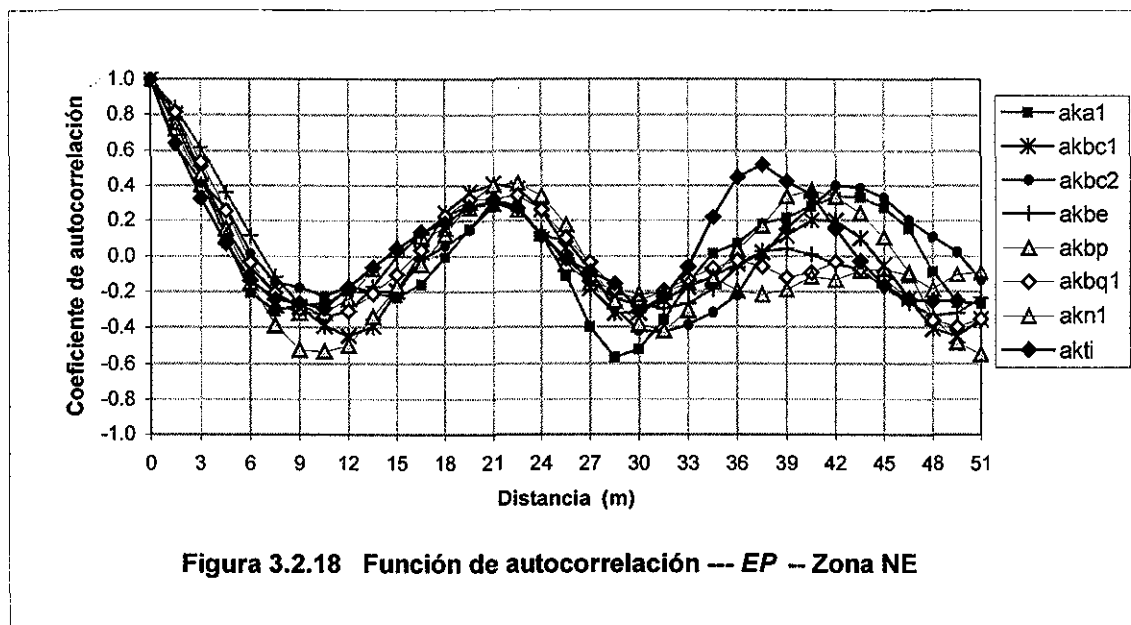
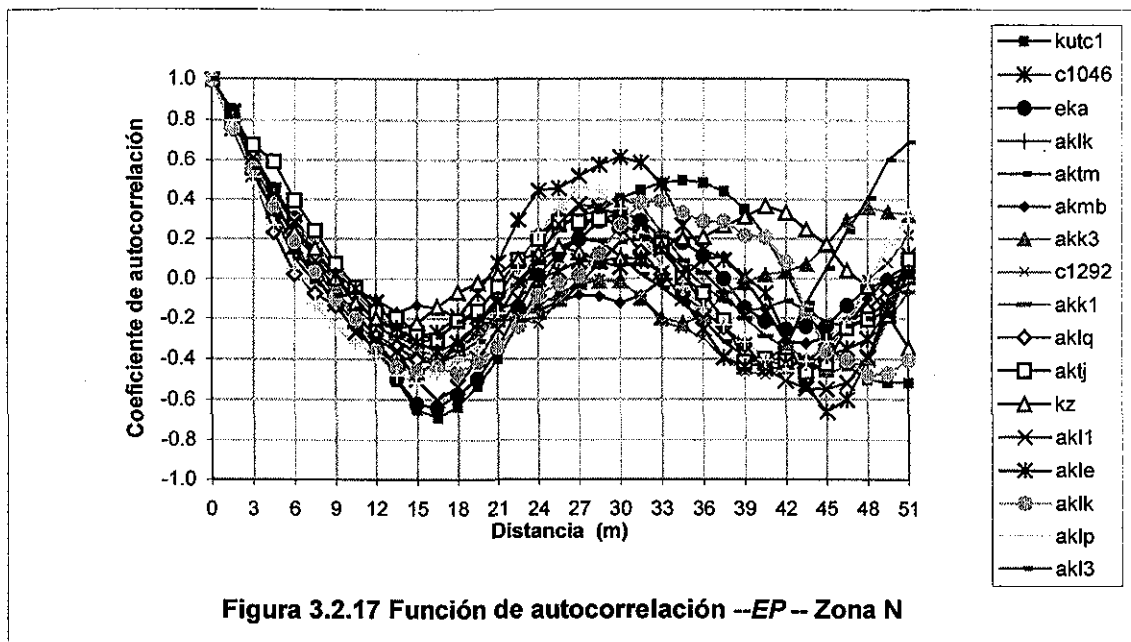
Figura 3.2.16 Autocorrelación de la zona sur (estrato superficial)

• **Estratos profundos**

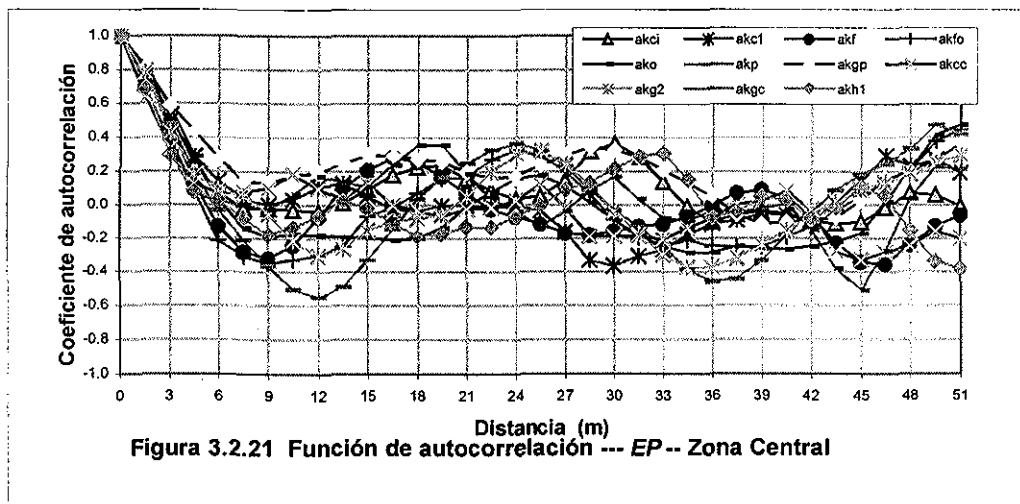
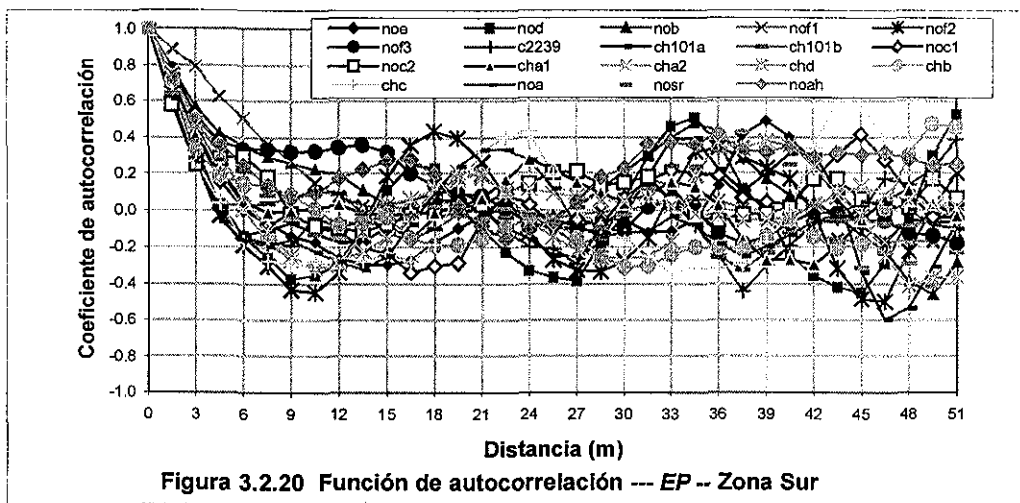
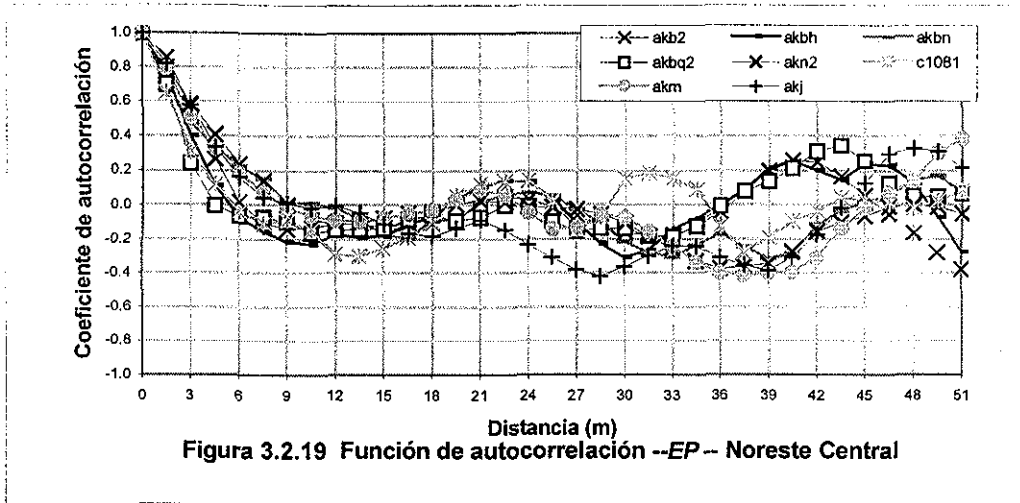
A diferencia del estrato superficial, la función de autocorrelación de los estratos profundos se encuentra en su mayoría bien definida por zonas, como se muestra en la figura 3.2.17, correspondiente a la zona norte. En esta figura los coeficientes de autocorrelación muestran una estratigrafía intercalada con dos estratos a una periodicidad de 30 m. La similitud entre estos sondeos no es tan clara como lo es en la figura 3.2.18, denominada zona NE donde la periodicidad disminuye hasta 20 m. Otro ejemplo de similitud entre grupos de sondeos autocorrelacionados verticalmente se observa en la zona noreste central, cuya interestratificación no es tan semejante como las zonas anteriores. Los coeficientes más pequeños se ubican entre los 9 y 15 m (figura 3.2.19).

Por otra parte, las zonas donde los coeficientes de correlación son más variables, son las llamadas zonas sur y central, (figuras 3.2.20 y 3.2.21 respectivamente). En los primeros metros parecen mantener alguna similitud entre sí por su cercanía, pero a profundidades mayores cada sondeo presenta un comportamiento diferente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

e) Estimación de cortes virtuales

Después de analizar estructuralmente cada sondeo individualmente y obtener los parámetros estadísticos que definen las propiedades del campo aleatorio del contenido de agua, se utiliza el programa SAAG para obtener sondeos y cortes estimados en zonas no exploradas. El programa se alimenta ingresando los datos de un perfil completo del contenido de agua a su correspondiente profundidad, además de sus coordenadas geográficas (Dávalos *et al.* 2001).

Se eligieron ocho cortes (A al H), de 13 sondeos virtuales cada uno, separados de una distancia de un kilómetro, con el fin de analizar un espacio regular y cubrir la mayor parte de la zona de estudio. La distancia entre cortes es de 2.5 km. Los cortes se hicieron en dirección NE, debido a dos razones: la primera es porque cortan las fallas perpendicularmente a su rumbo y de esta forma las fallas se observan con su echado real. La segunda es que la pequeña pendiente a lo largo de esa dirección permite unir los sondeos virtuales que integran un corte, facilitando la interpretación de la estratigrafía del corte estimado.

Para realizar una estimación con el programa SAAG se alimenta la ventana correspondiente con dos parámetros: β_{vertical} y $\beta_{\text{horizontal}}$ que representan los parámetros de los dos modelos de correlación: el modelo vertical y el modelo horizontal respectivamente (tabla 3.2.3). La figura 3.2.22; muestra el ajuste exponencial donde se obtiene el parámetro β_{vertical} (Li & Lump, 1987). El resultado del ajuste muestra que la mayoría de los sondeos presentan una distancia de influencia vertical de 12.5 m. Esto concuerda con el promedio aproximado de la variabilidad espacial geométrica del estrato superficial, valor en el cual, los coeficientes de correlación tienden a ser muy pequeños (donde la correlación se pierde), esto representa el cambio de los contenidos de agua del estrato superficial con los estratos subyacentes.

En la figura 3.2.23, se presenta el modelo horizontal definido a partir de la correlación cruzada existente entre todos los pares de sondeos. Para este modelo se observa que los coeficientes de correlación son muy variables (entre 0 y 1). Realizando el ajuste, la distancia de influencia horizontal resulta muy extensa. Para este modelo también se aplica un ajuste de regresión lineal de tipo exponencial y se obtiene su respectiva $\beta_{\text{horizontal}}$.

Tabla 3.2.3 Parámetros de los modelos de correlación utilizados

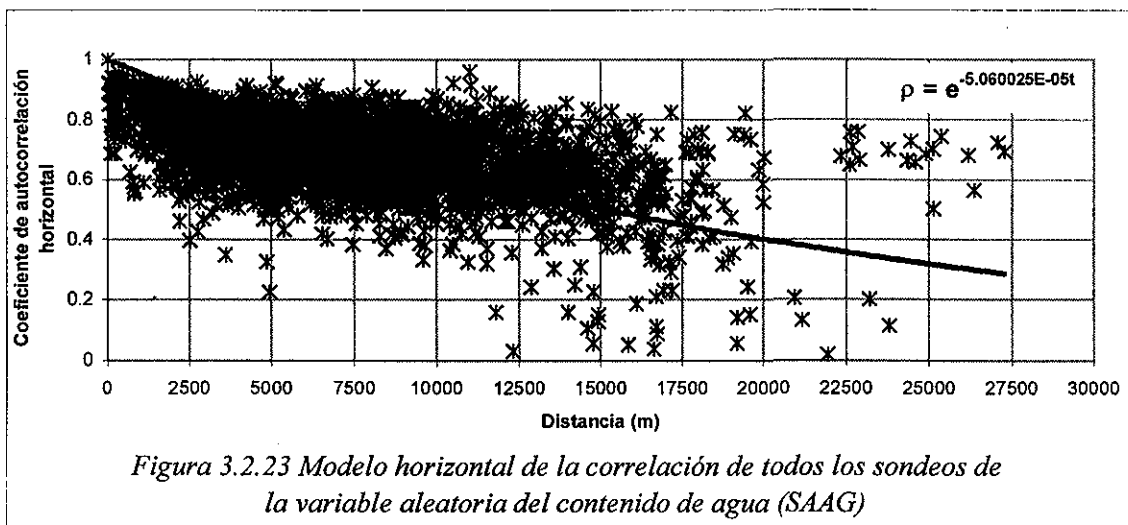
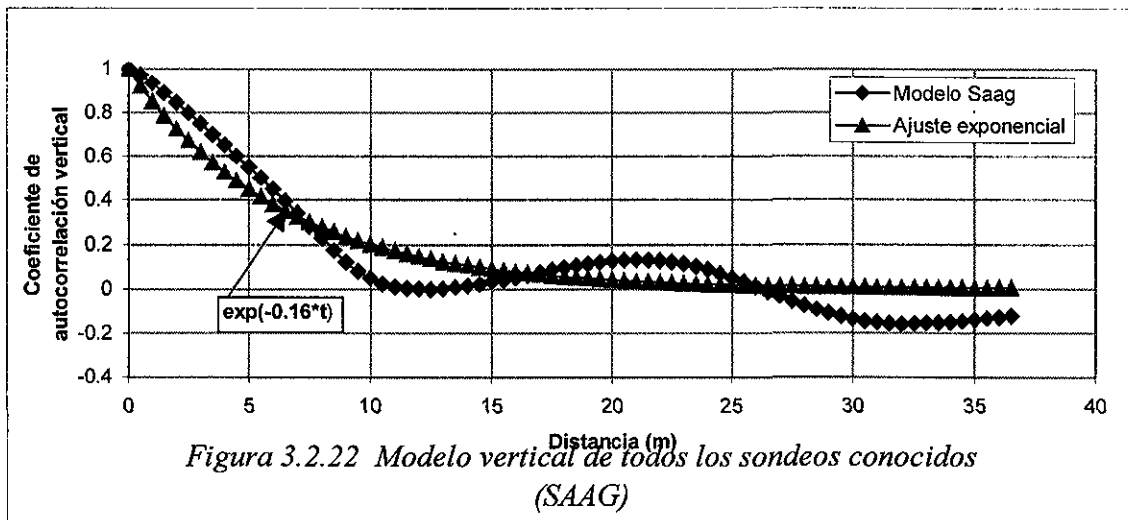
Modelo	β_v (vertical)	β_h (horizontal)
Exponencial	-0.16	-0.00005

Los siguientes aspectos se consideraron para definir adecuadamente los sondeos que intervienen en el cálculo de cada corte estimado y simulado:

- En la zona de estudio se analizó: la geología estructural (3.1.2.c), la tendencia o deriva de *SR* (si disminuye o aumenta w% con la profundidad, 3.2.2.a), la litología (qué tipo de estrato subyace al superficial, 3.2.2.a) y la estadística (la función de

autocorrelación, 3.2.2.d). Estos aspectos se tomaron en cuenta para delimitar las zonas con más detalle y poner especial atención en zonas de transición, como fallas o depresiones importantes, que corroboren o descarten el modelo.

- Se supuso que los cortes estimados se pueden interpretar discretizadamente por no presentar variaciones importantes de pendiente (a lo largo de la curva de nivel), en la dirección NE-SW, (dirección en la que fueron generados los cortes, figura 3.2.24).



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

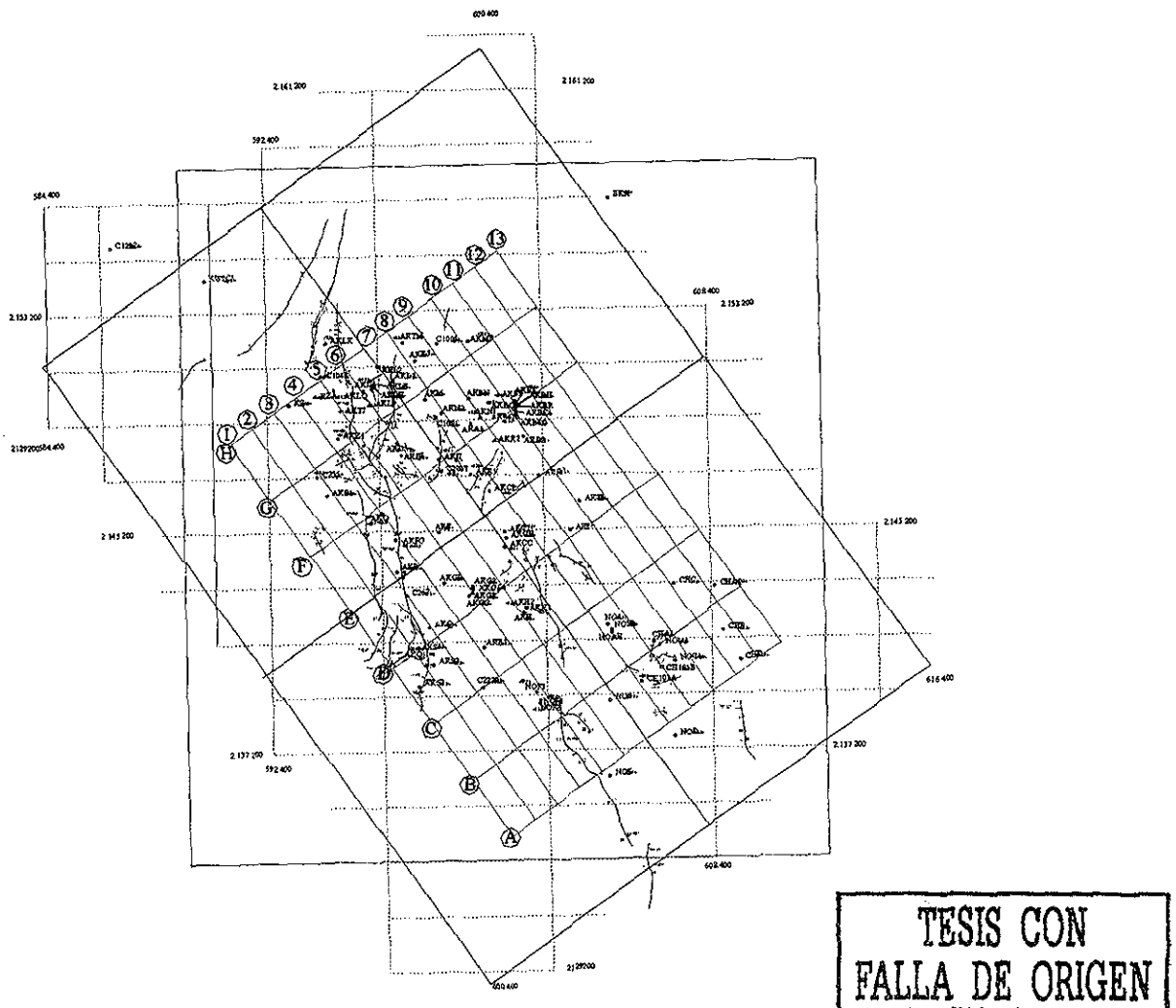


Figura 3.2.24 *Rejilla de sondeos y cortes: estimados y simulados*

Con base en estas consideraciones, se obtuvieron ocho cortes estimados considerando 13 sondeos en cada uno. Las interpretaciones que se muestran a continuación están basadas únicamente en el resultado de la variación estimada (cortes) del contenido de agua, por lo que se definen los siguientes estratos predominantes: el estrato superficial ($w > 50\%$) el segundo estrato de arcilla firme color rosa ($w = 30-40\%$) y el estrato de arena limosa, en color gris ($w = 20-30\%$) que se presenta en la mayoría de los sondeos como estrato subyacente al estrato superficial. Dos estratos guía, con características similares sirven de referencia para localizar posibles discontinuidades geológicas: el primero denominado $G1$, de color anaranjado ($w = 40-50\%$) con rojo ($w = 50-60\%$) se localiza entre 25 y 35 m de profundidad; el segundo, con los mismos colores, además de un verde ($w = 60-70\%$) en el centro, localizado entre 60 y 70 m de profundidad, denominado $G2$, estos estratos guías

predominan en la mayoría de los cortes estimados con mayor constancia y no presentan movimientos tan caóticos como la arcilla firme (color rosa) o la arena carbonatada (color gris).

- **Corte estimado A y su desviación estándar.**

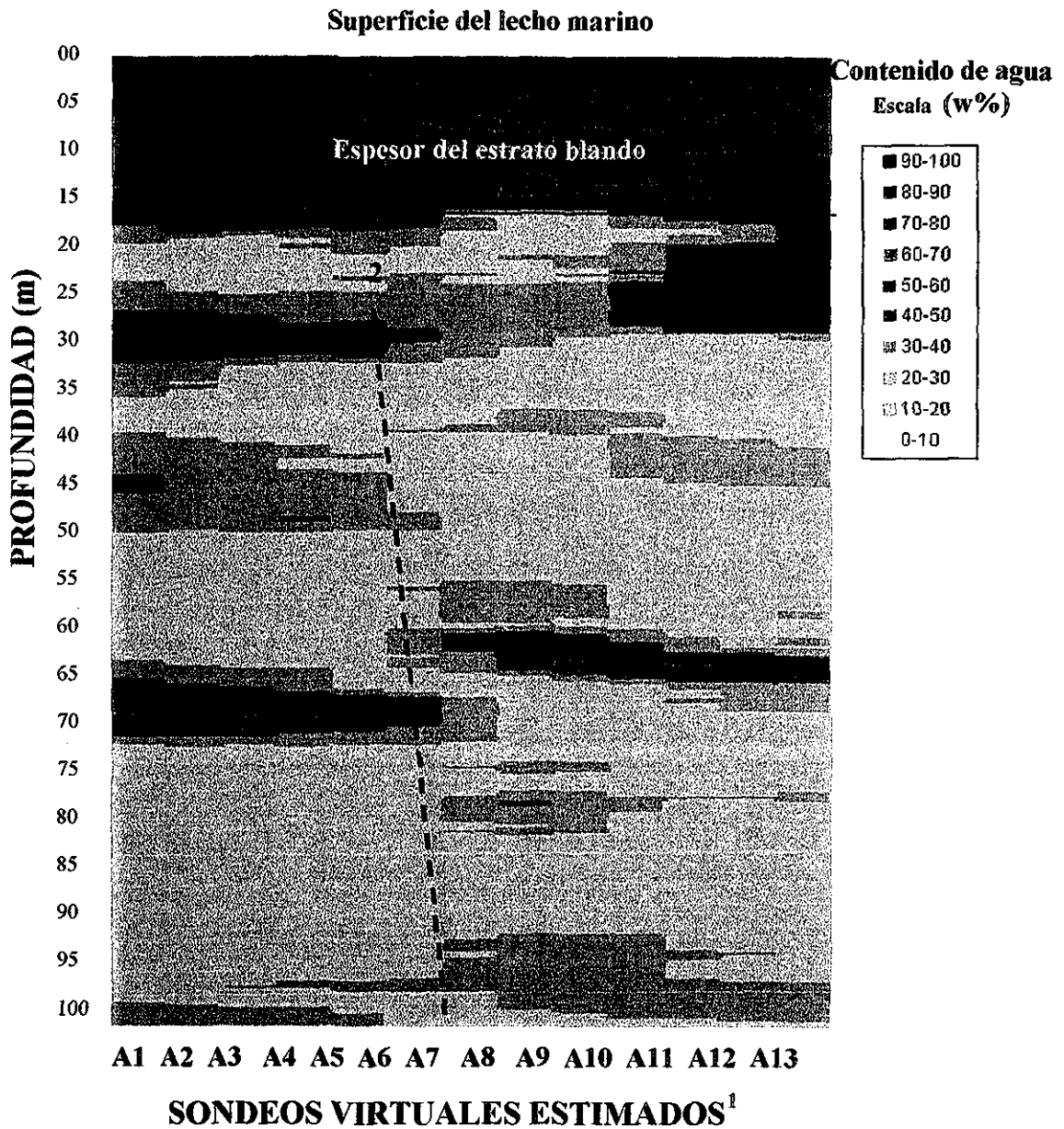
El corte estimado A se construye tomando en cuenta los sondeos reales: NOE, NOD, CHD, CHB, NOB, CH101A, CH101B, NOC1, NOC2, CHA1, CHA2, CHC, NOF1, NOF2, NOF3, C2239, AKS3, AKS4, AKQ, AKQ1 y AKR1. El error de incertidumbre asociado al corte estimado es de 20.9%.

En la figura 3.2.25, el contenido de agua varía entre 10 y 80 %. Los valores mayores están localizados entre 15 y 20 m de profundidad (la línea negra continua representa la base del estrato superficial, el cual varía en forma uniforme con la presencia de tres colores muy definidos del contenido de agua, disminuyendo con la profundidad en: $w\% = 70-80\%$, $60-70\%$ y $50-60\%$, respectivamente). Los estratos profundos, se muestran de manera discontinua, intercalándose el estrato de arcilla firme (color rosa, $w = 30-40\%$) con el estrato de arena carbonatada (color gris, principalmente, $w < 30\%$). En este corte predominan las arenas.

De acuerdo al informe geotécnico del sondeo NOE, se ha reportado una falla (que no se dibuja en la cartografía de fallas) a 20 m de profundidad con dirección ENE del sondeo NOE, la cual aparentemente buza hacia el SE. La falla es la misma que se encuentra ubicada en planta entre los *SV*, A4 y A5, sin embargo basándose únicamente en la continuidad lateral de los estratos guías que muestra el corte A, en la figura 3.2.25 se puede observar un cambio horizontal brusco en *G1*, ubicado entre 28 y 32 m de profundidad, que coincide con las polaridades en la zona de estudio. En el estrato guía *G2*, la falla es más evidente, está entre los 65 y 70 m. Se observa, también, que esta falla puede haber llegado al estrato de arena más superficial ($w = 20-30\%$), lugar donde se reporta la presencia de gas. Aunque la falla no coincide con profundidad en el corte, en superficie coincide con la distancia de 115 m y con un buzamiento de $70-80^\circ$ que menciona el informe geotécnico del sondeo NOE, cercana al sondeo virtual A5.

En la figura 3.2.26, se observa que el corte estimado A tiene una desviación estándar media baja, muy uniforme, entre 5 y 10%. Por otra parte, el sondeo A1 está muy alejado de los sondeos, y su desviación está entre 10 y 15%. Las zonas de moderada desviación (entre 10 a 15% pueden deberse a dos causas: la presencia de canales enterrados enunciados en el informe geotécnico del sondeo CHD y un banco de carbonatos (AKR1) abajo del estrato blando, o la ausencia de correlación en los datos reportados de contenido de agua a esa profundidad entre los sondeos.

Sin embargo, la zona bien delimitada es la base del espesor del estrato blando. Las zonas en amarillo (también llamadas zonas de luz) son áreas cercanas a los sondeos reales: NOE y NOD así como un grupo de sondeos de CHAC. La figura 3.2.26 indica que en la sección A1 hasta A4 no hay algún sondeo real cercano, por lo que el error asociado a la incertidumbre es mayor con respecto a la sección definida del A6 al A11. En la figura 3.2.24 se observa, en planta, que la sección desde A4 al A5 es cortada por una falla, con

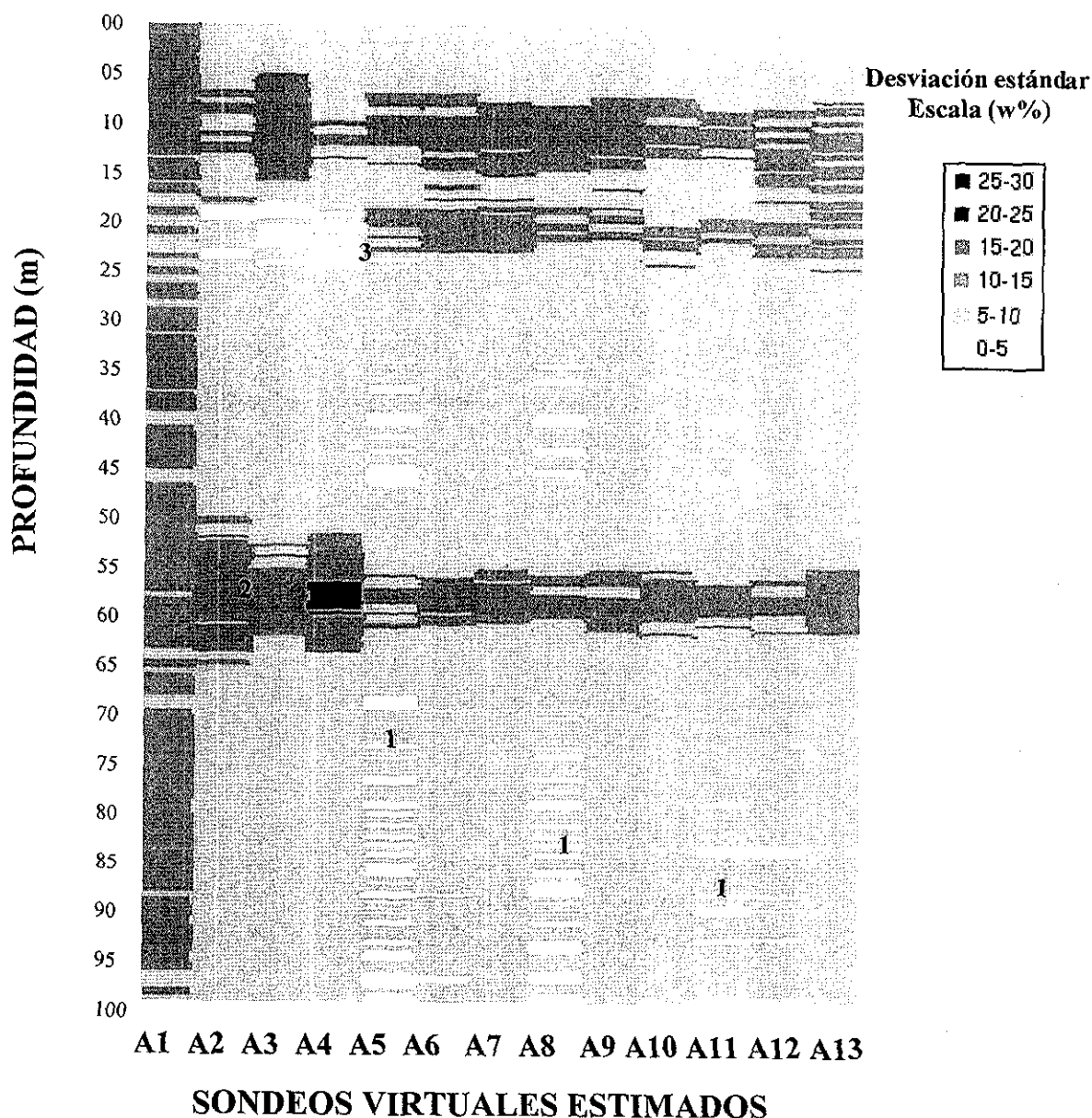


OBSERVACIONES:

1. Sondeos virtuales estimados separados a 1 km
2. La falla encontrada es propuesta por el desfasamiento del estrato guía G2 y continua hasta donde se tiene reportado la presencia de gas (estrato de arena).

Figura 3.2.25 Corte estimado A

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



OBSERVACIONES:

1. Las zonas en claras en amarillo (también llamadas zonas de luz) son áreas cercanas a los sondeos reales: NOE y NOD así como un grupo de sondeos de CHAC.
2. En la sección A1 hasta A4 no hay algún sondeo real cercano, por lo que el error asociado a la incertidumbre es mayor (zona negra).
3. La incertidumbre del análisis es pequeña en esta parte de la sección donde ocurre la falla.

Figura 3.2.26 Desviación estándar del corte estimado A

una cercanía notable al sondeo real, NOE; este hecho, hace que la incertidumbre del análisis sea pequeña en esta parte de la sección, validando la falla.

- **Corte estimado B y su desviación estándar.**

Los mismos sondeos reales anteriores se utilizaron para construir el corte estimado B, añadiendo NOSR, NOAH, NOA, AKS2, AKH1, AKH2, AKH, AKI y AKTI. El error de incertidumbre asociado al corte estimado es de 20.6%.

En el corte B (figura 3.2.27), los contenidos de agua varían entre 10% y 90%. Los contenidos de agua mayores, que corresponden al estrato superficial, se localizan entre 10 y 15 m de profundidad, 5 m menor con respecto al corte A, y se observa una nueva capa de contenido de agua mayor al observado en el corte A analizado (con $w\% = 80-90\%$). Se infiere que el espesor disminuye y el contenido de agua del estrato superficial aumenta un 10% en dirección al NW, respectivamente.

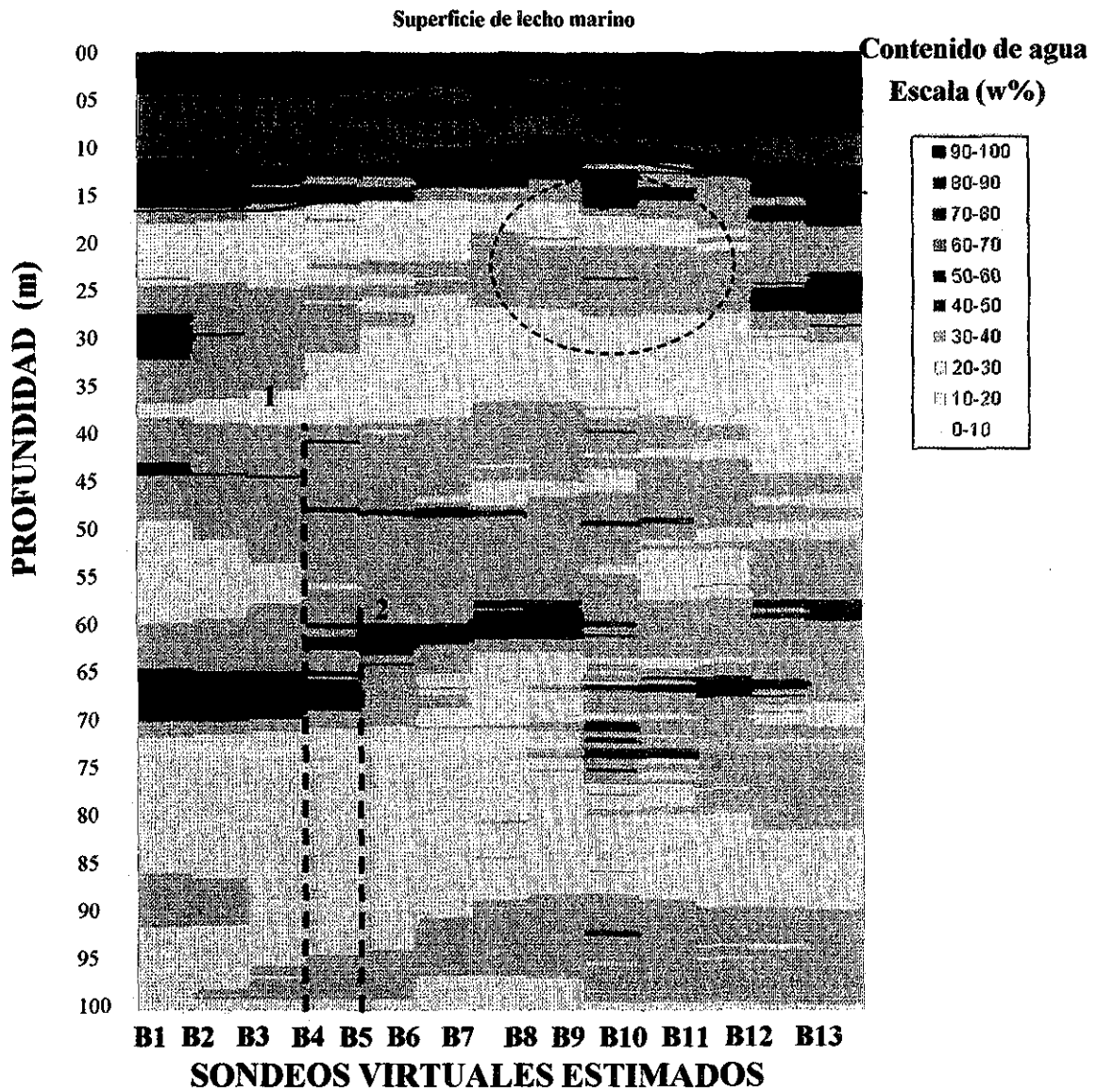
La estratificación entre la arcilla firme (color rosa) y la arena carbonatada (color gris), presenta una intercalación menos homogénea con respecto al corte A. Esta puede ser evidencia de anomalías por la presencia de gas en la sección comprendida entre los SV, B8 y B12. En todo el corte, el estrato de arcilla firme predomina.

En el informe geotécnico NOF1, se reporta una falla en la dirección NW-SE, con un echado perpendicular al corte que se extiende hasta por 41 m debajo del lecho marino. Esta falla se infiere por la discontinuidad del estrato guía G2 que se observa en el sondeo B1 a B4 entre 65 y 70 m de profundidad, presentando una continuación del corte A estimado. Entre los sondeos estimados B4 y B5, el corte se observa caótico por la presencia de dos fallas muy cercanas; lo cual se atribuye al principio del graben. Se requiere estimar un poco hacia el SE, donde se abre el graben, para conocer si su profundidad es menor a 100 m para distinguirse en el corte.

El estrato guía G1 (de 25 y 30 m) en el SV B1 se interrumpe en la sección comprendida entre B2 y B11 y aparece en B12 y B13, pero arriba de su nivel inicial debido a la posible presencia del cinturón calcáreo Reforma - Akal.

En la sección B8 al B11, entre 10 y 30 m de profundidad, se observa una zona muy particular, donde el estrato arenoso está interrumpido por discontinuidades, como se observa en la zona punteada del círculo. El informe geotécnico CHA1 describe una turbulencia de los sedimentos entre 10 y 30 m debajo del fondo marino, debido a la presencia de emanaciones de gas, asociadas al pequeño sistema regional de fallas.

En el corte B1_13, figura 3.2.28, se observa la ausencia de sondeos reales muy cercanos, sino hasta a partir del SV B5 en adelante. En el informe CHA1, se menciona la posible zona afectada (zona del círculo) por emanaciones de gas, que corresponde a la zona de muy baja desviación estándar registrada, por lo que una anomalía de gas observada en esa área puede verse de esa forma caótica en los estratos entre las fallas asociadas al corte y la turbulencia.



OBSERVACIONES:

1. La falla encontrada es la discontinuidad del estrato guía G2, documentada en el informe geotécnico NOF1.
2. La presencia del inicio de un graben (pequeños escalones) se debe a que la falla se bifurca en dos.
3. Note el escape de gas (zona de círculo) documentada en el informe geotécnico CHA1, que ocasiona valores de contenido de agua irregulares con la uniformidad general a lo largo de los sondeos virtuales B8, B9 y B10.

Figura 3.2.27 Corte estimado B

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

En general, se observa una desviación estándar baja, entre 5 y 10%. Sin embargo, la franja de 10 a 15 de desviación media entre 55 y 65 m, se presenta a la misma profundidad que en el corte anterior. El informe geotécnico NOC1 también menciona la presencia de arrecifes de coral de 7 m de espesor enterrados en esa zona.

Las “zonas de luz” se manifiestan a lo largo de los *SV* B7, B9, B10 y B12, debido a la presencia del grupo de los sondeos CHAC.

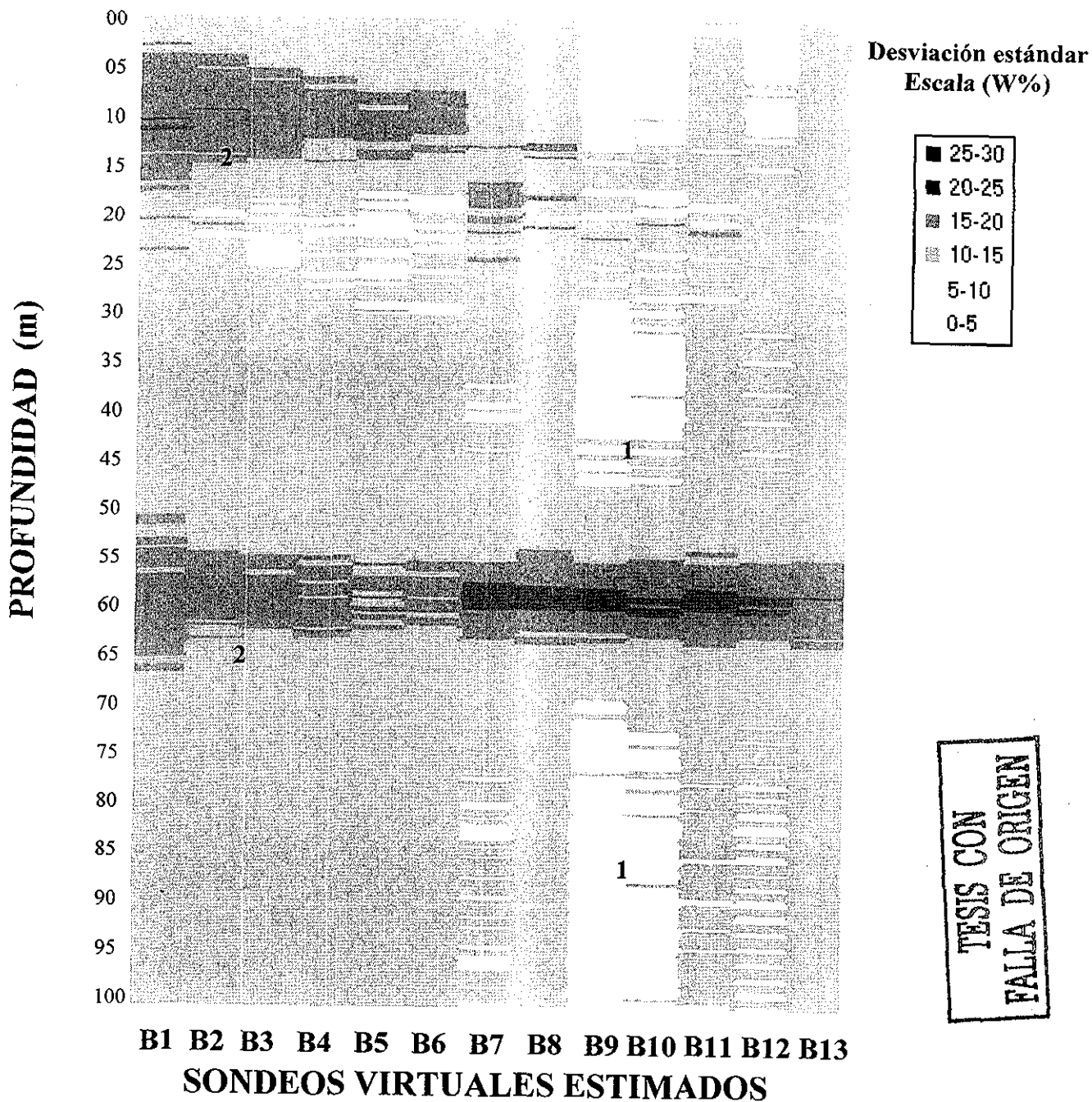
- **Corte estimado C y su desviación estándar.**

El corte estimado C se realizó separándolo en dos corridas de estimación. La sección estimada C1 al C2 se construyó tomando en cuenta los sondeos reales: NOF1, NOF2, NOF3, C2239, AKQ, AKQ1, AKR1, AKS2, AKS3 y AKS4. El error de incertidumbre asociado al corte estimado es de 21%.

Los sondeos virtuales de la sección estimada, C3 al C13, se construyó utilizando los sondeos reales: CHA1, CHA2, CHC, AKS2, AKS3, AKS4, C2239, AKQ1, AKQ, AKH1, AKH, AKH2, NOF3, NOA, NOSR, NOAH, CHC, AKG2, AKG1, AKGR, AKGC, AKGP, AKCC, AKC1, AKI y AKD1. El error de incertidumbre asociado al corte estimado es de 21.6%.

Los contenidos de agua en el corte C varían de 10 a 100% (figura 3.2.29). Los mayores contenidos de agua se presentan en el estrato superficial, el cual se ubica desde 15 m mostrando una disminución en su espesor en la sección C1 al C6, para luego estabilizarse en los 9 m en la sección C6 al C9 y, finalmente, aumentar gradualmente su espesor a 12 m en la parte última de la sección (C10 al C13). En el corte estimado C, los contenidos de agua de los estratos subyacentes presentan una estratificación más homogénea, inicialmente con el estrato de arcilla firme (color rosa), y a profundidades mayores de 65 m el contenido de agua se asocia con el estrato de arena (color gris con $w = 20$ a 30%).

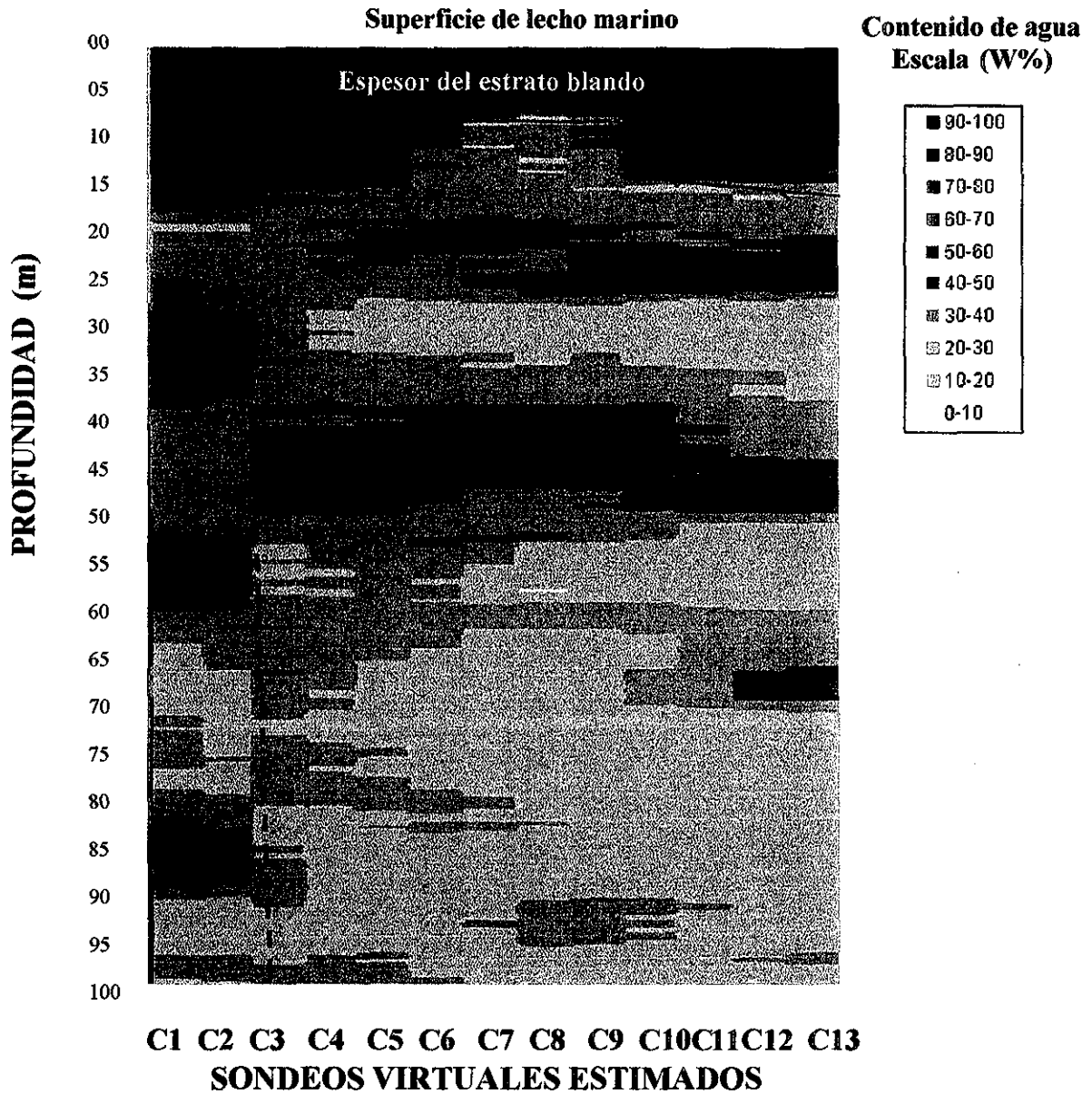
La presencia de una falla comprendida entre los *SV* C6 y C7, con un buzamiento casi vertical, cuyo bloque caído se encuentra a la derecha del corte (según la cartografía de falla de la figura 3.2.24), no se distingue en este corte, posiblemente porque la falla se encuentra a más de 100 m de profundidad. La discontinuidad mostrada por el estrato guía *G1*, localizado entre 25 y 40 m en la sección C1 al C2 muestra la presencia de una pequeña falla (línea discontinua) localizada a un kilómetro del sondeo real C2239, entre 40 y 90 m del lecho marino, falla si se aprecia en el corte estimado (el bloque caído se encuentra a la derecha), transportándose el estrato guía entre 38 m a 50 m, en las secciones C3 a C11. Aunque la falla no se encuentra en la cartografía general expuesta en la figura 3.2.24, si se menciona en el informe geotécnico de C2239, porque probablemente se trata de una falla regional localizada a gran profundidad. Existen muchas fallas pequeñas regionales no mostradas en la figura 3.2.24, pero que si se asientan en los reportes geotécnicos



OBSERVACIONES:

1. Las zonas amarillas corresponden a un menor error de incertidumbre de los sondeos reales CHA1 y NOC2 que pasa en la línea virtual del corte estimado entre B9 y B10 (zona de emanaciones de gas documentadas).
2. Zona con error de incertidumbre alto, posible zona de arrecifes de coral enterrados.

Figura 3.2.28 Desviación estándar del corte estimado B



OBSERVACIONES:

1. La falla encontrada es la discontinuidad del estrato guía *G1*, documentada en el informe geotécnico C2239.
2. El estrato guía *G2*, no tiene continuación hacia la zona NE del corte.
3. La zona en el abultamiento (C6 AL C9) puede deberse a la manifestación orográfica del "Horst" o una posible emanación de gas, restringiendo esta última hipótesis debido a que son 4 km de largo.

Figura 3.2.29 Corte estimado C

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

correspondientes a cada sondeo real, en la sección de información geofísica. Estas fallas regionales o locales, posiblemente fracturas, son las mayormente observadas en los cortes estimados. En cuanto al estrato guía *G2*, éste no tiene continuación hacia la zona NE del corte. Por lo demás, no se observan otras características importantes en el corte estimado C.

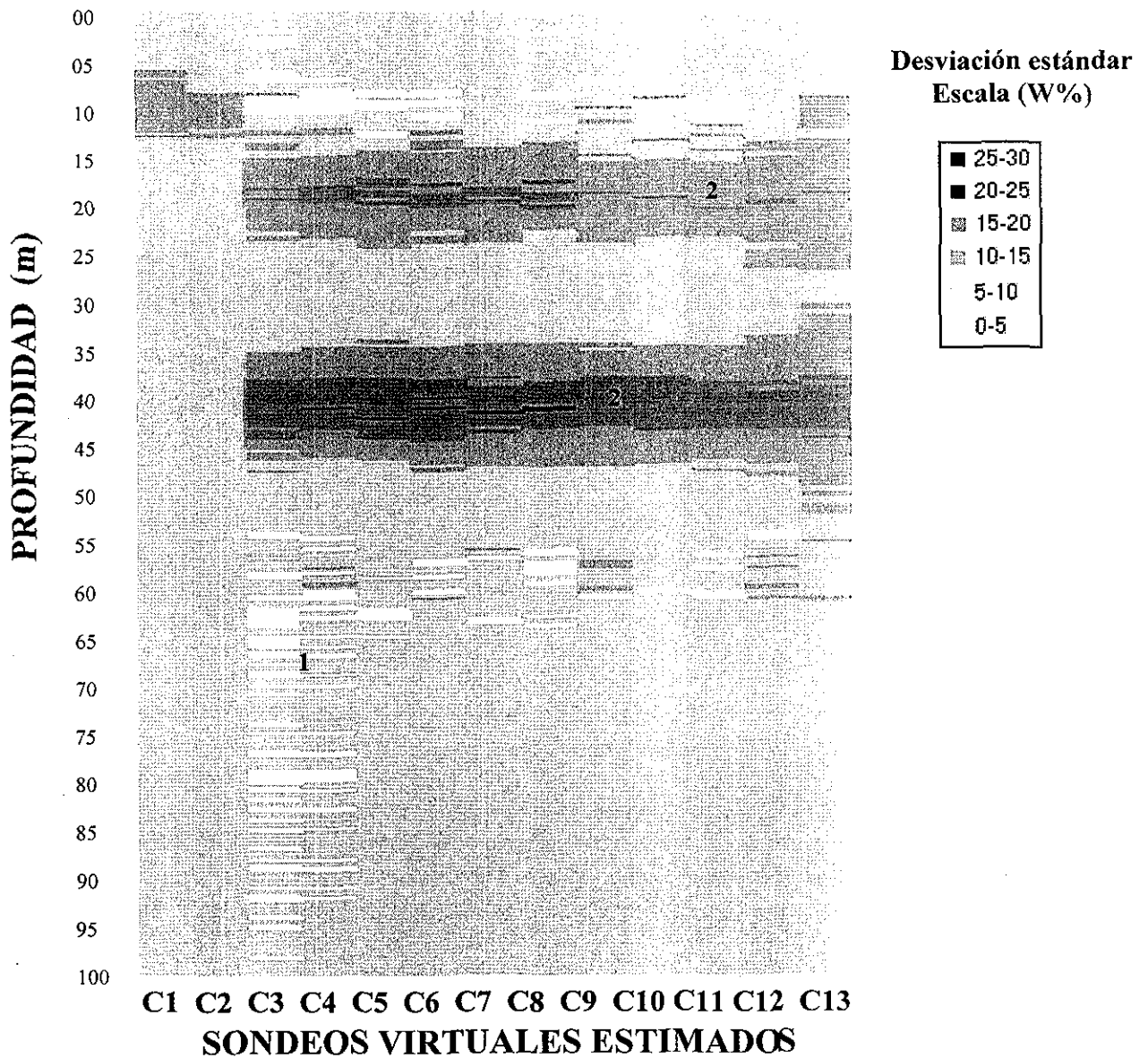
En la figura 3.2.30, la zona de la pequeña falla se respalda por una desviación estándar baja, de 0 a 10% misma que se mantiene uniforme a lo largo de la profundidad entre los sondeos virtuales C2 y C3 del corte estimado C. La zona en el abultamiento puede deberse a la manifestación orográfica del "Horst", esta zona tiene una desviación estándar media entre 10 y 15%. Dos zonas de desviación estándar media y alta, se localizan a partir de la sección C3 al C13 a diferentes profundidades: la primera entre 15 y 25 m, y la segunda entre 35 y 45 m, menos profundas y más importantes que la desviación en el corte estimado B. La influencia del sondeo C2239 localizado entre la sección C1 y C2 proporciona las zonas de luz. Se observa poca influencia de sondeos en las secciones C7_13.

- **Corte estimado D y su desviación estándar.**

En la sección estimada D1 al D4 el corte se construyó tomando en cuenta los sondeos reales: AKS2, AKS3, AKS4, AKR1, AKQ1, AKQ, C267, AKGP, AKGC, (error de la incertidumbre asociada, 21.5%). La sección estimada D5 al D13 se realizó con los sondeos reales: AKGC, AKGR, AKG1, AKG2, AKR1, AKH, AKH1, AKH2, AKCH, AKC1, NOAH, NOSR, NOA, AKI, AKTI, AKD1, CHC, CHA2, AKCI y AKF para construir la sección con un error de incertidumbre de 21.6%.

Los contenidos de agua en el corte D varían de 10 a 100%, (figura 3.2.31). Los mayores contenidos de agua se presentan en el estrato superficial, el cual se ubica a 15 m; tiene una pequeña depresión (espesor de 20 m) provocada por la presencia de las fallas en la sección comprendida entre D1 y D4, después se presenta un pequeño horst con un espesor de 9 m. (D4-D6). En las secciones D7 al D13 se observa como el espesor del estrato superficial aumenta gradualmente hasta llegar a 15 m, como en las primeras secciones. Los contenidos de agua de los estratos profundos no indican una estratificación homogénea, sino alguna forma cóncava en las secciones del centro del corte estimado D.

El corte D se muestra muy variado por la presencia de cuatro fallas cercanas a las primeras tres secciones (D1 al D3) y algunos sondeos reales (AKQ1, AKS4) que caen en el corte estimado (figura 3.2.24). Las dos primeras fallas concuerdan con el informe geotécnico AKQ1 debido que el bloque caído empieza en la izquierda. La segunda falla se aproxima al estrato superficial de manera evidente. Otro graben cercano forma un pequeño escalón que se observa en la estimación dentro de la sección D2 y D4 entre 30 y 35 m de profundidad. En el sondeo virtual D5 se presenta una zona de erraticidad que podría ser producto de la presencia de las pequeñas fallas dextrales inherentes a un sistema de fallas grandes longitudinales. Estas fallas se le conocen como *ridels*, pero no se observan en el corte. Aunque no se conoce que tan profundas se encuentran. El estrato guía *G1* se interrumpe hasta en el *SV* D3 y continúa en el *SV* D5 pero a mayor profundidad (40 m) que su contraparte SW. El *G2* no se identifica claramente en este corte.

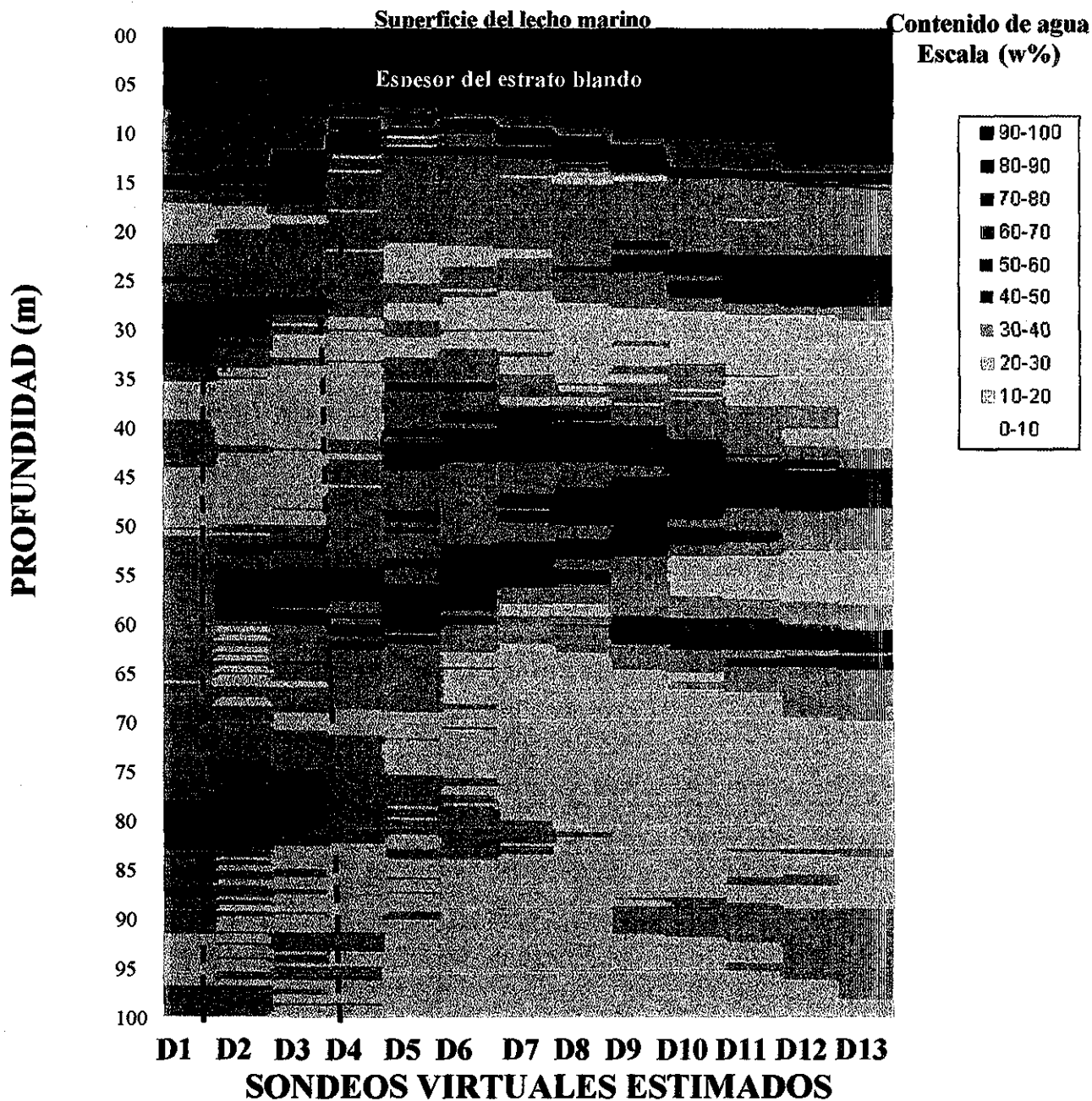


OBSERVACIONES:

1. Las zonas amarillas corresponden a un menor error de incertidumbre de los sondeos reales C2239 que pasa en la línea virtual del corte estimado (entre C3 y C4).
2. Zona con error de incertidumbre alto, posible zona de arrecifes de coral enterrados.

Figura 3.2.30 Desviación estándar del corte estimado C

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



OBSERVACIONES:

1. Las fallas encontradas son la discontinuidad del estrato guía *G1* y *G2*, documentada en el informe geotécnico AKQ1.
2. El estrato guía *G2*, no tiene continuación hacia la zona NE del corte.
3. La zona en el abultamiento (D4 al D7) puede deberse a la manifestación orográfica del "Horst" o una posible emanación de gas, restringiendo esta última hipótesis debido a que son 4 km de largo.

Figura 3.2.31 Corte estimado D

En la figura 3.2.32, la zona de falla, se tiene una muy baja desviación estándar (de 0 a 5%) misma que se mantiene uniforme a lo largo de la profundidad entre los sondeos virtuales D2 y D3 del corte estimado D. En general, todo el corte estimado tiene una desviación estándar baja de 5 a 10%. La zona en color oscuro puede deberse a un arrecife de coral localizado en el primer estrato que interfiere con una buena correlación con los demás sondeos reales, esta zona empieza desde el sondeo D7 y continua hacia el sondeo D12, principalmente en dos profundidades, a 15 m y a 40 m, aproximadamente. Es importante mencionar que en las últimas secciones virtuales no existen sondeos reales cercanos al corte D, sin embargo, se mantiene una desviación media, baja, aceptable.

La influencia de los sondeos reales es amplia como en el caso de: AKQ1, AKS4, AKQ y AKI.

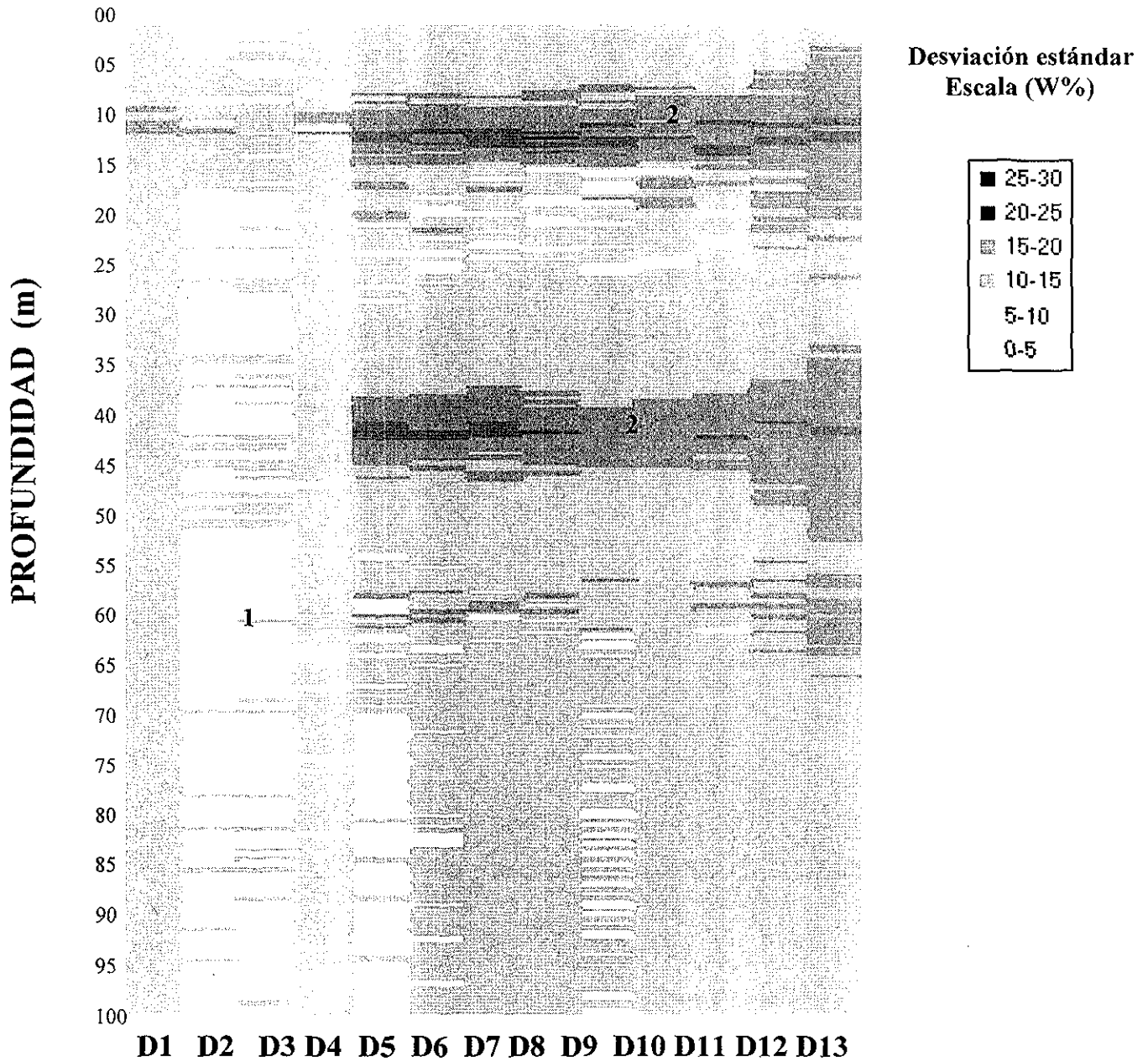
- **Corte estimado E y su desviación estándar.**

Con un error de estimación de 21.5% para la sección estimada E1 al E3 se tomaron en cuenta los sondeos reales: AKS1, AKS2, AKS3, AKS4, AKQ, C267, AKO, AKGP, AKP, AKFO, AKQ1, C2239 y C255. En cuanto a la sección E4 al E13 los sondeos reales que construyeron la estimación son: AKG2, AKG1, AKGR, AKGC, AKC1, AKCH, AKCC, AKH1, AKI, AKTI, AKD1, AKCI, C2000, AKJI, AKDB, AKK2, AKBC1, AKBC2, AKBP, y AKBN, resultando un error de estimación de 22%.

En la figura 3.2.33, el corte E, el contenido de agua varía entre 10 y 100 %. Los contenidos de agua mayores están localizados hasta 15 m de profundidad; la línea negra continua representa la base del estrato superficial, el cual, sigue la misma pauta desde el corte C y D, con la presencia de un "Horst" en las secciones centrales (véase 3.1.2.d). Los estratos más profundos se muestran de manera discontinua, (por la presencia del "Horst"); el estrato de arcilla firme (color rosa, $w = 30-40\%$) presenta mayor uniformidad en la intercalación con el estrato de arena carbonatada (color gris, principalmente, $w < 30\%$) mostrando mayor erradicidad. También se ha detectado la presencia de al menos una zona de falla (línea discontinua) que atraviesa el corte E. Dicha estructura puede verse en la figura 3.2.24 en la cartografía de falla.

En la figura 3.2.24, se observa en planta que la sección E2 al E4 es cortada por dos fallas, una de ellas atraviesa exactamente por el SV E2, por lo que identificarla es difícil a comparación de la otra falla que se encuentra entre los SV E3 y E4. No hay referencias en el informe geotécnico AKP con respecto a la profundidad de las fallas, sin embargo, la falla en el SV E2 en el corte estimado no se aprecia por lo que podría ser más profunda. El estrato guía G1 comprendido entre 28 m a 32 m en la sección E1 a E3, muestra una discontinuidad con respecto al ubicado en la sección E4 a E8 por encontrarse a una profundidad de 35 a 40 m. Esto indica la presencia de la falla. El estrato guía continua a la profundidad de 23 a 32 m en las secciones E9 al E13, por lo que esto puede ser producto de movimientos en las fallas.

En general se observa que en la figura 3.2.34, el corte tiene una desviación estándar muy uniforme, de entre 5 y 10%. También se muestra cómo el sondeo real AKB1 y AKD1 esta muy cercano, pues la desviación estándar es muy baja, de 0 a 5%. Las zonas de alta

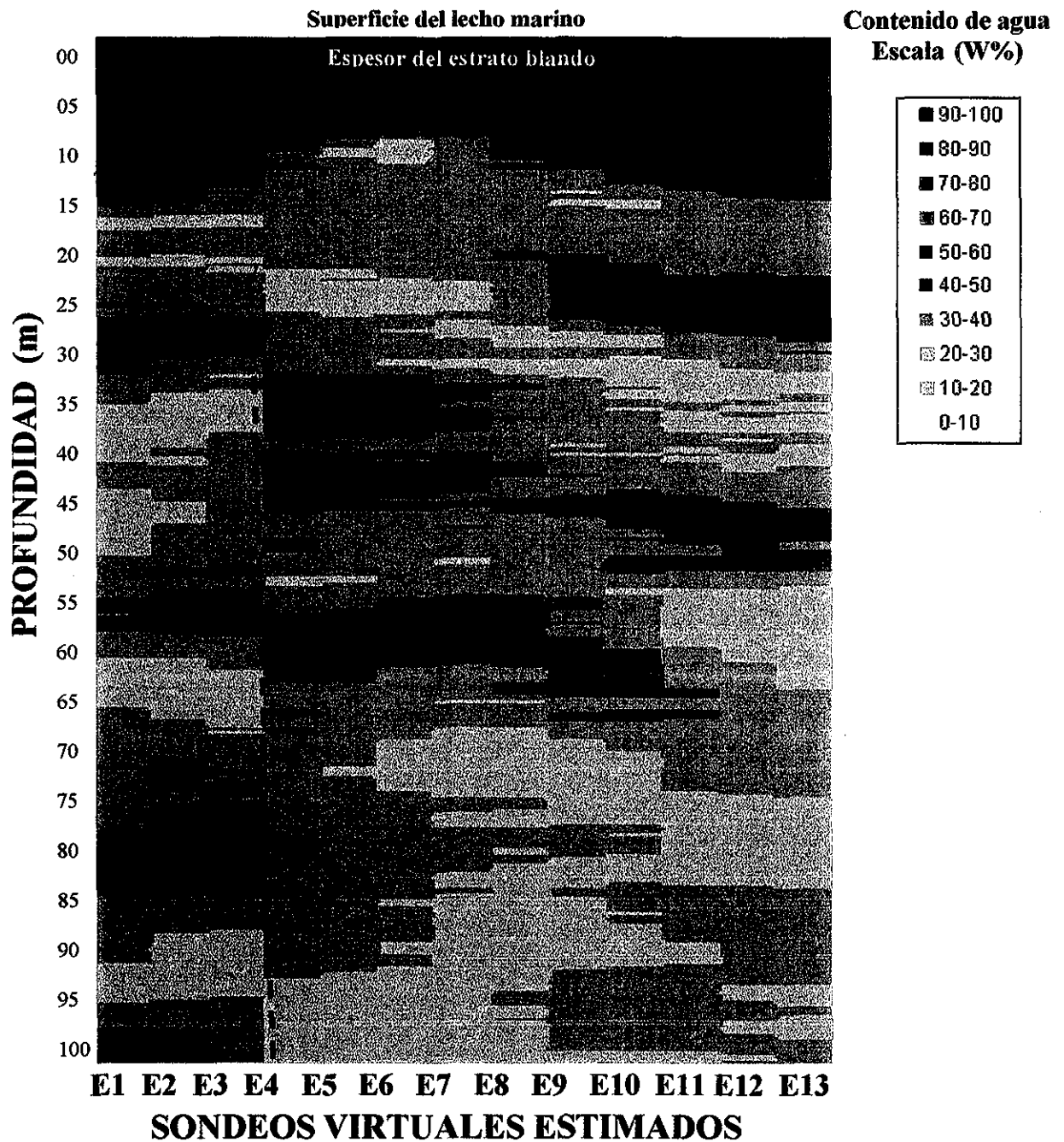


OBSERVACIONES:

1. Las zonas amarillas corresponden a un menor error de incertidumbre de los sondeos reales AKS4 y AKQ1 que pasa en la línea virtual del corte estimado entre D2 y D3.
2. Zona con error de incertidumbre alto, posible zona de arrecifes de coral enterrados.

Figura 3.2.32 Desviación estándar del corte estimado D

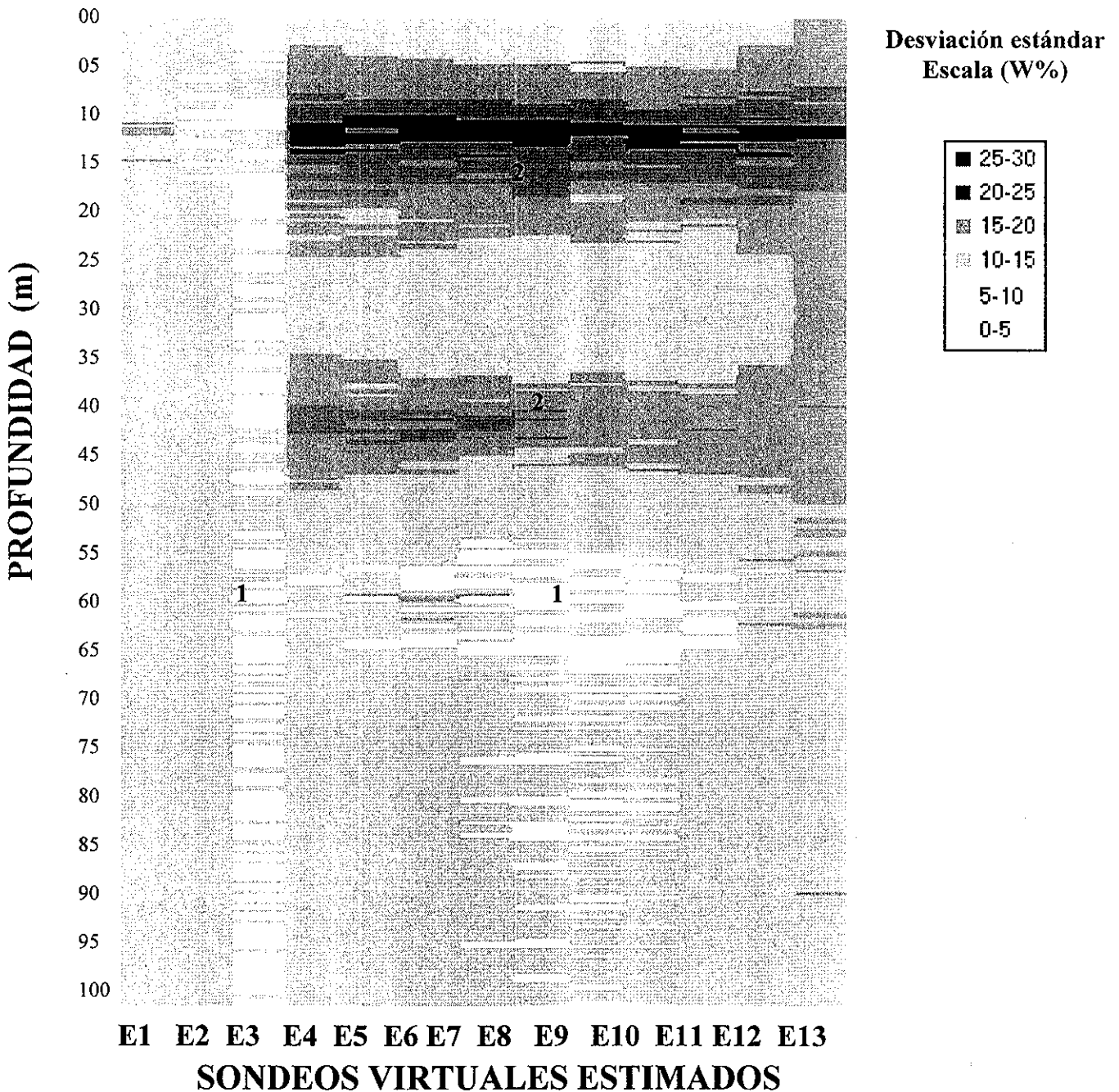
TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



OBSERVACIONES:

1. La falla encontrada se debe a la discontinuidad del estrato guía *G1* y *G2* localizada entre E3 y E4.
2. La zona en el abultamiento (E4 al E8) puede deberse a la manifestación orográfica del "Horst".

Figura 3.2.33 Corte estimado E



OBSERVACIONES:

1. Las zonas amarillas corresponden a un menor error de incertidumbre en el sondeo real AKP cercano a E3 y en la zona NE la influencia de los sondeos reales AKC1 y AKD1 se asocian a la sección E8 al E11.
2. Zona con alto error de incertidumbre debido a una posible zona de arrecifes enterrados.

Figura 3.2.34 Desviación estándar del corte estimado E

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

desviación, de 10 a 15%, se encuentran entre la sección comprendida entre E4 al E13, en dos grandes zonas, pero diferentes profundidades de 5 a 20 m y de 35 a 40 m. Las zonas en amarillo (también llamadas zonas de luz) son áreas cercanas a los sondeos reales: AKB1 y AKD1. La falla que se encuentra entre los SV E3 y E4, con una cercanía notable al sondeo real, AKP, hace que la incertidumbre del análisis sea muy baja en esta parte de la sección.

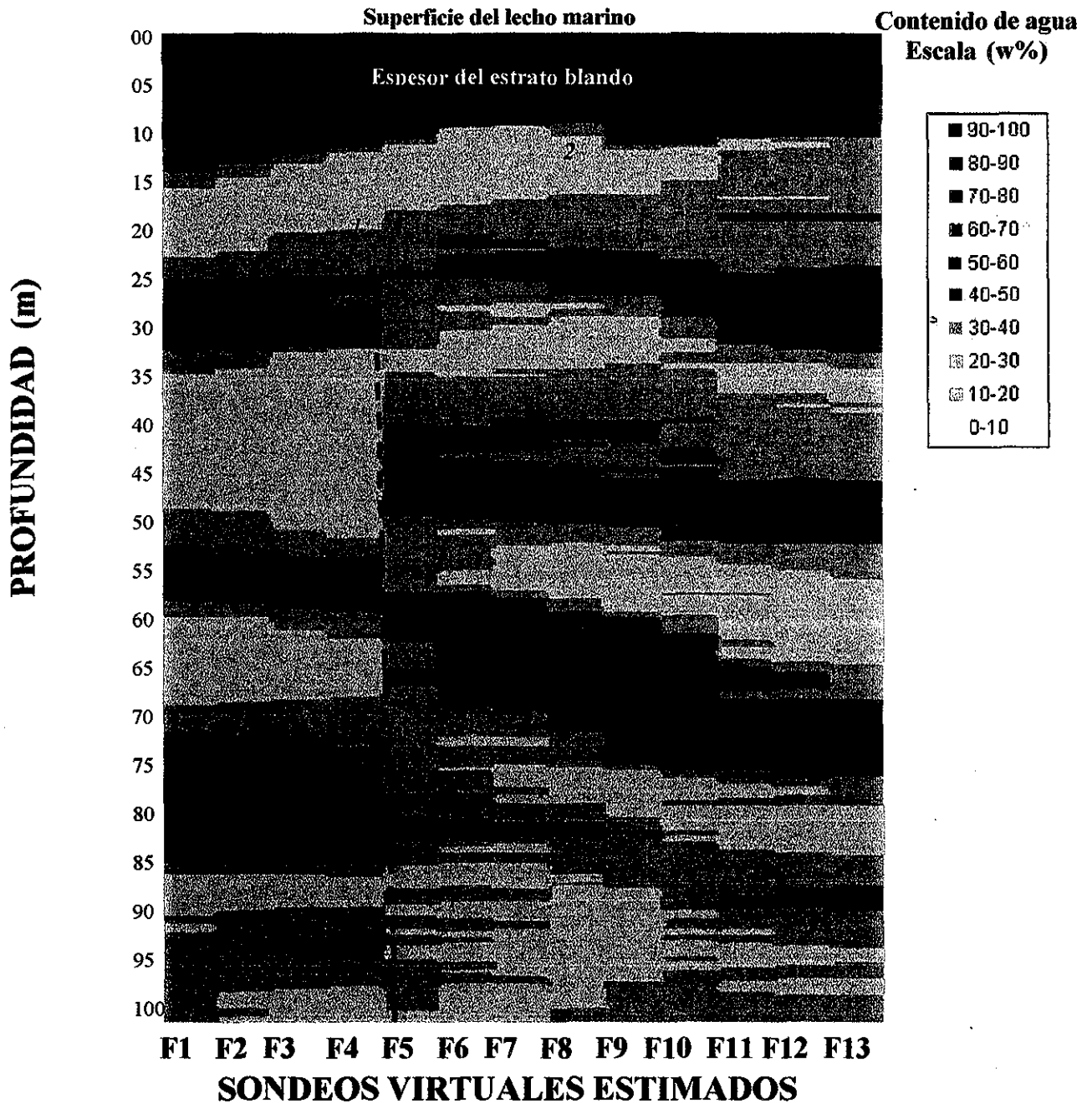
- **Corte estimado F y su desviación estándar.**

La sección del corte estimado F1 al F4, se construyó con los sondeos reales: AKO, AKFO, AKP, KZ, AKK1 y AKF (error de estimación de 21.7%). En cuanto a lo que resta de la sección estimada F5 al F13 se construyó utilizando los sondeos reales: AKFO, AKF, AKC1, C2000, AKJI, C1081, AKA1, AKK2, AKDB, AKN2, AKDB, AKN2, AKBC2, AKBC1, AKBP, AKBH, AKB2, AKBE, AKBQ1, AKBQ2 y AKD1 (error de estimación de 21.3%).

En la figura 3.2.35, corte F, el contenido de agua varía entre 10 y 100 %. Los contenidos de agua mayores están localizados hasta 12 m; la línea blanca continua representa la base del estrato superficial, el cual, sigue la misma pauta desde el corte D y E, con una pendiente poco pronunciada y la presencia de un "Horst", todavía presente en las secciones centrales al igual que los cortes anteriores. Los estratos más profundos se muestran de manera homogénea, empezando por el estrato de arena (color gris, $w = 20-30\%$) por la presencia del "Horst", y el estrato de arcilla firme (color rosa, $w = 30-40\%$) es más caótico; la presencia de los estratos guía G1 y G2 es más evidente que en los cortes anteriores. El estrato superficial comienza en 16 m y luego llega en su punto más alto a 10 m de espesor, y en la sección virtual F11 a F13 tiene hasta 8 m de espesor.

En la figura 3.2.24, se observa en planta que la sección F1 a F2 tiene una pequeña falla local, que no se observa en el corte estimado F. Una falla más importante se observa entre la sección F3 y F4. Otra falla se localiza entre la sección F4 y F5, ésta se observa en el corte estimado de manera más clara debido a que el estrato guía G1, presenta una discontinuidad, a la profundidad de 25 a 30 m, en la sección comprendida entre F1 al F4. Otra falla entre la sección F6 y F7 no es tan evidente como la anterior, porque podría ser más profunda del corte estimado F. Se observa el abultamiento en la superficie; el reporte geotécnico AKA1 enuncia claramente la presencia de gas en esa zona, (sección F5 a F9) pero también puede ser causa de la orografía del estrato blando que es menos pronunciado que en el caso de los cortes que lo presentan. En lo que respecta a las secciones del F11 al F13, los informes geotécnicos no especifican nada debido que los sondeos cercanos se hicieron sin que la compañía reportara rasgos geológicos relevantes.

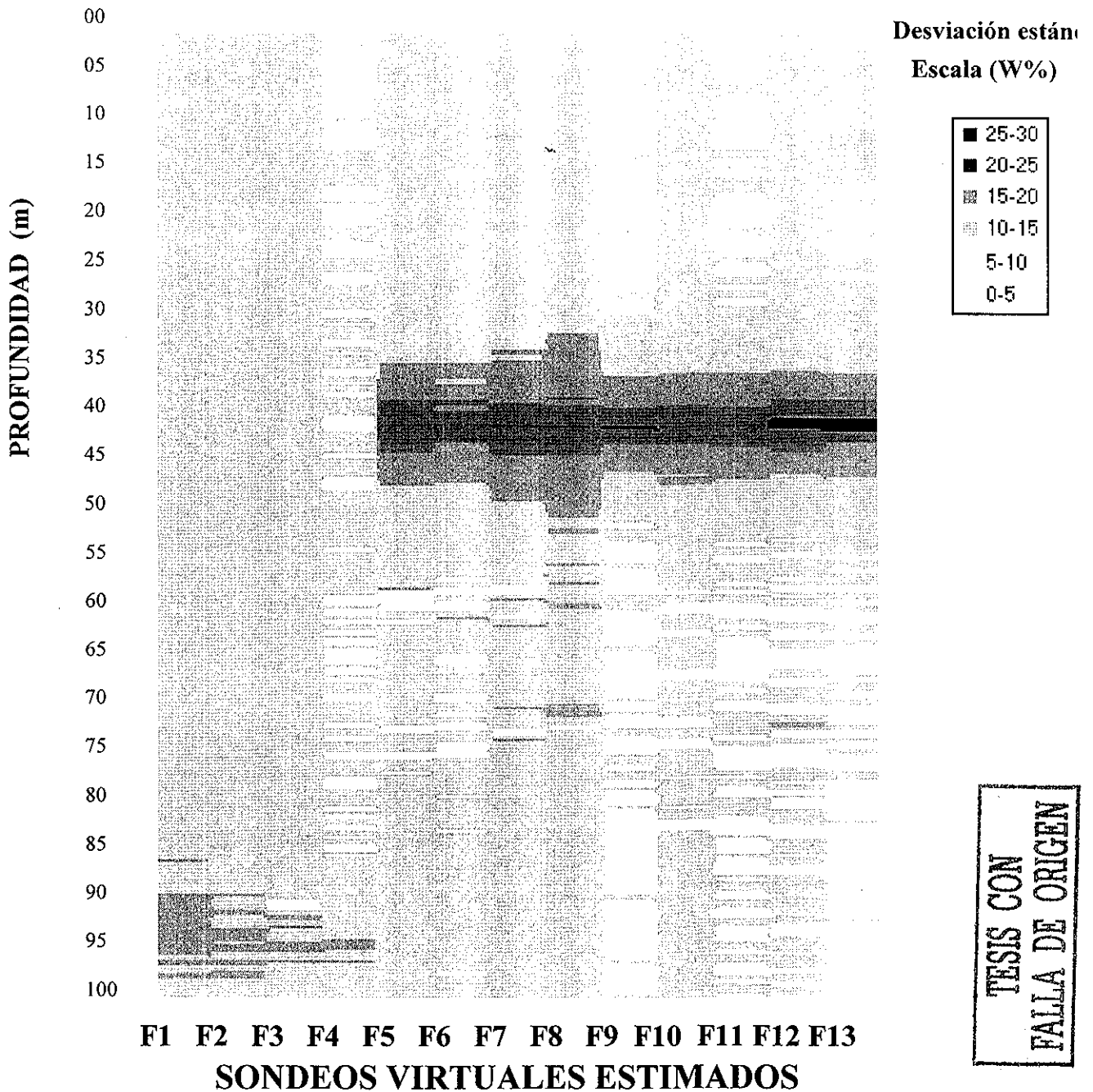
En la figura 3.2.36 se observa que el corte tiene una desviación estándar baja y muy uniforme, de entre 5 y 10%. La presencia de varios sondeos reales se indica en varias zonas de desviación estándar baja (de 0 a 5%). Las zonas de alta desviación, de 10 a 20%, sólo se encuentran entre la sección comprendida entre F5 al F13 en una zona muy definida entre profundidades de 35 a 48 m, además una pequeña zona ubicada entre 90 y 98 m de profundidad en las secciones F1 al F2. Las zonas en amarillo son áreas cercanas a los sondeos reales: AKO, AKJI, AKBQ1, AKBQ2, AKBH y AKBP.



OBSERVACIONES:

1. La falla encontrada se debe a la discontinuidad del estrato guía *G1* localizada entre F4 y F5.
2. La zona en el abultamiento (F7 al F9) puede deberse a la manifestación orográfica del "Horst", éste va disminuyendo de espesor y se traslada hacia el NE, en comparación con el corte estimado E.

Figura 3.235 Corte estimado F



OBSERVACIONES:

1. Las zonas amarillas corresponden a un menor error de incertidumbre en el sondeo real AKO cercano a F4 y en la zona NE la influencia de los sondeos reales AKJ1 y AKBQ1, AKBQ2, AKBH y AKBP se asocian a la sección F10 al F13.
2. Zona de un alto error de incertidumbre debido a una posible zona de arrecifes enterrados.

Figura 3.2.36 Desviación estándar del corte estimado F

- **Corte estimado G y su desviación estándar.**

La sección estimada G1 al G4, se construyó utilizando los sondeos reales: AKS1, C255, KZ, KZA, AKK1 y AKO (error de estimación de 21.4%). En lo referente la sección estimada G5 al G13 los sondeos reales utilizados para la estimación son: AKJ, AKJH, C2001, AKJI, C1081, AKN2, AKM, AKBN, AKK3, C1005, AKMB, AKBE, AKA1, AKLP y EKA (error de estimación 21.6%).

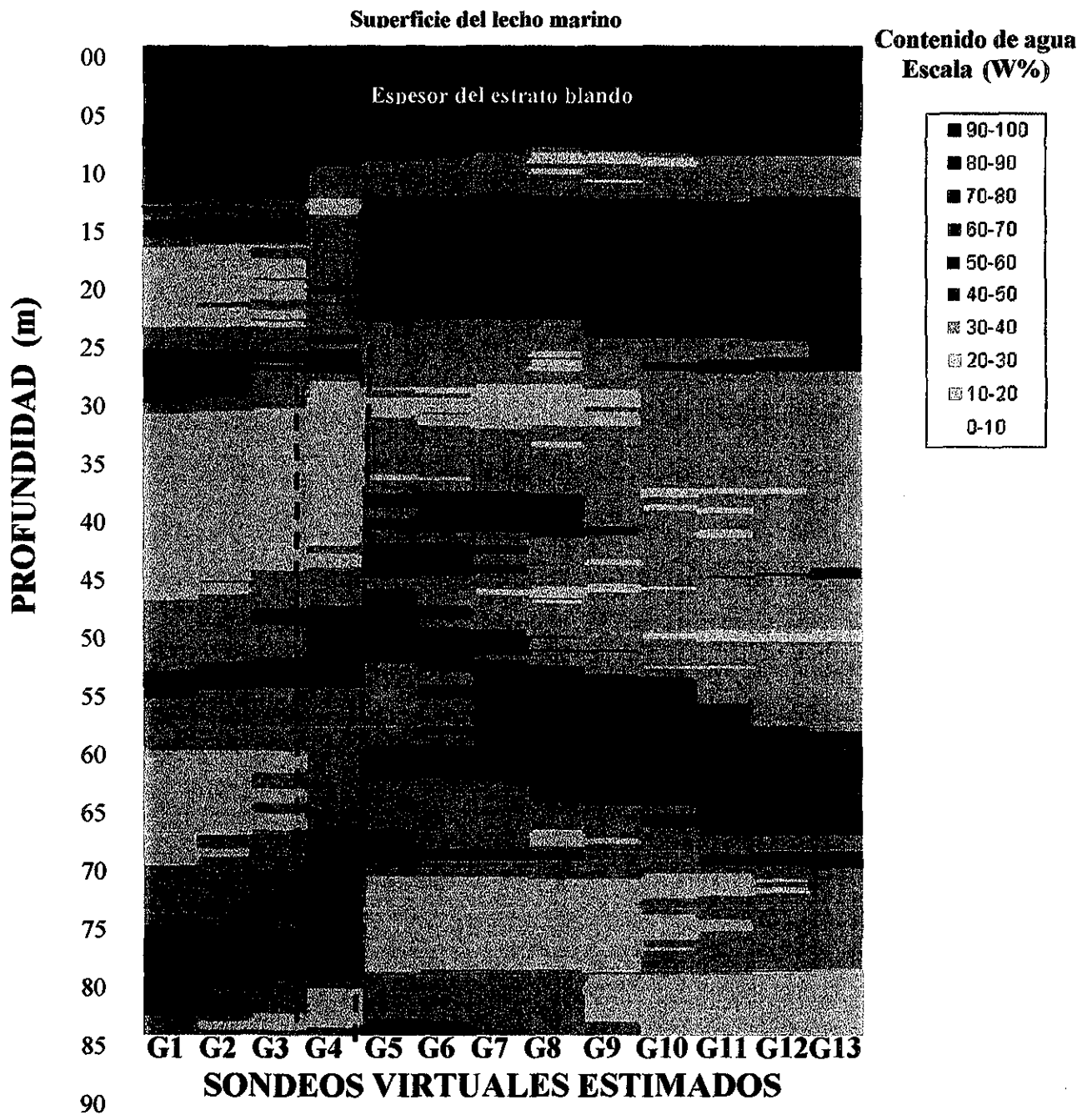
En la figura 3.2.37, en el corte G el contenido de agua varía entre 10 y 100 %. Los contenidos de agua mayores están localizados hasta 10 m de profundidad, desde el sondeo estimado G5 al G12, para luego disminuir hasta 8 m; la línea blanca continua representa la base del estrato superficial, el cual, presenta una pequeña depresión ubicada entre la sección G1 a G4 con espesores de 18 m cercana al C255. Los estratos más profundos no se muestran con una intercalación definida, sino que el estrato de arena (color gris, $w = 20-30\%$) se observa del lado SW de la falla y también a mayores profundidades. En contraste, el estrato de arcilla firme (color rosa, $w = 30-40\%$) representa una parte más homogénea en todo el corte estimado G.

Se observan dos fallas muy cercanas que se ubican entre los *SV* G4 y G5, esta zona se ubica como una zona escalonada de grabens, cercana a la depresión en el sondeo C255 figura 3.2.37. Sin embargo, el apartado geofísico del reporte geotécnico de AKK1, más cercano a la falla, no muestra que la presencia de falla a bajas profundidades, mientras que el informe geotécnico correspondiente a AKTJ menciona que esa falla está enterrada por 32 m de sedimentos. Las fallas se identifican por la discontinuidad del estrato guía *G1* localizado entre 30 a 35 m, las secciones G1 al G5, sin embargo se encuentra con mayor espesor entre los 15 y 30 m en las secciones G6 al G13. Lo mismo sucede con el estrato de arena que disminuye su espesor, hacia el lado NE de la falla a la profundidad de 35 m, en la sección G5 al G9. El estrato guía de arcilla firme se observa con un abultamiento, por lo que también puede ser consecuencia de esta falla.

En general, se observa en la figura 3.2.38 que el corte tiene una desviación estándar baja muy uniforme de entre 5 y 10%. La presencia de varios sondeos reales se indica en varias zonas de desviación estándar (es muy baja de 0 a 5%), como en los *SV*, G3 y G4. Las zonas de alta desviación (de 10 a 25%) se encuentran entre la sección comprendida entre G5 al G13 en una zona muy definida entre profundidades de 10 a 25 m, y otra entre 35 y 45 m de profundidad. En general, el *SV* G13, presenta una desviación alta, por no tener sondeos reales cercanos. Las zonas en amarillo (también llamadas zonas de luz) son áreas cercanas a los sondeos reales: C255, AKK1, AKM, AKMB.

- **Corte estimado H y su desviación estándar.**

La sección estimada H1 al H7 se construyó utilizando sondeos reales: C255, AKS1, AKK1, KZ, KZA, KUTC1, AKLQ, AKL1, AKLP, AKLE, C1292, C1046 y AKLK obteniéndose un error de incertidumbre asociado a la estimación de 21%. Para la sección estimada del corte H8 al H13 los sondeos AKTM, AKK3, C1005, AKMB, EKA, AKM, AKN2, AKBN, AKB2, AKBE, AKBH, AKL2, AKL3, AKLK, AKL1, AKLQ, C1046, AKLP, AKLE,

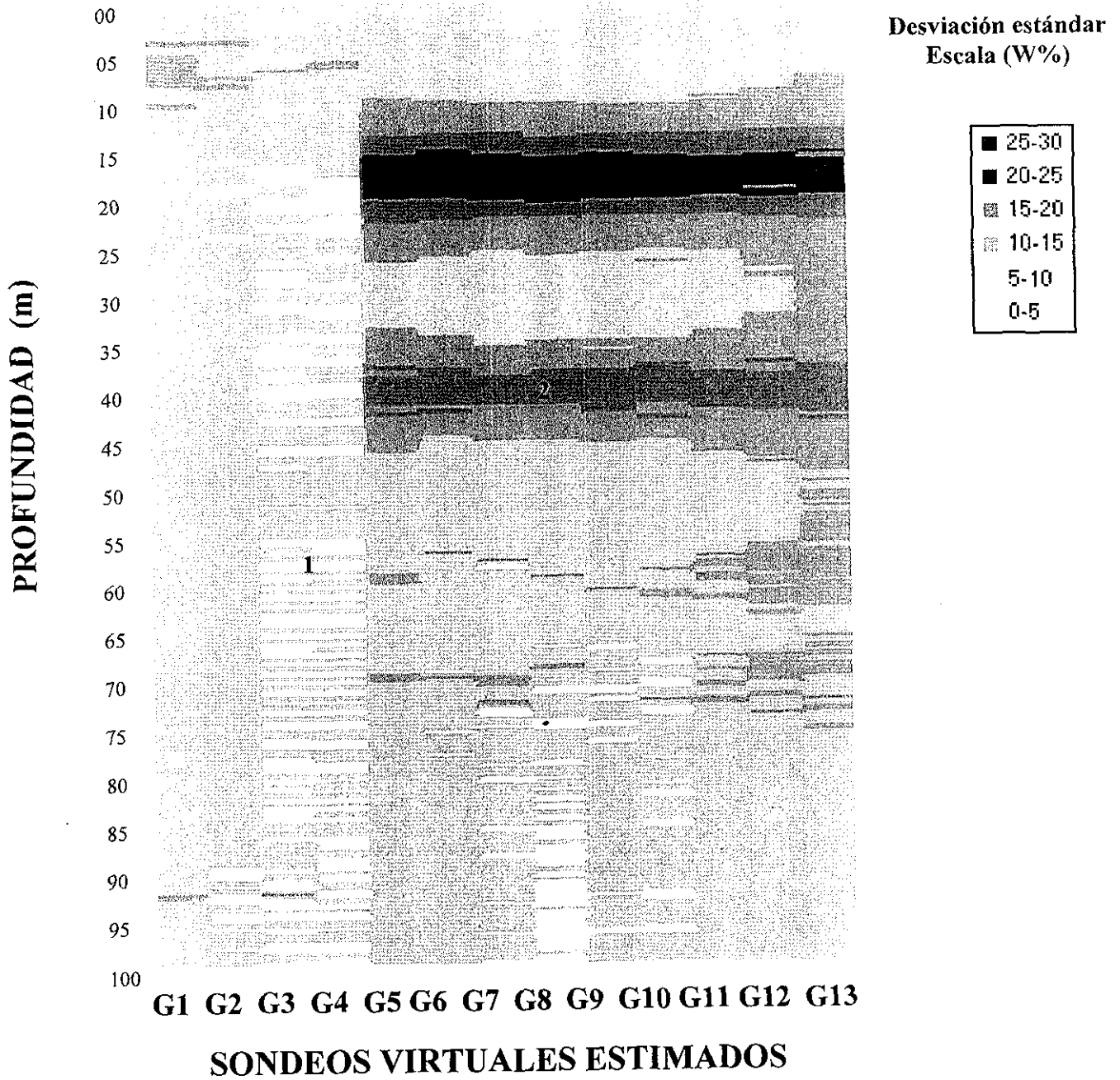


OBSERVACIONES:

1. Zona escalonada de grabens, cercana a la depresión en el sondeo C255. La falla encontrada se debe a la discontinuidad del estrato guía *G1* localizada entre *G3* y *G5*, documentada en el informe AKTJ.
2. La zona en el abultamiento ya no se observa en este corte, pero si una zona de depresión (*G1* al *G3*) formada por los sondeos reales: C255 y AKS1

Figura 3.2.37 Corte estimado G

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



OBSERVACIONES:

1. Las zonas amarillas corresponden a un menor error de incertidumbre en los sondeos reales C255 (G3) AKK1 (G4), AKM (G7-G8), y AKMB (G10)
2. Zona de un alto error de incertidumbre debido a una posible zona de arrecifes enterrados.

Figura 3.2.38 Desviación estándar del corte estimado G

C1046, C1292 y KUTC1 fueron escogidos para construir la estimación en el programa SAAG resultando un error de incertidumbre de 21.5%.

En la figura 3.2.39, en el corte H el contenido de agua varía entre 10 y 100 %. Los contenidos de agua mayores están localizados hasta 10 m, en promedio desde la sección H2 al H7, para luego disminuir hasta 8 m, en la sección H8 al H13; la línea blanca continua representa la base del estrato superficial, el cual, también se observa una pequeña depresión ubicada en SV H1 con un espesor de 15 m. Los estratos más profundos muestran una intercalación bien definida, donde el estrato de arena (color gris, w =20-30%) se observa con una capa uniforme con un espesor de 10 m cuando subyace inmediatamente al estrato superficial.

En la figura 3.2.39 las fallas interpretadas se observan un poco más profundas que las de los anteriores cortes, probablemente porque a medida que los sondeos se alejan de la plataforma continental las fallas tienden a ser más antiguas y por lo tanto más profundas. En el corte estimado H se vuelve a presentar el estrato guía en la sección H5 al H13 entre 25 y 35 m de profundidad, pero sin ninguna contraparte de su lado SW, es probable que este estrato se depositó a partir del SV H5. Es posible ubicar una zona de falla que se observa un poco profunda a 80 m aproximadamente en el sondeo estimado H6, que concuerda con la falla enterrada reportada en ese mismo estrato, que tiene 70 m de sedimentos, según el informe geotécnico AKLK.

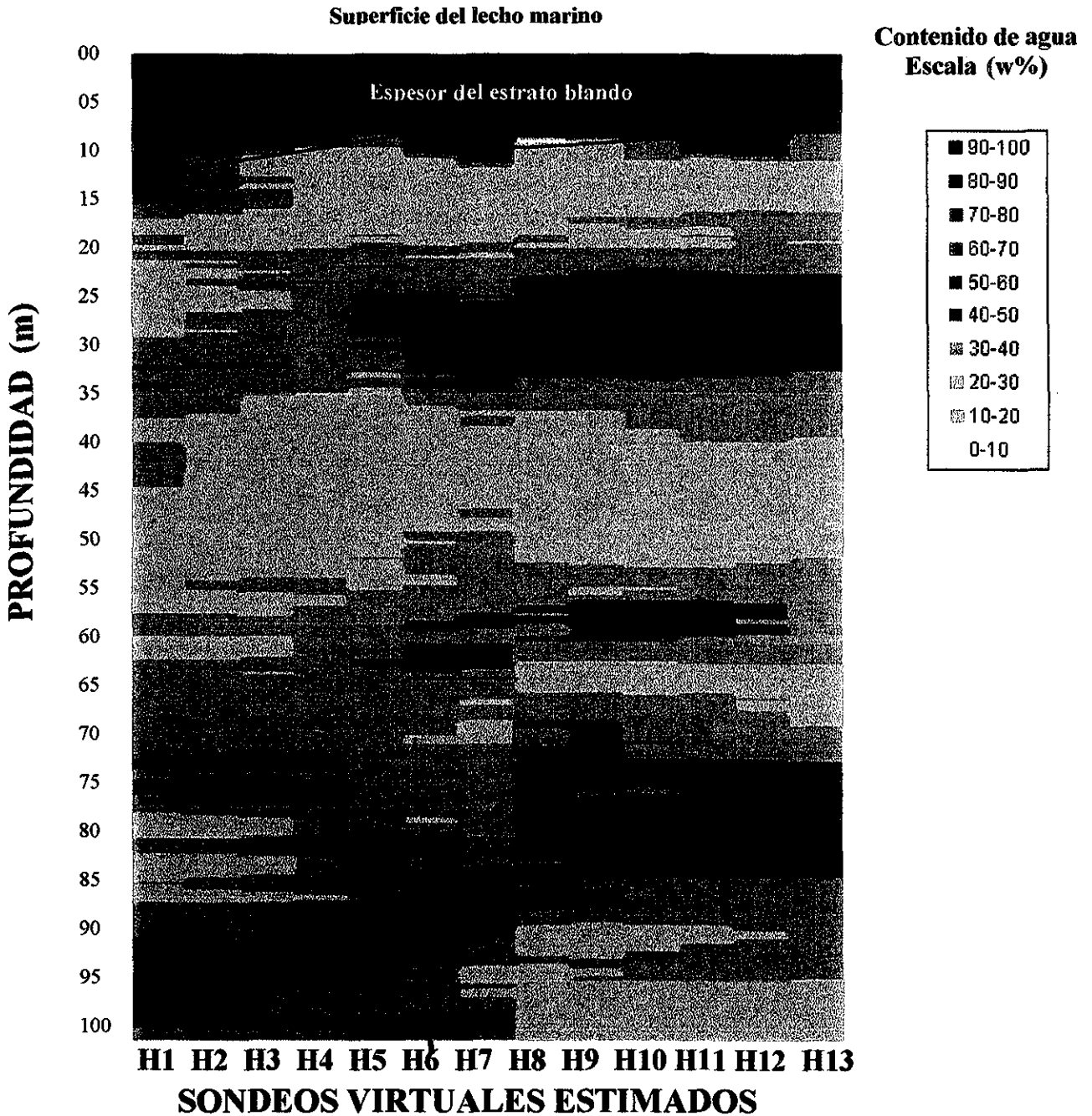
La desviación estándar del corte H (figura 3.2.40) es una de las desviaciones media, baja, más uniforme que se ha observado, junto con la desviación general del corte F, y en general se mantiene entre 0 y 10%. La presencia de varios sondeos reales se indica en varias zonas de desviación estándar es muy baja de 0 a 5%, como en la sección virtual H3 y al H7. Las zonas de alta desviación de 10 a 20% se encuentran entre la sección comprendida entre H1 al H7 en una zona muy definida entre profundidades de 85 a 100 m. Otra zona de alta desviación ubicada en la sección H8 al H13 entre 18 y 35 m de profundidad, junto con la zona entre los 60 a 65m. En general, hay pocas zonas de luz, sin embargo, las zonas en amarillo son áreas cercanas a los sondeos reales: KZ, C1046, AKTM.

f) Simulación de cortes virtuales

La simulación es una posible realización del campo a partir del modelo propuesto, por lo que los cortes simulados solo representan una opción entre otras posibles. Al igual que la estimación construida, los cortes simulados son obtenidos con el programa SAAG. Después del cálculo de la estimación, se utilizan los mismos sondeos estimados inicialmente, por lo que los sondeos virtuales simulados están orientados y ubicados en las mismas coordenadas que los sondeos virtuales estimados. Las bases de la aplicación de este tema se pueden revisar en el apartado 2.2.7.

- **Corte simulado A**

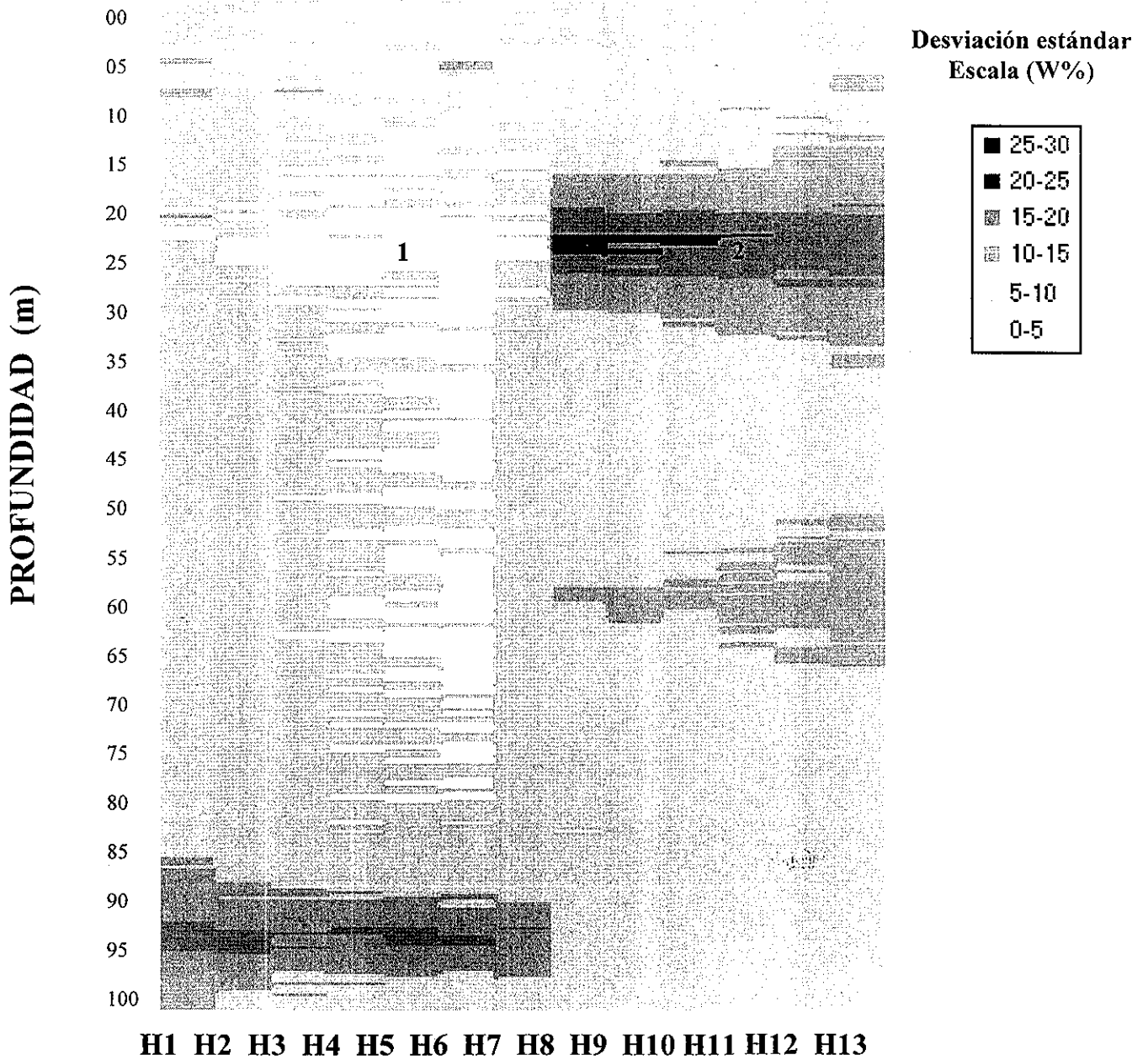
En el corte, la falla ubicada entre los SV A4 y A5 en superficie, no se observa tan clara como en el corte estimado A, sin embargo, en la zona de la falla el estrato guía se interrumpe en el sondeo A5 a una profundidad de 25 m, que esto si coincide con la



OBSERVACIONES:

1. La falla que se observa profunda a 80 m aproximadamente en el sondeo estimado H6, concuerda con la falla documentada según el informe geotécnico AKLK.
2. El estrato guía *G1* se interrumpe en la dirección SW.

Figura 3.2.39 Corte estimado H



OBSERVACIONES:

1. En general, hay pocas zonas de luz, sin embargo, las zonas en amarillo son áreas cercanas a los sondeos reales: KZ, C1046, AKTM (secciones H4 al H8).
2. Zona de un alto error de incertidumbre debido a una posible zona de arrecifes enterrados.

Figura 3.2.40 Desviación estándar del corte estimado H

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

cartografía de fallas (figura 3.2.24) y en la sección simulada de A1-A4 entre 65 a 70 m se observa una discontinuidad con A4 a A7 a una profundidad de 50 a 60 m, pero en general la distribución de los estratos profundos se observa caótica. Con base al estrato superficial se distingue una zona, donde los sedimentos tienen mayor espesor (20 m), entre la sección simulada A5 al A7 que se manifiesta en la variabilidad del estrato blando. Otra anomalía discontinua es el estrato guía *G2* a la profundidad entre 60 a 65 m en la sección virtual A8 y A13 muestra la presencia de otra falla no referenciada, entre los SV A7 y A8 alineada al NE de la zona de mayor espesor (figura 3.2.41).

- **Corte simulado B**

En el corte simulado se observa la falla más profunda, aunque más corrida hacia la derecha, se puede tratar de una zona donde simplemente se termine el segundo estrato guía, puesto que el primer estrato guía también se muestra interrumpido como en el corte estimado. La zona con mayor espesor de sedimentos representa un caso de valor extremo³ que puede verse en la simulación (valor máximo de 25 m de espesor) observado en los sondeos B8 y B9, lugar de la fuerte depresión, mostrada en la variabilidad geométrica del estrato blando (figura 3.2.42).

- **Corte simulado C**

El corte simulado C presenta una disminución del espesor del estrato superficial, menor que en el corte estimado C. Por otra parte, la falla en el corte simulado C no se observa a la misma profundidad en el corte estimado C, así como tampoco la presencia de la falla descrita en la cartografía entre los SV C6 y C7, pero en general, la sección C6 al C13 se describe como una zona caótica a profundidades mayores de 45 m (figura 3.2.43).

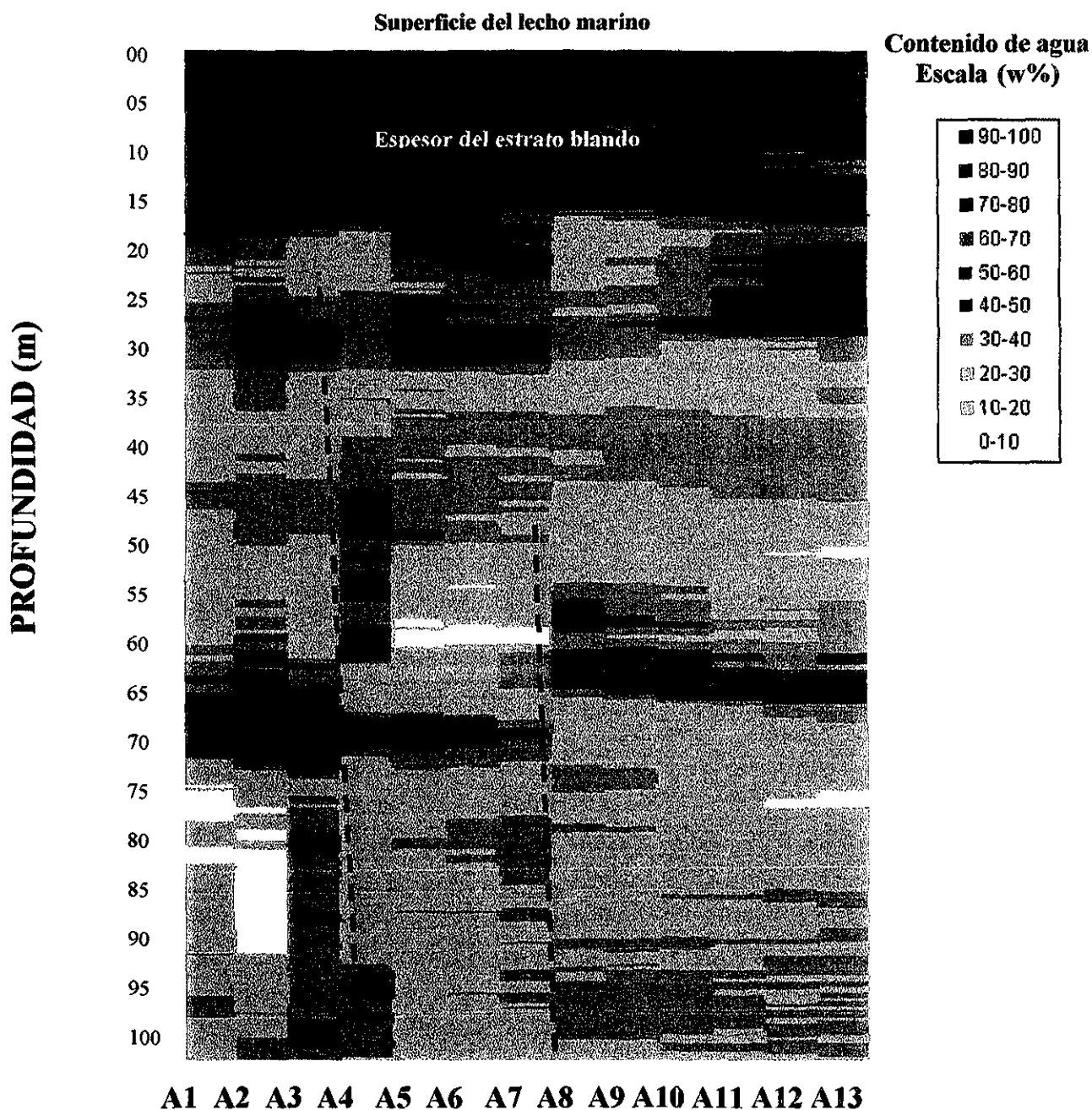
- **Corte simulado D**

En el corte simulado D se observa la misma distribución del estrato blando que se vio en el corte estimado D, sin embargo, las zonas de falla no son evidentes, sólo una pequeña falla se observa entre los sondeos simulados D4 y D5, a una profundidad de 75m, por la discontinuidad asociada al estrato guía *G2* (figura 3.2.44). Las fallas tienden a localizarse más profundas.

- **Corte simulado E**

El corte simulado E sigue la misma variabilidad que su contraparte estimada E, sin embargo, en la zona del estrato blando, las pendientes son más suavizadas, es decir, esta zona no tiene depresiones importantes. En lo que respecta a la falla encontrada en el corte estimado E, ésta se observa en la misma posición, pero ésta se continúa hasta la base del estrato superficial, como otro valor extremo de la condición crítica que muestra en una simulación (figura 3.2.45).

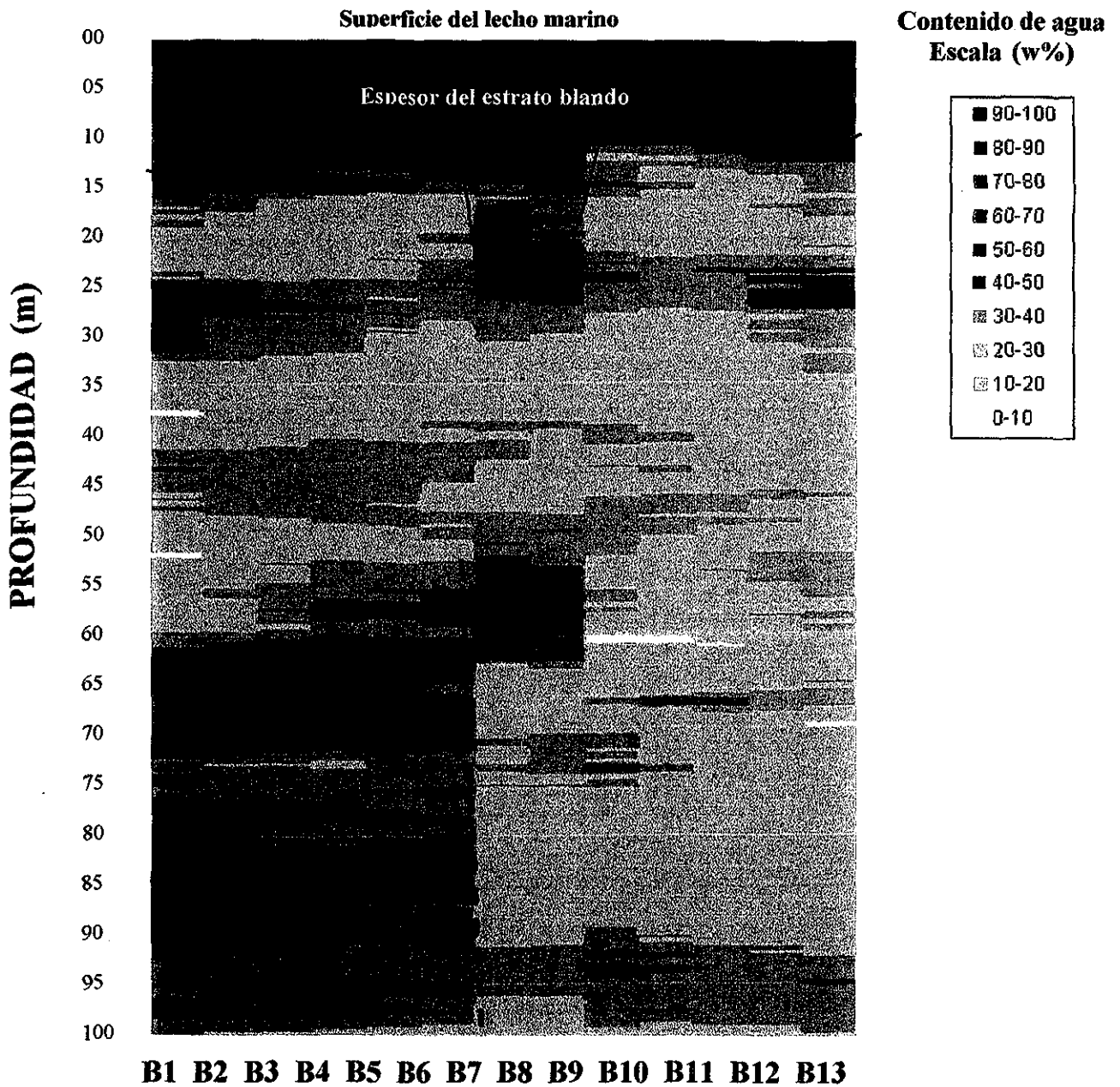
³Un valor extremo es un valor máximo o mínimo, que puede observarse en puntos específicos del campo, los cuales pueden ser considerados como potencialmente problemáticos.



SONDEOS VIRTUALES SIMULADOS

- La zona de la falla el estrato guía se interrumpe en el sondeo A5 a una profundidad de 25 m, lo cual coincide con la cartografía de fallas (figura 3.2.24).
- En general la distribución de los demás estratos se observa caótica.
- Otra falla en el sondeo A8, no se observa en la cartografía, pero es la discontinuidad del estrato G2.

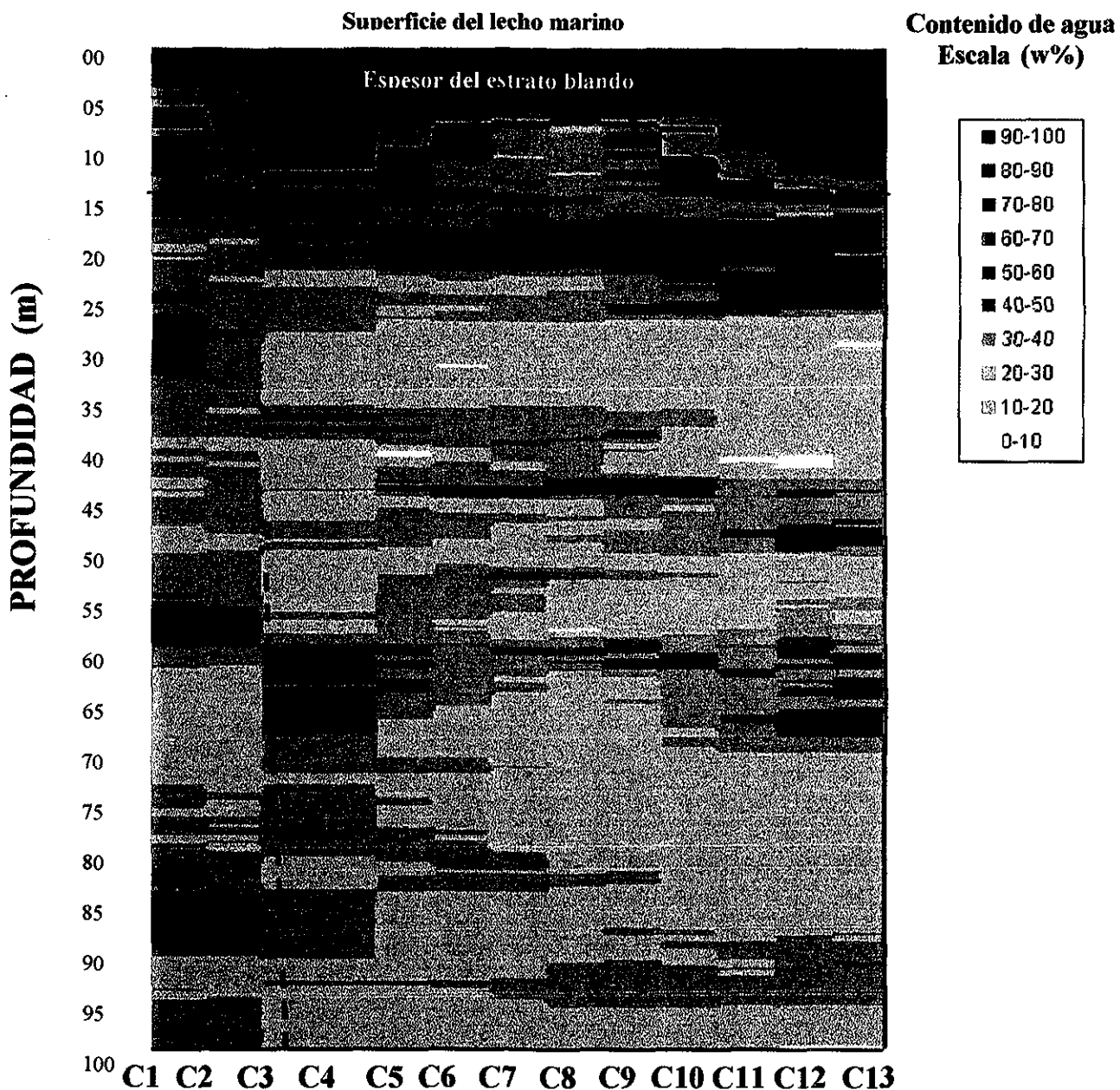
Figura 3.2.41 Corte simulado A



SONDEOS VIRTUALES SIMULADOS

- La zona de la falla el estrato guía se interrumpe en el sondeo A5 a una profundidad de 25 m, lo cual coincide con la cartografía de fallas (figura 3.2.24).
- La línea discontinua en la base del estrato blando es una opción posible de valor extremo de la simulación.
- En general la distribución de los demás estratos se observa caótica.

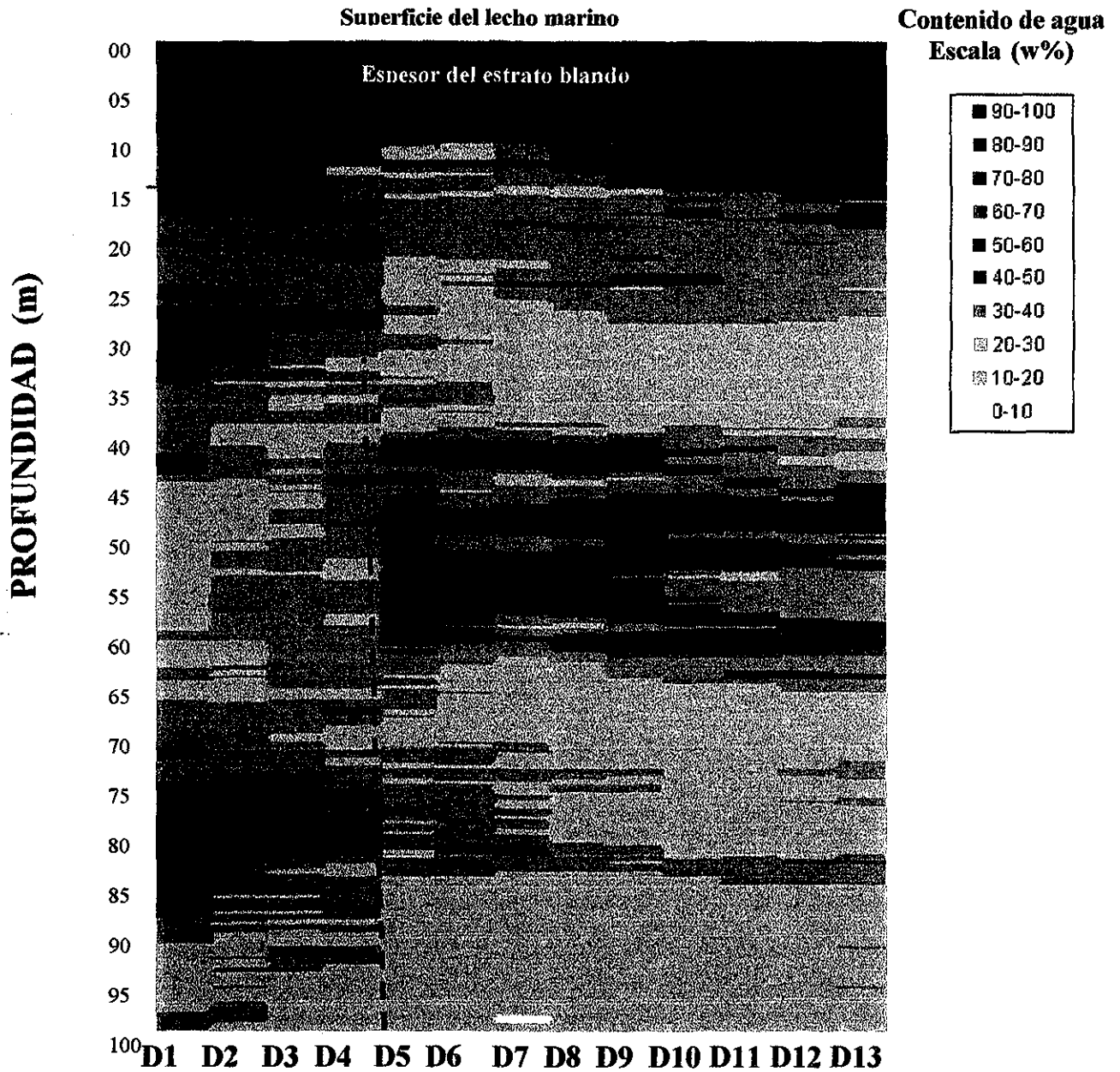
Figura 3.2.42 Corte simulado B



SONDEOS VIRTUALES SIMULADOS

- La zona de la falla el estrato guía se interrumpe en el sondeo C3 a una profundidad de 60 m.
- El espesor del estrato blando es menor en comparación al corte estimado C, pero se conserva la manifestación orográfica del "Horst"
- En general la distribución de los demás estratos se observa caótica a una profundidad mayor a los 45 m.

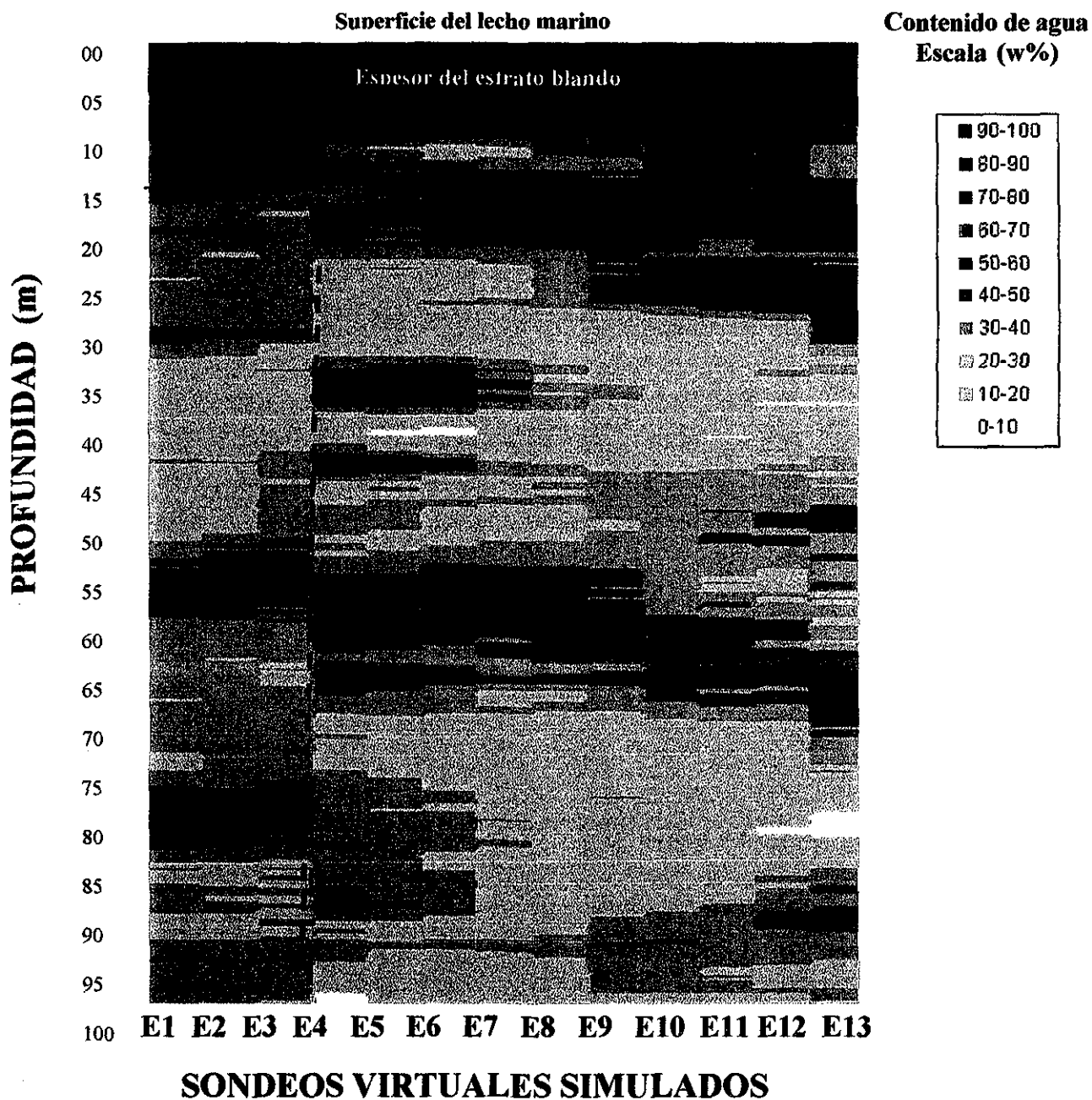
Figura 3.2.43 Corte simulado C



SONDEOS VIRTUALES SIMULADOS

- La falla se observa entre los sondeos simulados D4 y D5, a una profundidad de 75m, por la discontinuidad asociada al estrato guía G2.
- Se conserva la manifestación orográfica del "Horst", en el estrato blando.
- En general la distribución de los demás estratos es más uniforme que los cortes simulados anteriores.

Figura 3.2.44 Corte simulado D



- La falla se observa en la misma posición que le corte estimado E, pero puede ser que esta falla aflore en superficie como lo muestra el corte simulado.
- En el estrato blando coincide con el corte estimado E con las pendientes más suavizadas.

Figura 3.2.45 Corte simulado E

- **Corte simulado F**

En lo que respecta al corte simulado F, éste conserva variabilidad de la profundidad del estrato superficial, pero más suavizada. Las fallas también se mantienen con sus polaridades y profundidades (figura 3.2.46).

- **Corte simulado G**

En el corte simulado G, se observa un perfil más suavizado con respecto al estimado, y se presentan dos posibles opciones de la variabilidad del espesor del estrato superficial. La línea continua es la distribución aceptada, en contraste se presenta otra zonificación sugerida del estrato blando que aparece punteada, la cual no concuerda con la estimación, ni con las características de los sondeos de la zona, puesto que el espesor aumenta hasta 20 m, mientras la estimación es de menor espesor, pero se muestra como ejemplo de interpretación. Sin embargo el error de estimación en esa zona es alto, por lo que la posibilidad de que el estrato superficial tenga grandes espesores no es factible (zona punteada) y por lo que se reafirma la línea continua que presenta una desviación menor. Las cuencas escalonadas localizadas al W de la zona, se distinguen en las dos fallas propuestas y empiezan a partir de 45 m del lecho marino. Se destaca una zona caótica entre la sección simulada G4 y G10 en las profundidades entre 20 a 35 m (figura 3.2.47).

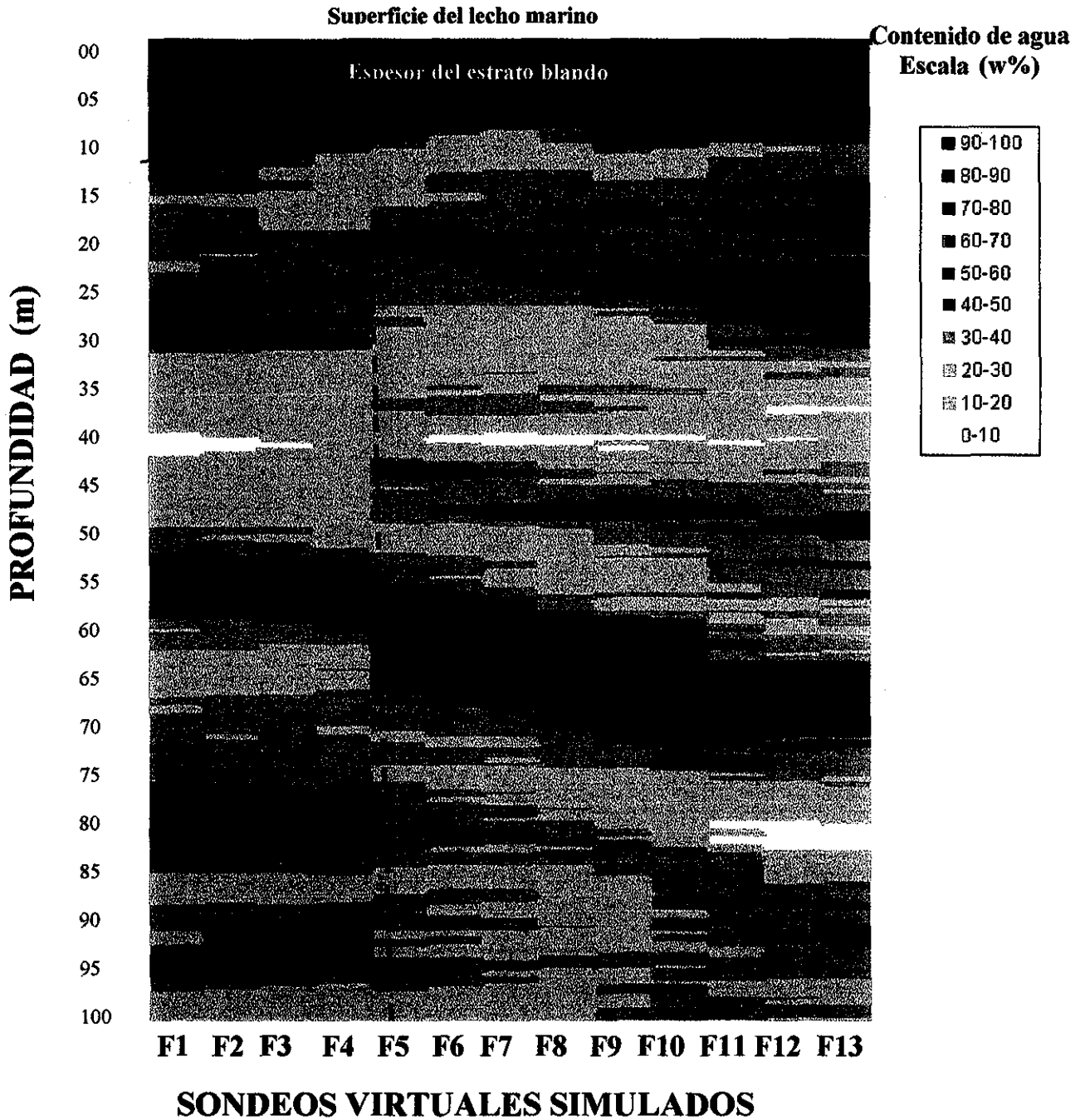
- **Corte simulado H**

En la figura 3.2.48 del corte simulado H, se observa que el espesor del estrato superficial tiene poca variabilidad, llegando hasta 8 m, esto concuerda con lo descrito en el corte estimado H, y también la base del estrato es más suavizada. En el caso de las fallas localizadas a mayor profundidad, en este corte simulado solo se presenta una entre las SV H8 y H9 que se prolonga hasta el estrato superficial, como resultado de otro valor extremo de la simulación.

3.2.3. Resistencia al corte

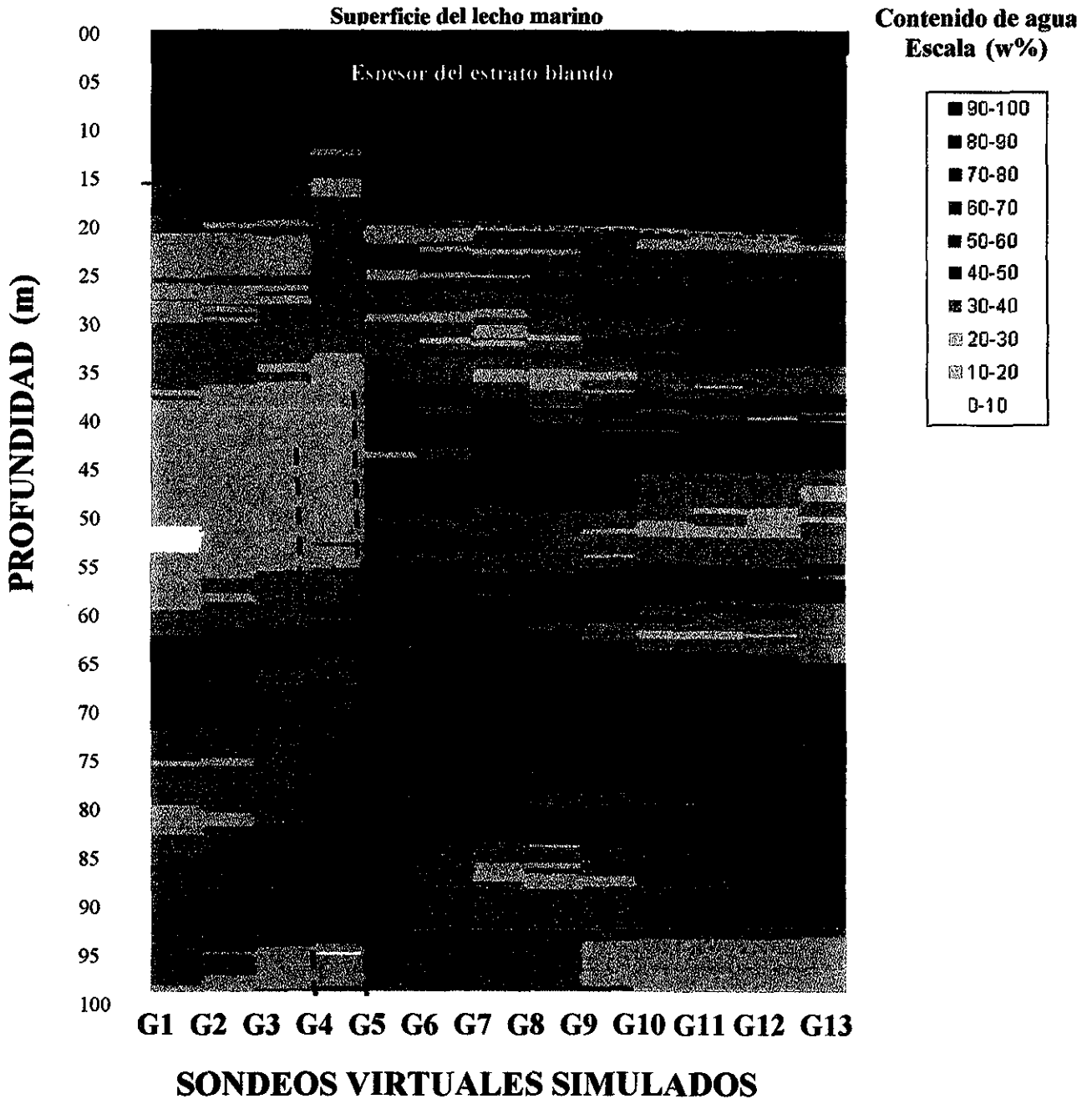
Para analizar la variable aleatoria “resistencia al corte” se cuenta con resultados de pruebas de distintos tipos: torcómetro, veleta miniatura, compresión simple y triaxial UU. En los 89 sondeos geotécnicos realizados, se observa que hay información en todos los estratos de datos de torcómetro y veleta miniatura, además de entre los distintos tipos éstos son los más abundantes y existe una mejor correlación entre ellos.

Los valores obtenidos con estas pruebas se analizan en una gráfica de dispersión general, incluyendo todos los sondeos para obtener un modelo que se ajuste a la tendencia lineal mediante un análisis de regresión. Se opta por tomar en cuenta como variable básica la resistencia obtenida con la veleta miniatura y se desarrolla un modelo de correlación para transformar los datos de torcómetro en resultados de veleta equivalentes.



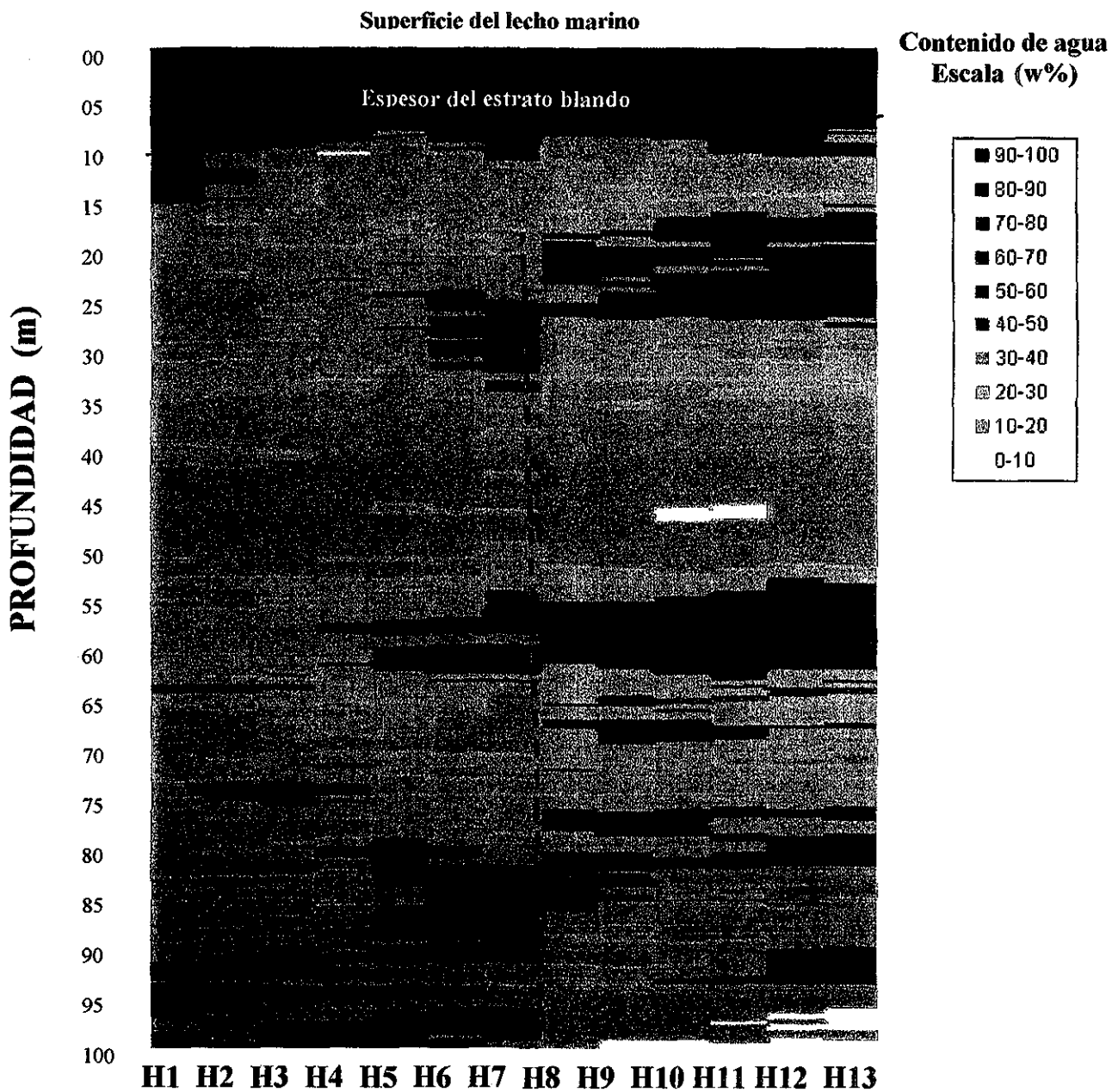
- La falla se observa en la misma posición que le corte estimado F.
- La base del estrato blando coincide con el corte estimado F, pero con pendientes más suavizadas.

Figura 3.2.46 Corte simulado F



- Las fallas que se observan entre en los sondeos simulados H4 y H5 se proponen como resultado de la cuenca escalonada en la zona W del área de estudio.
- En el estrato blando se presentan dos posibles variaciones de éste, escogiéndose la zona continua como aceptable porque en esa zona el estrato blando muestra menor espesor según el análisis de variabilidad.

Figura 3.2.47 Corte simulado G



SONDEOS VIRTUALES SIMULADOS

- La falla que se observa en el sondeo simulado H8, se aproxima a la superficie.
- El estrato blando muestra es poco espeso y su base se presenta suavizada.
- En general la distribución de los demás estratos es más uniforme.

Figura 3.2.48 Corte simulado H

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Al igual que en el caso del perfil de contenido de agua, el de la resistencia al corte está caracterizado por la presencia de un “estrato superficial” (constituido por una arcilla calcárea de consistencia muy blanda a blanda) y por los “estratos profundos”; por lo que se desarrolla un modelo lineal para cada uno.

La resistencia al corte analizada como variable aleatoria se propone, a su vez, como una variable auxiliar para el análisis geostadístico, cuya aplicación se describe en el inciso 3.4.3; sin embargo, se reconoce que podría también adicionarse una ecuación para la resistencia al corte como función de la profundidad para cada porción del sondeo.

a) Evaluación de la correlación entre veleta y torcómetro

- **Estrato superficial**

La resistencia al corte del estrato superficial es muy baja, con valores medidos con la veleta miniatura desde 1.4 kPa, y en torcómetro de 1.6 kPa, hasta valores mayores de 46 y 44 kPa, en torcómetro y veleta, respectivamente. Un estudio preliminar de dispersión correspondiente al estrato superficial mostró una influencia excesiva del escaso número de valores próximos al límite superior, por lo que se decidió acotar los valores hasta 25 kPa, como máximo.

En la figura 3.2.49 se muestra la correlación positiva que existe entre veleta miniatura y torcómetro. El análisis se realiza a través del ajuste por mínimos cuadrados; resultando el modelo lineal de la forma:

$$V_{min} = 0.79 * Torcómetro + 0.98 \tag{3.2.4}$$

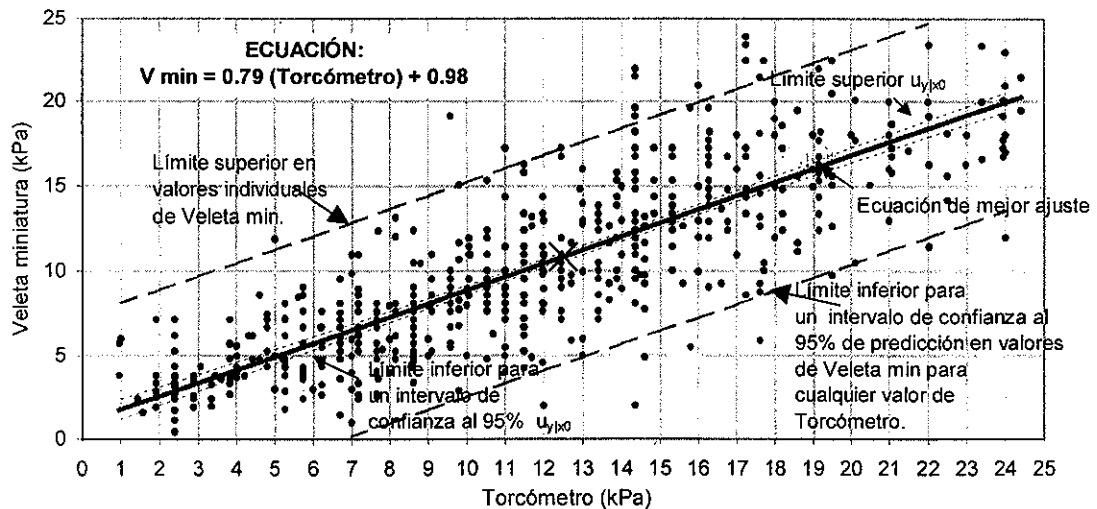


Figura 3.2.49. Tendencia general de la resistencia al corte de los 89 sondeos del estrato superficial, menores a 25 kPa en torcómetro.

• **Estratos profundos**

Para este caso, se efectuó un análisis similar al realizado en el estrato superficial, figura 3.2.50, del cual se observa que existe una correlación positiva. Los intervalos en los que se encuentra la gráfica varían entre 9.76 y 227.4 kPa, para el torcómetro, y en la veleta de 11.23 kPa hasta 266 kPa. Se observa que los valores del torcómetro son menores que los de la veleta miniatura en un 24%. El ajuste del modelo de lineal se realizó con el método de los mínimos cuadrados, obteniéndose:

$$V_{min} = 0.905 * Torcómetro + 37.728 \quad (3.2.5)$$

b) Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación entre los valores de resistencia al corte en el estrato superficial es de 0.89, y de 0.95 en los estratos profundos. Los parámetros obtenidos por estadística inferencial para las dos poblaciones se muestran en las siguientes tablas. Comparando ambas tablas se observa que la mejor correlación entre torcómetro y veleta se presenta para los valores de los estratos profundos

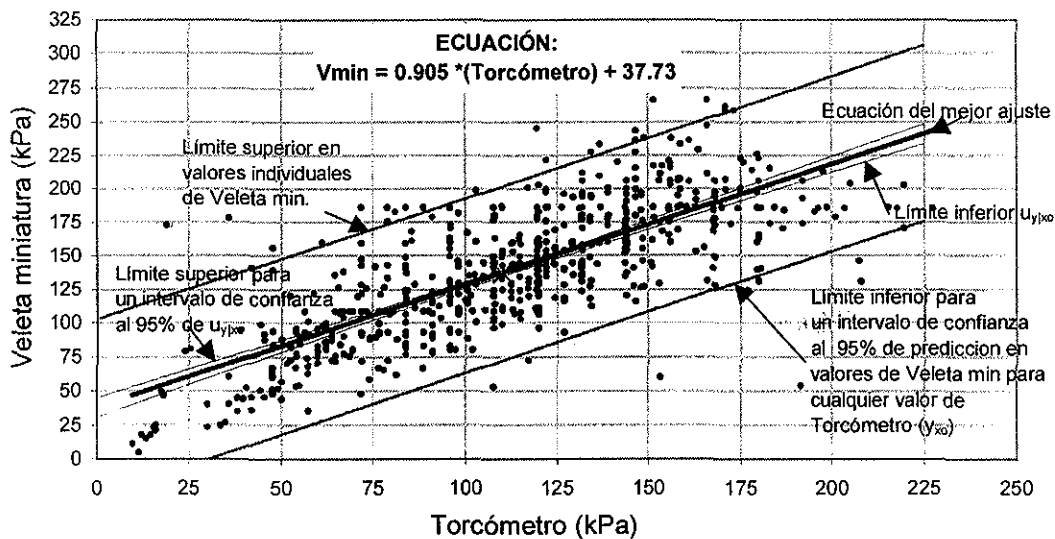


Figura 3.2.50. Tendencia general de la resistencia al corte de los estratos profundos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 3.2.3. Estadística inferencial para las magnitudes de la resistencia al corte en kPa del "estrato blando"

Resumen de parámetros estadísticos	
Coefficiente de correlación	0.89
Varianza	10.49
Error de la varianza	0.00055
Desviación estándar	3.24
Centroide de la población	(12.5,10.8)
Intervalo de confianza al 95% para estimaciones de valores individuales de veleta miniatura ($V_{min_{T_0}}$)	+/-12.71
Intervalo de confianza, al 95% para la media	$0.5 > u_{V_{min_{T_0}}} < 1.2$

Tabla 3.2.4. Estadística inferencial para las magnitudes de la resistencia al corte en kPa de los "estratos profundos"

Resumen de parámetros estadísticos	
Coefficiente de correlación	0.95
Varianza	1090.39
Error de la varianza	0.0009
Desviación estándar	33.2
Centróide de la población	(110,137.26)
Intervalo de confianza al 95% para estimaciones de valores individuales de veleta miniatura ($V_{min_{T_0}}$)	±129.54
Intervalo de confianza, al 95% para la media	$2.52 > u_{V_{min_{T_0}}} < 7.34$

c) Regresión

Para poder usar los modelos lineales obtenidos, se requiere determinar si la ecuación obtenida es útil para predecir adecuadamente los valores de la variable dependiente, (en este caso, los valores de resistencia obtenidos con la veleta miniatura).

Para realizar las estimaciones puntuales de la veleta miniatura, a partir de un valor conocido de la prueba de torcómetro, es deseable evaluar el error, es decir, establecer los límites de confianza, entre los que se encuentre la pendiente del modelo lineal con alta probabilidad (Auvinet, 1976)

Los valores obtenidos para el *estrato superficial* (figura 3.2.49) designando un nivel de confianza al 95% son:

$$0.79 \pm 0.046, \quad \text{esto es: de } \mathbf{0.745} \text{ a } \mathbf{0.837}$$

Los valores obtenidos para los *estratos profundos* (figura 3.2.50) designando un nivel de confianza al 95% son:

$$0.905 \pm 0.031, \quad \text{esto es: de } \mathbf{0.844} \text{ a } \mathbf{0.964}$$

Una vez establecido que el modelo lineal encontrado es adecuado para el cálculo de un parámetro a partir de otro, es necesario evaluarlo para hacer predicciones, es decir, calcular estimaciones para un valor cualquiera de la veleta miniatura, con un intervalo de confianza al 95% a partir de un valor dado del torcómetro; los valores se resumen en las tablas 3.2.5 y 3.2.6.

En la tabla 3.2.5, se observa que el intervalo de confianza para cualquier valor de veleta miniatura en el estrato blando varía de ± 12.7 kPa, en este análisis se sugiere tomar valores del torcómetro mayores a 7 kPa para determinar un resultado positivo en las estimaciones que se requieran para obtener un valor cualquiera de veleta miniatura.

En la tabla 3.2.6, el intervalo de confianza al 95% es mayor a 130 kPa, y para evitar estimaciones negativas se recomienda estimar valores de torcómetro desde 31 kPa.

Las correlaciones aquí presentadas (ecs. 3.2.4 y 3.2.5) para la resistencia al corte son la etapa previa para utilizar la técnica de estimación *cokriging*, en cada porción del sondeo, debido a que los datos de veleta y torcómetro en los perfiles estratigráficos están muy espaciados (@ 3 m), por lo cual un análisis de estimación representa una segunda etapa.

3.3. Comparación de las técnicas de estimación

El objetivo de la geostatística convencional es estimar valores desconocidos de una variable aleatoria en ciertos puntos del medio a partir de datos conocidos, apoyándose en las teorías de la probabilidad y las aplicaciones estadísticas. En la actualidad, la técnica de estimación más utilizada es el *kriging*, desde las más simples como: el *kriging simple* (SK), el *kriging ordinario* (OK), el *kriging global*; o variantes más complejas como el *cokriging* y el *kriging disyuntivo*, por mencionar algunos. La mayoría de los métodos y programas desarrollados actualmente (*por ejemplo, ISATIS, GSLIB*) se basan en el *kriging ordinario* (estimador lineal insesgado de mínima varianza con media constante desconocida).

En el capítulo dos, se presentaron ampliamente las bases teóricas utilizadas para la aplicación al caso de los suelos marinos. Las técnicas geoestadísticas que se utilizan en la modelación de los cortes estimados para el campo aleatorio del contenido de agua no son las convencionales (*kriging ordinario*) sino la teoría de la estimación lineal multivariable, también llamada *kriging simple* (Auvinet, 1998).

Tabla 3.2.5 Análisis del intervalo de máximo error para valores de veleta miniatura en el estrato bl

VALORES DE TORCOMETRO kPa	ESTIMACION DE VELETAMIN. kPa	ERROR DESV_EST	x-xmedia	(x-xmedia) ²	Y MIN	Y MAX	INTERV. DE MAX. ERROR	
							Y	Y
							MIN	MAX
1	1.769	6.34746	-11.5	132.25	1.2	2.4	-4.61	8.14
2	2.560	6.34746	-10.5	110.25	2.0	3.1	-3.81	8.93
3	3.351	6.34746	-9.5	90.25	2.8	3.9	-3.02	9.72
4	4.142	6.34746	-8.5	72.25	3.7	4.6	-2.22	10.51
5	4.933	6.34746	-7.5	56.25	4.5	5.4	-1.43	11.29
6	5.724	6.34746	-6.5	42.25	5.3	6.1	-0.64	12.08
7	6.515	6.34746	-5.5	30.25	6.2	6.9	0.16	12.87
8	7.306	6.34746	-4.5	20.25	7.0	7.6	0.95	13.66
9	8.097	6.34746	-3.5	12.25	7.8	8.4	1.74	14.45
10	8.888	6.34746	-2.5	6.25	8.6	9.2	2.53	15.24
11	9.679	6.34746	-1.5	2.25	9.4	9.9	3.33	16.03
12	10.470	6.34746	-0.5	0.25	10.2	10.7	4.12	16.82
13	11.261	6.34746	0.5	0.25	11.0	11.5	4.91	17.61
14	12.052	6.34746	1.5	2.25	11.8	12.3	5.70	18.40
15	12.843	6.34746	2.5	6.25	12.6	13.1	6.49	19.20
16	13.634	6.34746	3.5	12.25	13.3	13.9	7.28	19.99
17	14.425	6.34746	4.5	20.25	14.1	14.8	8.07	20.78
18	15.216	6.34746	5.5	30.25	14.9	15.6	8.86	21.57
19	16.007	6.34746	6.5	42.25	15.6	16.4	9.65	22.37
20	16.798	6.34746	7.5	56.25	16.4	17.2	10.44	23.16
21	17.589	6.34746	8.5	72.25	17.1	18.1	11.22	23.95
22	18.380	6.34746	9.5	90.25	17.9	18.9	12.01	24.75
23	19.171	6.34746	10.5	110.25	18.6	19.7	12.80	25.54
24	19.962	6.34746	11.5	132.25	19.4	20.5	13.59	26.34

Tabla 3.2.6 Análisis del intervalo de máximo error para valores de veleta min. para los estratos prc

VALORES DE TORCOMETRO kPa	ESTIMACION DE VELETAMIN. kPa	ERROR DESV_EST	x-xmedia	(x-xmedia) ²	Y MIN	Y MAX	INTERV. DE MAX. ERROR	
							Y	Y
							MIN	MAX
1	38.60	64.72	-109	11881	7.0	31.60	-26.50	103.70
10	46.74	64.72	-100	10000	6.5	40.24	-18.31	111.79
20	55.78	64.72	-90	8100	6.0	49.82	-9.21	120.77
30	64.82	64.72	-80	6400	5.4	59.40	-0.13	129.77
40	73.86	64.72	-70	4900	4.9	68.96	8.95	138.77
50	82.90	64.72	-60	3600	4.4	78.51	18.03	147.77
60	91.94	64.72	-50	2500	3.9	88.02	27.10	156.78
70	100.98	64.72	-40	1600	3.5	97.50	36.17	165.79
80	110.02	64.72	-30	900	3.1	106.92	45.22	174.82
90	119.06	64.72	-20	400	2.8	116.27	54.28	183.84
100	128.10	64.72	-10	100	2.6	125.51	63.33	192.87
110	137.14	64.72	0	0	2.5	134.62	72.37	201.91
120	146.18	64.72	10	100	2.6	143.59	81.41	210.95
130	155.22	64.72	20	400	2.8	152.43	90.44	220.00
140	164.26	64.72	30	900	3.1	161.16	99.46	229.06
150	173.30	64.72	40	1600	3.5	169.82	108.49	238.11
160	182.34	64.72	50	2500	3.9	178.42	117.50	247.18
170	191.38	64.72	60	3600	4.4	186.99	126.51	256.25
180	200.42	64.72	70	4900	4.9	195.52	135.51	265.33
190	209.46	64.72	80	6400	5.4	204.04	144.51	274.41
200	218.50	64.72	90	8100	6.0	212.54	153.51	283.49
210	227.54	64.72	100	10000	6.5	221.04	162.49	292.59
220	236.58	64.72	110	12100	7.1	229.52	171.47	301.69
225	241.10	64.72	115	13225	7.3	233.76	175.96	306.24

La similitud de las dos técnicas es que usan estimadores insesgados de mínima varianza; además los dos se auxilian de la covarianza y el variograma, respectivamente, para construir el modelo que se utiliza para el análisis de la estimación.

La diferencia del SK con el OK, consiste en que este último no requiere el conocimiento de la media del campo aleatorio, sin embargo, esto no representa una ventaja real ya que en geotecnia es generalmente más difícil estimar correctamente la función de autocovarianza que la tendencia central del campo.

3.3.1 Resultados comparados

Como una forma simplista de evaluar los resultados de las técnicas de estimación SK y OK, en términos de los espesores del estrato blando se elaboraron las tablas 3.3.1 a 3.3.8 , cada una correspondiendo a un corte estimado (A al H).

La comparación es posible debido a que se trazan los cortes estimados del contenido de agua (figura 3.3.1) en la estimación de la variabilidad del espesor del estrato blando, presentándose una interpretación general como se describe a continuación.

a) Corte estimado A

En la tabla 3.3.1 se puede comparar numéricamente el espesor del estrato blando con el intervalo de contenido de agua mayor a 50% en el corte estimado A. Los sondeos virtuales estimados que pueden ser comparados son del A4 al A11 debido a que estos sondeos están dentro de área de la estimación de la variabilidad del espesor del estrato blando (figura 3.3.1). Se observa que los espesores analizados con la técnica OK, son, en la mayoría de los casos mayores que el espesor del intervalo del contenido de agua (SK), pero en general la diferencia en cada sondeo virtual es de un metro. Existe buena aproximación de las dos técnicas para este corte. El promedio de las diferencias es de un metro.

b) Corte estimado B

La comparación de este corte se realiza con los 13 sondeos virtuales incluidos en el corte estimado B como se muestra en la figura 3.3.1. La tabla 3.3.2 muestra los valores correspondientes del espesor con cada sondeo virtual. La diferencia media de espesores es de 1.80 m. Se observa que los espesores analizados con la técnica OK, son, en la mayoría de los casos mayores que el espesor del intervalo del contenido de agua (SK). Las mayores diferencias se observan en la sección virtual de B8 a B10. En la figura 3.3.1 la diferencia se debe a una zona cercana a un graben formado por los sondeos CHAC y en la figura 3.2.27 esta formada por la anomalía representada por el círculo punteado. Esta diferencia puede deberse a que en la técnica OK, no se toma en cuenta la presencia de estratos subyacentes que influyan en la estimación como en la técnica SK del contenido de agua.

CAPÍTULO III
APLICACIÓN AL SUBSUELO MARINO

Tabla 3.3.1 Comparación de espesores en el corte estimado A

Corte A	Variabilidad del estrato blando	W% mayor de 50%	Diferencia
Sondeo Virtual	Esesor	Esesor	Esesor
Estimado	(m)	(m)	(m)
A4	16	17	1
A5	17	17.6	0.6
A6	17	15.6	1.4
A7	17	15.6	1.4
A8	16	15	1
A9	16	15	1
A10	17	15.6	1.4
A11	17	16	1
PROMEDIO	16.88	15.925	1.1

Tabla 3.3.2 Comparación de espesores en el corte estimado B

Corte B	Variabilidad del estrato blando	W% mayor de 60%	Diferencia
Sondeo Virtual	Esesor	Esesor	Esesor
Estimado	(m)	(m)	(m)
B1	16	14	2
B2	16	15.6	0.6
B3	15	15	0
B4	15	15	0
B5	15	12.6	2.4
B6	15	12.6	2.4
B7	14	12.6	1.4
B8	15	10	5
B9	14	10.6	3.4
B10	14	10.6	3.4
B11	12	11.6	0.4
B12	14	12	2
B13	14	13.6	0.4
PROMEDIO	14.46	12.75	1.80

Tabla 3.3.3 Comparación de espesores en el corte estimado C

Corte C	Variabilidad del estrato blando	W% mayor de 60%	Diferencia
Sondeo Virtual	Esesor	Esesor	Esesor
Estimado	(m)	(m)	(m)
C1	17	16.5	0.5
C2	15	15.6	0.6
C3	14	13	1
C4	13	13	0
C5	13	13.6	0.6
C6	12	7.6	4.4
C7	11	7.6	3.4
C8	11	7	4
C9	12	7.6	4.4
C10	13	13	0
C11	13	14	1
C12	14	14	0
C13	14	14	0
PROMEDIO	13.23	12.04	1.53

Tabla 3.3.4 Comparación de espesores en el corte estimado D

Corte D	Variabilidad del estrato blando	W% mayor de 60%	Diferencia
Sondeo Virtual	Esesor	Esesor	Esesor
Estimado	(m)	(m)	(m)
D1	17	15.6	1.4
D2	16	15.6	2.4
D3	17	13.6	3.4
D4	14	10.6	3.4
D5	11	10	1
D6	10	9.6	0.4
D7	9	10.6	1.6
D8	9	11.6	2.6
D9	12	14	2
D10	15	14.6	0.4
D11	15	15	0
D12	15	15	0
D13	15	15	0
PROMEDIO	13.62	13.14	1.43

Tabla 3.3.5 Comparación de espesores en el corte estimado E

Corte E	Variabilidad del estrato blando	W% mayor de 50%	Diferencia
Sondeo Virtual	Esesor	Esesor	Esesor
Estimado	(m)	(m)	(m)
E1	15	15	0
E2	14	15	1
E3	14	14	0
E4	14	10	4
E5	12	9	3
E6	12	9	3
E7	11	9	2
E8	12	10	2
E9	13	11.6	1.4
E10	13	12.6	0.4
E11	13	13.6	0.6
E12	14	14	0
E13	14	14.6	0.6
PROMEDIO	13.16	12.11	1.38

Tabla 3.3.6 Comparación de espesores en el corte estimado F

Corte F	Variabilidad del estrato blando	W% mayor de 60%	Diferencia
Sondeo Virtual	Esesor	Esesor	Esesor
Estimado	(m)	(m)	(m)
F1	15	12.6	2.4
F2	14	12	2
F3	13	11.6	1.4
F4	13	11	2
F5	12	9	3
F6	11	9	2
F7	10	9	1
F8	10	8.6	1.4
F9	10	8.5	1.5
F10	11	10	1
F11	11	9	2
F12	11	9	2
F13	11	9	2
PROMEDIO	11.68	9.87	1.82

Tabla 3.3.7 Comparación de espesores en el corte estimado G

Corte G	Variabilidad del estrato blando	W% mayor de 50%	Diferencia
Sondeo Virtual	Esesor	Esesor	Esesor
Estimado	(m)	(m)	(m)
G1	19	15	4
G2	18	15	3
G3	16	14.6	1.4
G4	14	9.6	4.4
G5	12	10.6	1.4
G6	11	10.6	0.4
G7	10	9.6	0.4
G8	9	9.6	0.6
G9	10	10	0
G10	11	9.6	1.4

Tabla 3.3.8 Comparación de espesores en el corte estimado H

Corte H	Variabilidad del estrato blando	W% mayor de 60%	Diferencia
Sondeo Virtual	Esesor	Esesor	Esesor
Estimado	(m)	(m)	(m)
H1	13	12	1
H2	11	9.6	1.4
H3	10	9.6	0.4
H4	10	9	1
H5	9	8	1
H6	9	7	2
H7	9	9	0
H8	9	8	1
H9	10	8	2
H10	10	8.6	1.4

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

c) Corte estimado C

En la tabla 3.3.3 se observan las diferencias de espesor correspondientes al corte estimado C. Se observa que los espesores analizados con la técnica OK, son, en la mayoría de los casos mayores que el espesor del intervalo del contenido de agua (SK). En general, los espesores comparados son muy semejantes con una diferencia media de 1.5 m. Sin embargo en el corte estimado (sección C6 al C9) se presentan diferencias de cuatro metros de espesor, en una zona de abultamiento.

d) Corte estimado D

En la tabla 3.3.4 se observa que los espesores analizados con la técnica OK, también son, en la mayoría de los casos mayores que el espesor del intervalo del contenido de agua (SK). Sin embargo la zona de mayor diferencia es en el corte estimado correspondiente a la sección D2 a D4. Aunque el espesor con la técnica OK es similar gráficamente, existe una diferencia de espesor (entre 1.5 y 3 m menor) en la técnica SK. Esta es la zona correspondiente al NW del área de estudio y se distingue por diversas fallas relativamente cercanas y grabens escalonados. (figura 3.1.8).

e) Corte estimado E

En la tabla 3.3.5 se observa que los espesores analizados con la técnica OK, son, en la mayoría de los casos mayores que el espesor del intervalo del contenido de agua (SK). por una diferencia media de poco más de un metro, pero el espesor aumenta a casi tres metros en la sección virtual E4 a E8 del corte (zona del graben central de la zonificación I, figura 3.1.8).

f) Corte estimado F

En la tabla 3.3.6 se observa que los espesores analizados con la técnica OK, son, en la mayoría de los casos mayores que el espesor del intervalo del contenido de agua (SK), por una diferencia media de casi dos metros y únicamente en el sondeo virtual F5 hay una diferencia de espesor de 3 m entre las técnicas de estimación aplicadas. Esta diferencia se presenta en los límites de la zona I con la IV. (figura 3.1.8).

g) Corte estimado G

En la tabla 3.3.7 se observa que los espesores analizados con la técnica OK, son, en la mayoría de los casos mayores que el espesor del intervalo del contenido de agua (SK). Además, en el corte estimado (sección virtual G1 a G4) existe una diferencia media de casi 1.5 m, por lo que la similitud de la base del espesor de estrato blando es buena. Las mayores diferencias (3 y 4 m) se presentan en la dirección SW del corte G. En esta zona no hay sondeos reales cercanos.

h) Corte estimado H

En la tabla 3.3.8, se observa que los espesores analizados con la técnica OK, son, en la mayoría de los casos mayores que el espesor del intervalo del contenido de agua (SK). Pero las mayores diferencias se observan en la dirección NE del corte que corresponde a la sección virtual H12 al H13. En esta zona no hay sondeos reales cercanos. En general, la diferencia media de espesores es de casi 1.5 m, por lo que la similitud de la base del espesor de estrato blando en este corte es buena.

En resumen, la técnica de estimación OK conduce a mayores espesores estimados que la SK, y en general se sigue la misma variabilidad a lo largo del corte. Por otra parte, las diferencias mayores se localizan en zonas donde no hay sondeos relativamente cercanos, específicamente porque se tiene una variabilidad horizontal del espesor muy grande entre los sondeos centrales.

3.4. Implicaciones geotécnicas

En geotecnia, un problema que aún no está resuelto en forma satisfactoria es el de la selección de parámetros para diseño (Juárez, 2001). En la actualidad, para la zona de la Sonda de Campeche, el criterio de diseño y la construcción de las cimentaciones de una plataforma petrolera se realiza considerando pilotes tubulares de acero. Además en la interpretación y la aplicación de los parámetros del subsuelo obtenidos en un laboratorio instalado en el barco de exploración, es necesario considerar, las dificultades que existen en la obtención de las muestras (confiabilidad de los parámetros); debido a esto, gran parte del tiempo invertido para el estudio se dedica a la investigación y mejoramiento de los ensayos en el sitio y del muestreo (datos más confiables); por tanto, la geoestadística, aplicada en la forma que se muestra en esta tesis, es una herramienta auxiliar para disminuir gran parte de las incertidumbres asociadas a las condiciones del subsuelo, particularmente los datos de los parámetros y su selección.

3.4.1. Diseño de plataformas marinas en la Sonda de Campeche.

Las plataformas ya instaladas en la Sonda de Campeche están compuestas de estructuras reticulares de tubos de acero; constan de una subestructura que va apoyada en el lecho marino y empotrada por medio de pilotes, y una superestructura que aloja los paquetes de perforación, o los equipos de producción, según el tipo o propósito de la plataforma (PEMEX, 1985).

Los pilotes que se utilizan en las plataformas como cimentación profunda, se hincan mediante martillos de impacto que usan vapor, diesel o presión hidráulica. Así, el espesor de las paredes del pilote debe ser suficiente, no sólo para que éste resista las cargas axiales y las laterales, sino también los esfuerzos que recibe durante el hincado, hasta completar la longitud de penetración de diseño del pilote. En la actualidad, se sigue utilizando el método sugerido por el *American Petroleum Institute* API norma RP2A.

3.4.2. Análisis de los parámetros de diseño

En la selección de los parámetros de diseño para una cimentación es muy común que se adopte como representativo la medición directa más desfavorable, o bien, el promedio de los datos disponibles, sin que exista justificación clara para ello (Juárez, 2001); el caso de los estudios geotécnicos para plataformas marinas no es la excepción, puesto que un propósito importante del estudio geotécnico es proporcionar las capacidades de carga axial en compresión y tensión y de carga lateral, considerando el comportamiento del conjunto pilote-suelo, todo esto, en función de los parámetros mecánicos del subsuelo, variables con la profundidad, así como del tipo y la magnitud de las cargas actuantes.

3.4.3. Aplicación de la geoestadística al diseño de cimentaciones de plataformas marinas

Para efectuar el diseño de una cimentación requerida en una plataforma marina aplicando la geoestadística es necesario utilizar la técnica de estimación *cokriging*. Esta técnica es muy utilizada cuando se desea relacionar espacialmente dos variables; usando esta relación, se puede estimar el valor de una variable a partir de otra u otras. Este método también es útil cuando la incertidumbre con respecto a una estimación dada pueda ser reducida usando información adicional a partir de otra variable.

La técnica puntual de *cokriging* es tan general que puede usarse en función de cualquier variable aleatoria. La variable por estimar se llama variable principal, mientras que las otras variables usadas para propósitos de estimación, son llamadas co-variables. Mientras más variables sean añadidas al cálculo de la estimación, el desarrollo matemático del modelo se incrementa significativamente y con ello el tiempo de proceso computacional. Por lo tanto, se recomienda escoger principalmente las co-variables que estén relacionadas espacialmente con la variable principal y contar con alguna información externa que nos indique alguna razón física que respalde tal relación espacial, como por ejemplo, una correlación entre variables geotécnicas.

En este trabajo de investigación se conocen los resultados de la estimación de la variabilidad espacial del espesor del estrato blando, el contenido de agua y la resistencia al corte, ésta última obtenida con las pruebas de torcómetro y veleta miniatura. Estas variables son relativamente fáciles de obtener en el campo y su costo de medición es relativamente menor en comparación con otras pruebas. Para este caso, otras aplicaciones podrían consistir en relacionar el contenido de agua (variable secundaria) con la resistencia al corte (variables principal), con el fin de obtener S_{UU} en el punto X .

Para aplicar esta técnica, es necesario modelar los variogramas de la variable principal y de todas las co-variables. Además, se utilizan modelos de correlogramas cruzados entre la variable principal con cada una de las variables. Como resultado, el número total de variogramas analizados resulta de $2K+1$, siendo K igual al número total de co-variables; es

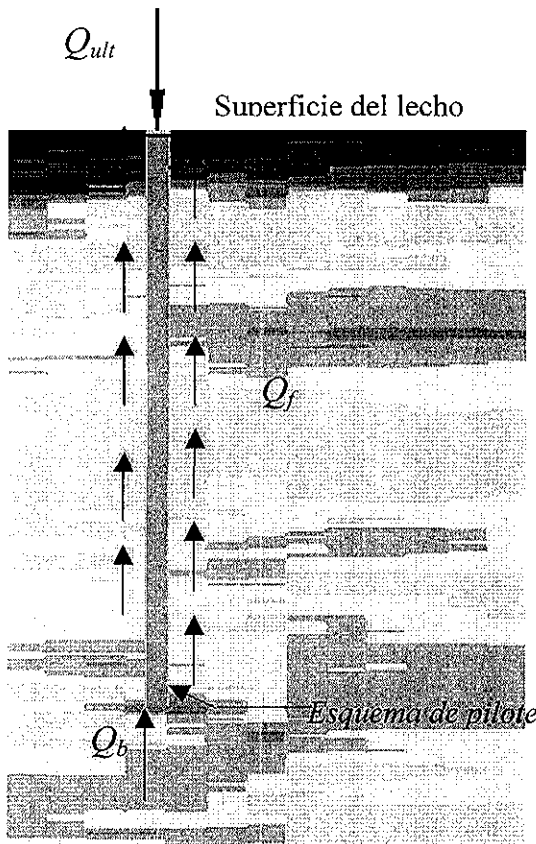
decir, se tiene dos veces el número de variables correlacionadas entre la variable principal y el variograma de la sola variable principal.

Es lógico pensar que entre más co-variables se relacionan con la variable principal, el grado de dificultad del cálculo se incrementa, por lo que este tema requiere un esfuerzo más detallado que involucra mayor tiempo. Como dato importante, la técnica de *cokriging* trabaja mejor cuando para la variable estimada se hace un muestreo en forma espaciada con relación a las co-variables. Cabe mencionar que no hay ventaja en aplicar el *cokriging* si la densidad de la variable primaria es la misma que la de la variable secundaria, o si las variables no se pueden correlacionar.

Como se observa en el esquema (figura 3.4.1) si se idealiza un pilote en un corte de contenido de agua analizado anteriormente, los parámetros de diseño de la resistencia al corte no drenada y así como la fricción pueden ser obtenidos de un análisis de *cokriging* a partir de una variable con alta densidad de datos conocidos (como el contenido de agua, por lo que será posible estimar valores puntuales a lo largo de la superficie de falla analizada).

En este caso se conoce que la varianza del valor medio de una propiedad en un dominio dado tiende a decrecer cuando crece el tamaño del dominio considerado; fenómeno conocido como *efecto de escala* (véase 2.2.3) La varianza asociada a una superficie de falla, como en el caso del análisis de los pilotes de fricción y de punta, es un caso del efecto de escala en el suelo, para lo cual, la varianza es generalmente muy inferior a la varianza de los valores puntuales (Auvinet, 1976).

Para el diseño de una cimentación de plataformas marinas basado en pilotes, se tienen que involucrar ciertas propiedades del suelo, como es el caso del peso volumétrico, el ángulo de fricción y la cohesión; en lugar de escoger estos parámetros en forma de promedio como tradicionalmente se hace, es mejor estimarlos en forma puntual a la profundidad de interés.



De la estática se conoce que:

$$Q_{ult} = Q_f + Q_b$$

$$Q_d = \frac{Q_u}{FS}$$

donde FS, es el factor de seguridad que será sustituido en un análisis geostadístico con un error de incertidumbre asociado al cálculo de la cimentación.

Figura 3.4.1 Esquema de un planteamiento geostadístico para el diseño de pilotes.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4. CONCLUSIONES

El análisis geoestadístico aplicado a la información contenida en los 89 estudios geotécnicos de interés, de acuerdo a los objetivos y alcances planteados en esta tesis, permite establecer las conclusiones siguientes:

1. Atendiendo al estudio de las exploraciones realizadas se concluye que es muy importante tomar en cuenta toda la información disponible de la región de estudio (igual que el método de exploración convencional) tales como: los aspectos geológicos, batimétricos, litológicos y de sedimentación al aplicar las técnicas geoestadísticas para tomar los mejores criterios que permitan definir zonas de correlación similares y así obtener cortes y sondeos estimados y simulados más confiables.
2. Las zonas de correlación similares tienen características propias que ofrecen información preliminar (función de autocorrelación) del área de estudio, las cuales no se analizan normalmente en el método convencional, como son, las zonas descritas en 3.2.2.d, donde se encontró que los sondeos de la zona norte del campo analizado tienen similitud en cuanto a la distribución de los estratos, por lo que es posible agruparlo en una zona con características comunes.
3. La generación de los cortes estimados permite conocer el espesor de cada estrato, así como su variabilidad geométrica en cualquier dirección a la profundidad deseada, lo cual permite plantear las implicaciones ingenieriles que determinan la toma de decisiones para el diseño de obras asentadas en el subsuelo marino.
4. En lo que respecta a la interpretación de los cortes y mapas estimados se concluye que la mayoría de los cortes coinciden con la ubicación de las fallas enterradas, las cuales están documentadas en los informes geotécnicos, por lo que se corrobora la validez de la técnica de estimación utilizada en esta tesis (véase 3.2.2 e). Asimismo, la variabilidad geométrica del espesor del estrato superficial se presenta de manera muy clara en un modelo 3D que permite detectar las zonas de mayor y menor espesor de sedimentos (al NW y SE, respectivamente), así como identificar una causa posible de este fenómeno (véase 3.2.1c).
5. El espesor del estrato blando tiende a aumentar hacia el NW según el estudio convencional (PEMEX 1985), lo cual coincide con la variabilidad encontrada del espesor del estrato superficial, con las técnicas aquí utilizadas.
6. Basándose en el análisis geoestadístico, la región se caracteriza como sigue:

- a) El *estrato superficial* presenta valores del contenido de agua entre 65% y 92%, teniendo un valor medio general de 77%, y una desviación estándar de 9%. En general, la resistencia al corte varía entre 1.5 a 45 kPa, en un espesor entre 8 y 16 m.
 - b) Asimismo los *estratos profundos* se caracterizan por tener contenidos de agua que varían entre 22 y 40% y el contenido de agua medio de todos los sondeos es de 31.7%, con una desviación estándar de 8 %. Los estratos profundos tienen una resistencia al corte que aumenta linealmente con la profundidad entre 31 y 241 kPa. En los coeficientes de correlación encontrados, se presenta una repetición de la secuencia estratigráfica con una periodicidad de 30 m al N de la zona de estudio, mientras que al NE disminuye hasta 20 m.
 - c) La caracterización encontrada permite, entre otras cosas, identificar estratos de acuerdo a su contenido de agua y realizar un análisis de estabilidad de la plataforma al momento de ser colocada en el sitio.
7. Tanto en el caso de los mapas como en el de los cortes estimados, es posible planear una campaña de exploración geotécnica que permita disminuir el error asociado a la estimación, proponiendo la ejecución de sondeos adicionales donde la desviación estándar sea muy alta, como es el caso en los extremos del área de estudio (al NE y SW) y se obtenga más información de esas zonas.
 8. La interpretación de la exploración del sitio también demuestra que las fallas no se presentan en la superficie, por lo que se corrobora que el fallamiento a profundidad no alcanza a afectar los sedimentos blandos superficiales, (véase 3.1.2 c); sin embargo, claramente se aprecian desfases entre los “estratos profundos” en algunos cortes estimados, que inclusive llegan hasta el estrato que subyace al “estrato superficial”.
 9. Se sugiere que cuando exista una gran diferencia entre el primer estrato y los estratos profundos, como resulta en este estudio, se puede emplear únicamente la técnica de kriging simple (SK) para interpretar la variabilidad de un estrato en particular. La ventaja del SK es que toma en cuenta la media del campo y su principal limitación es que debe existir un gran número de sondeos cercanos entre sí para aplicar el método.
 10. La geostatística es una buena herramienta para realizar zonificaciones en sitios con amplia información geotécnica, como es el caso de la Sonda de Campeche. Sin embargo, el análisis geoestadístico debe considerarse como una herramienta auxiliar necesaria y complementaria del método tradicional del reconocimiento del sitio.
 11. Con el análisis geoestadístico aplicado a la interpretación de la estratigrafía se puede cuantificar la incertidumbre asociada a la estimación y se aprovecha la información reciente integrándola de manera rápida y eficiente para una nueva evaluación del

sitio de interés, lo cual sirve como retroalimentación para reducir las incertidumbres, se aprovecha toda la información, se reduce el costo de la exploración de las plataformas marinas.

12. Como una futura investigación, en lo referente al análisis de correlación, se sugiere realizar una estimación con un modelo de tipo expo-cosenoidal, el cual refleja mejor las características del subsuelo en el que se alternan estratos similares (por ejemplo, una secuencia de arcilla, seguida de una secuencia de arena, y así sucesivamente), así como adecuar la matriz de rotación que tome en cuenta la pendiente natural del terreno cuando se presente este caso.
13. Esta es una investigación preliminar que sirve de base para evaluar riesgos potenciales de escape de gas biogénico en suelos de baja capacidad de carga y de poco espesor, como es el estrato blando superficial. Localizando las zonas de anomalías que indican la presencia del gas se evalúa la profundidad del estrato superficial y el empuje que puede provocar el gas contra éste, detectando posibles fisuras en el estrato blando que permitan liberar el gas hacia la superficie.
14. Por último, este trabajo sienta las bases de una caracterización geotécnica para el diseño de cualquier infraestructura petrolera en mar adentro.

REFERENCIAS

1. Auvinet, G., 1975, "*Probabilidad y estadística*", Apuntes para estudiantes del curso, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, Biblioteca DEPMI, México
2. Auvinet, G., 1984, "*Variabilidad de los depósitos de carbón. Un enfoque estocástico*", estudio realizado para Minera Carbonífera de Río Escondido, Coahuila, México.
3. Auvinet, G., 1994, "*Modélisation stochastique de la répartition spatiale des propriétés des sols et des ouvrages en terre*" Actes des Journées Nationales sur les "*Applications des Statistiques et Probabilités en Analyse des Matériaux et des Ouvrages*" pp. 159-171, Cachan, Mar. 30-31, France.
4. Auvinet, G., 1999, "*Confiabilidad y análisis de riesgo en geotecnia*", Apuntes para estudiantes del curso, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
5. *ASTM D-2216, 1992, "Moisture content test", The American Society for Testing and Materials, PA, USA.*
6. *ASTM D-854, 1992, "Specific gravity", The American Society for Testing and Materials, PA, USA.*
7. Benjamin, J.R. & Cornell, C.A., 1970, "*Probability, statistics and decision for civil engineers*", McGraw-Hill, USA
8. Canavos, G., 1988, "*Probabilidad y estadística, aplicaciones y métodos*", McGraw-Hill, México.
9. Dávalos, D. Medina, Z & Auvinet. G., 2001 "Sistema de apoyo al análisis geoestadístico" Manual del usuario, Instituto de Ingeniería. México.
10. Deutsch, C.V. & Journel, A.G., 1992 "GSLIB, geostatistical software library and user's guide", Oxford University Press, New York, USA.
11. DV-FG, 1997, "*Estudio geotécnico*". Reportes geotécnicos internos Instituto Mexicano del Petróleo elaborado por Fugro-LCT - C & C Technologies, Inc.
12. Fenton, G.A., 1996, "*Probabilistic methods in Geotechnical Engineering*", Workshop presented at ASCE Uncertainty '96, Madison, Wisconsin, USA.

13. Fogli, 1980, "*L'approche de Monte Carlo dans les problèmes de sécurité*" Thèse de Docteur- Ingénieur, INSA de Lyon, France
14. Juárez, M., 2001, "*Aplicación de la geoestadística a la descripción del subsuelo del Valle de México*", Tesis de Maestría, ESIA-IPN, México.
15. Juárez, M. & Auvinet, G., 2000, "*Caracterización geoestadística del subsuelo del Valle de México*", *XX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Sociedad de Mecánica de Suelos, A.C. Oaxaca, Volumen 2, pp. 387-396
16. Journel, A. & Huijbrets, C.J., 1978, "*Mining Geostatistics*". Academic Press, New York, NY.
17. Krige, D.G., 1962, "*Statistical application in mine valuation*", Journal Institute Mine Survey, South Africa.
18. Li, K. & Lump, P., 1987, "*Probabilistic design of slopes*", Canadian Geotechnical Journal, No.24. pp. 520-535, Canada.
19. Matheron, G., 1965, "*Les variables généralisées et leur estimation*", Masson et Cie, France.
20. Mood, A., & Graybill, G., 1963 "*Introduction to the theory of statistics*", McGraw-Hill, USA.
21. Papoulis, A., 1984 "*Probability, random variables and stochastic processes*", McGraw-Hill, USA.
22. PEMEX, 1985, "*Geotecnia Marina en la Sonda de Campeche*", Subdirección de proyecto y construcción de obras. México.
23. PM-MC, 1978, "*Estudio geotécnico*". Reporte geotécnicos internos del Instituto Mexicano del Petróleo elaborado por McClelland Inc.
24. Shinozuka, M., & Zhang, R., 1996, "*Equivalence between kriging and conditional probability methods for conditional simulation*", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 122, No 6, june, ASCE, pp. 530-538, USA.
25. Soulié, M., Favre, M., Konrad, J.M., 1983, "*Analyse géostatistique d'un noyau de barrage tel que construit*", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, pp 453-467, Canada.
26. Vanmarcke, E., 1983, "*Random fields: Analysis and Synthesis*", MIT Press, Cambridge Ma, USA.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bowles, J.E., 1984, "*Physical and geotechnical properties of soils*", McGraw-Hill, USA.
2. Cano, R. 1986, "*Propuesta de zonificación estratigráfica para la Sonda de Campeche*", 40 años de investigación y práctica geotécnica. Exploración Marina. Tomo 1, pp 339-350
3. INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS, 1992, "*Inadequate site investigation*", Thomas Telford, London.
4. Johnson, R., 1996, "*Elementary statistics*", Duxbury Press, USA
5. Journel, A. & C.J. Huijbrets, 1978, "*Mining geostatistics*". Academic Press, New York, NY, 1978
6. Patel, M. 1989, "*Dynamic of offshore structures*" Butterworths & Co. Great Britain.
7. Poulos, H.G., 1988, "*Marine geotechnics*", Unwin Hyman, London.
8. Rethati, L., 1985, "*Probabilistic solutions in geotechnics*", Developments in geotechnical engineering, Vol 46, Elsevier, New York, USA.
9. Tamez, G. E., 2001, "*Ingeniería de Cimentaciones*" tge geotecnia, México, DF.
10. Torres, P.E., 1980, "*Exploración Geofísica del Fondo Marino*". Simposio Internacional de Mecánica de Suelos Marinos. Volumen 1, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, pp. 35-48, México DF.
11. Vanmarcke, E.H., 1977, "*Probabilistic modeling of soil profile*", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No.11, pp. 1227-1246.
12. Villanueva, S., 1986, "*Geología de la Sonda de Campeche*" La Geotecnia en las costas y el mar, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México.
13. Wu, T., Potter, J. & Kjeksted, O., 1986, "*Probabilistic analysis of offshore site exploration*", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No.11, pp. 981-1000.
14. Wu, T., Tang, W. Sangrey, D., & Baecher, G., 1987, "*Reliability of offshore foundation- State of Art-*", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 115, No.2, pp. 157-176, ASCE.