

**APLICACIÓN DE MÉTODOS GEOESTADÍSTICOS PARA LA GENERACIÓN  
TRIDIMENSIONAL DE CAPAS ACUÍFERAS.  
APLICACIÓN AL ACUÍFERO DE LA PLANICIE ALUVIAL DEL RÍO MOTATÁN.**

**Por:  
Oswaldo José Peña Villegas**

**Trabajo de grado para optar al grado de Magister Scientiae en  
“Recursos Hidráulicos”**

**Asesor Principal**

Bdigital.ula.ve

---

**Dr. Hervé J. Jégat**

---

**MSc. Luis E. Mora**

**CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO E INVESTIGACIÓN AMBIENTAL  
Y TERRITORIAL  
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
Mérida, Venezuela  
2003**

C.C.Reconocimiento

## **AGRADECIMIENTO**

Al CIDIAT por haberme permitido realizar estudio de postgrado en el área de los recursos hidráulicos.

Al SISTEMA HIDRÁULICO TRUJILLANO por facilitarme la información básica de campo.

A mis asesores, Hervé Jégat y Luis Mora, quienes me han orientado para la realización de este trabajo.

Bdigital.ula.ve

## ÍNDICE

	Página
AGRADECIMIENTO.....	V
LISTA DE TABLAS.....	IX
LISTA DE FIGURAS .....	X
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XII
RESUMEN .....	XV
Capítulos	
1. INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivos .....	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Geoestadística .....	3
2.1.1. Conceptos básicos de Geoestadística.....	3
Variable regionalizada .....	3
Objeto de la teoría de las variables regionalizadas .....	4
2.1.2. Momentos considerados en Geoestadística Lineal .....	5
Momentos de primer orden o esperanza matemática .....	5
Momentos de segundo orden.....	5
2.1.3. Inferencia estadística y funciones estacionarias .....	6
Hipótesis de estacionariedad.....	6
Hipótesis intrínseca .....	7
2.2. Análisis estructural. Medida de variabilidad espacial.....	7
2.2.1. Medida de variabilidad espacial .....	7
Variograma .....	7
Comportamiento del Variograma .....	8

APÉNDICE A. Conceptos estadísticos básicos .....	133
--	-----

Bdigital.ula.ve

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁG
2.1. Relación existente entre el Variograma y la Covarianza .....	8
2.2. Comportamiento Parabólico en el origen de un Variograma Muestral .....	9
2.3. Comportamiento Lineal del Variograma .....	9
2.4. Comportamiento del Variograma con efecto Pepita .....	10
2.5. Comportamiento del Variograma con efecto de Pepita Puro .....	10
2.6. Parámetro del Variograma.....	12
2.7. Tipos de Variogramas Teóricos.....	18
3.1. Ubicación geográfica de la zona en estudio.....	35
3.2. Perfiles de pozos construidos con el programa GWW.....	39
3.3. Área definitiva seleccionada del acuífero con la mayor información se muestra a curvas de nivel en el recuadro .....	40
3.4. Estructura adoptada de diez capas para el Acuífero en estudio.....	41
3.5a. Distribución de probabilidades de los datos de espesores correspondientes a la primera capa.....	44
3.5b. Distribución de Probabilidades de los datos de espesores afectados por Logaritmo correspondientes a la primera capa.....	44
3.6. Variograma Experimental del Logaritmo de los Espesores de la capa uno ajustado a un Modelo Esférico .....	46
3.7. Malla elaborada con 65 columnas y 61 filas para el área en estudio .....	47
4.1. Variograma Experimental de Cotas de Terreno ajustado a un Modelo Teórico Lineal.....	53

4.2.	Variograma Experimental de Espesor de la Capa uno ajustado un Modelo Teórico Esférico .....	54
4.3.	Distribución de Probabilidades de los Datos, Capa Cuatro.....	59
4.4.	Distribución de Probabilidades de los Datos, Capa Nueve .....	59
4.5.	Cortes con líneas rectas a los planos de equipotenciales simulados.....	61
4.6.	Cortes con líneas rectas a los planos de equipotenciales observados .....	61
4.7.	Corte con líneas rectas de corte 1, perpendicular a las líneas equipotenciales .....	62
4.8.	Cortes con líneas de corte 2, inclinada a un poco al Norte .....	62
4.9.	Cortes con líneas de corte 3, inclinada un poco más al Norte.....	63
4.10.	Cortes con líneas rectas a los planos de equipotenciales simulados.....	65
4.11	Cortes con líneas rectas a los planos de equipotenciales observados.....	66
4.12	Corte con línea de corte 1, perpendicular a las líneas equipotenciales .....	67
4.13.	Corte con línea de corte 2, inclinada un poco al norte .....	67
4.14.	Corte con línea de corte 3, inclinada más al norte.....	67
4.15	Equipotenciales promedios por capas entre el acuífero uno y dos.....	68

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Alcance del Variograma
$C(x_i, x_j)$	Covarianza de dos variables aleatorias $Z(x_i)$ , $Z(x_j)$
$E[Z(x)]$	Esperanza Matemática, momento de primer orden ó media.
$\sigma^2$	Varianza o Momento de Segundo Orden.
$\gamma(h)$	Variograma o Semivariograma
$\lambda$	Distancia integral del Variograma
$\theta$	Parámetro en el intervalo (0.2)
$\infty$	Infinito o no definido
$\lambda_i$	Coficiente de Lagrange
$\mu$	Parámetro de Lagrange
$\bar{X}$	Media Aritmética
$d$	día
$h$	Distancia
$K$	Pendiente en el origen del Variograma
$Km^2$	Kilómetros Cuadrados
$Ln$	Logaritmo Natural
$m$	Metros
$m.s.n.m.$	Metros sobre el nivel del mar.
$m^3$	Metros cúbicos

n	Porosidad
N(h)	Número de pares de puntos separados por una distancia ha.
Np	Nivel Pielométrico
°C	Grado Centígrados
S	Meseta del Variograma
s	Segundos
Sen(h)	Seno de la distancia h
T	T de Student
UTM	Sistema Técnico Mercator utilizado por Cartografía Nacional de Venezuela
Var(z)	Varianza de la variable aleatoria
X	Ubicación del Área Investigada ó Punto de Observación
Z	Capa de Terreno
Z(x)	Variable Aleatoria
Z*	Dato Estimado
Zi	Dato Medido
Z <sub>s</sub>	Variable Simulada

## RESUMEN

Cada día se hace de mayor utilidad la aplicación de los métodos geoestadísticos para el análisis de parámetros que definen el comportamiento del acuífero, por lo que se hace necesario mejorar esta técnica con el fin de aplicarla al estudio de los acuíferos en Venezuela.

Con el objeto de aplicar técnicas de simulación condicional bidimensional que permitan la generación de espesores de las capas de un acuífero y la posterior evaluación del comportamiento hidrogeológico del acuífero; se toma como acuífero de referencia para aplicar este estudio el acuífero de la planicie del Motatán, de importancia regional en la zona baja del estado Trujillo en el ámbito agrícola donde el recurso agua es tomado de este acuífero mayoritariamente para riego, pudiendo construirse con este método modelos conceptuales del acuífero que permitan una fuente de información para futuras perforaciones de pozos.

A partir de un universo de 1200 pozos que se tienen en registro, se realizó una depuración de tal forma que permitiera el uso óptimo de la técnica a aplicar, esta depuración se basó en estructurar una base de datos que presentara uniformidad en la información referente a litología, profundidad de perforación, caudal de bombeo, ubicación de rejillas, costas de terreno, nivel piezométrico, que constituyen la información de entrada al programa MODFLOW, toda vez que se haya realizado la simulación bidimensional de los espesores, para la generación de las cotas de fondo de cada capa que se importaran a este programa.

Con la finalidad de construir varias representaciones de la formación geológica de la planicie se realizan cincuenta simulaciones por cada espesor de capa, para de éstas seleccionar aleatoriamente 10 simulaciones por capa, para construir 10 formaciones acuíferas que permitan la evaluación de éstas.

# CAPITULO 1

## INTRODUCCIÓN

Mediante las técnicas de simulación es posible predecir el comportamiento y la evolución futura de acuíferos. Para ello se requiere un gran número de datos como elementos básicos para que las estimaciones puedan ser fundamentadas; cuando la información a reflejar es poco abundante, la interpretación del mapa producido corre el riesgo de ignorar total o parcialmente los diferentes grados de subjetividad en la interpretación de datos. La geoestadística proporciona conceptos y herramientas matemáticas que permiten una solución a éste tipo de problema bajo una base conceptual sólida.

La geoestadística tiene como fin la caracterización del fenómeno natural a través de la estimación, métodos de cartografía automática y cálculo de valores promedio, a partir de un conjunto de medidas. La innovación de la geoestadística es que permite obtener no solo la estimación sino también una medida de la incertidumbre del valor estudiado.

Los métodos geoestadísticos han adquirido una considerable popularidad entre los hidrogeólogos debido en parte a los resultados obtenidos por la hidrología subterránea estocástica, nueva e interesante rama que estudia el efecto de la heterogeneidad del medio natural sobre el flujo subterráneo.

La aplicación de la geoestadística en este estudio es con el propósito de generar el espesor de las capas y realizar la evaluación hidrogeológica del acuífero de la planicie del río Motatán, a partir de la información obtenida de la red de observación de pozos de agua subterránea instalada e inventariada por el S.H.T en este acuífero. Esto se logrará distribuyendo el medio considerado en diferentes clases de material, respetando los porcentajes de distribución observados en las perforaciones; así, a través de la simulación condicional, se generan valores aleatorios de distribución espacial de las características geométricas de las capas en cuanto a longitud horizontal y espesor vertical.

Las geometrías obtenidas de las capas por estos métodos geoestadísticos alimentarán los modelos de simulación tridimensional de flujo subterráneo para evaluar la incidencia de estas geometrías en el comportamiento del acuífero y ver la importancia en la generación de distribuciones espaciales de perfiles representativos del acuífero.

## **Objetivos**

### **Objetivo general:**

Aplicar técnicas de simulación condicional bidimensional que permitan generar el espesor de las capas y la posterior evaluación hidrogeológica del acuífero.

### **Objetivos específicos:**

Aplicar técnicas geoestadísticas para la estimación del espesor de las capas del acuífero.  
Aplicar la metodología al acuífero de la planicie del río Motatán.

Bdigital.ula.ve

## CAPITULO 2

### REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 GEOESTADÍSTICA

La geoestadística es una técnica desarrollada a principios de los años sesenta que ofrece un conjunto de herramientas con las que se puede abordar el análisis de los componentes de variabilidad aleatoria (Samper, 1994). Según definición de Matheron, 1962, citado por Samper y Carrera (1990); es la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales, y la concibe como la aplicación de la teoría de las variables regionalizadas a la estimación de procesos o fenómenos geológicos en el espacio, también se puede definir como la rama de la estadística dedicada al estudio de los fenómenos espacialmente distribuidos (Journel, 1979, citado por Mora, 1996).

Las dos aplicaciones principales de la geoestadística en la hidrogeología son:

La estimación espacial de parámetros hidrogeológicos a partir de un conjunto de valores medios en forma puntual. La innovación de la geoestadística en este caso, es que permite obtener no sólo la estimación sino también una medida de la incertidumbre de dicha estimación.

Al proporcionar las medidas sobre la incertidumbre de la estimación, la geoestadística constituye una poderosa herramienta para la selección de puntos de muestreo de forma tal que minimice esa incertidumbre de estimación (Ben – Jemaa et al, 1994, citado por Miyashiro, 1996).

##### 2.1.1 Conceptos básicos de geoestadística

Variable regionalizada: El término de variable regionalizada fue propuesto por Matheron para calificar un fenómeno que se desarrolla tanto en el espacio y/o en el tiempo y manifiesta una cierta estructura (Mora, 1996).

Por otro lado, Miyashiro (1996) la define como una variable distribuida en el espacio; utilizando para representar un fenómeno natural.

Desde el punto de vista matemático, una variable regionalizada es simplemente una función aleatoria que depende del tiempo o del espacio y que en cada punto  $x$  es una variable aleatoria. Toda variable regionalizada posee una estructura de variabilidad particular: Las variables medidas en dos puntos separados por una distancia  $h$ , están correlacionadas; y bajo la hipótesis de estacionaridad el grado de dependencia o autocorrelación de éstas es sólo función de las características propias de la variable considerada, del módulo y dirección del vector  $h$ , que separa

los dos puntos, pero no de la localización específica de ambos puntos ni del valor medido en ellos (Mora, 1996).

Lo característico de una función aleatoria es que se puede concebir como la suma de una componente estructurada y otra aparentemente errática o aleatoria. La componente estructurada es la que permite asegurar que, si en una zona se dispone de varias medidas de valores altos, lo más probable es que en otros puntos de medidas adicionales a los valores también sean altos. La componente aleatoria sin embargo, impide predecir con exactitud el valor de dichas hipotéticas medidas (Samper, 1994).

- **Objeto de la teoría de las variables regionalizadas (Mora, 1996)**

Este se puede resumir así:

Establecer las bases teóricas que permiten tomar en cuenta las características estructurales de los fenómenos naturales.

Proporcionar los medios prácticos para resolver los diversos problemas de estimación espacial de parámetros que se presentan a partir de una muestra fragmentada.

**Función aleatoria.** Una función aleatoria es un conjunto de variables aleatorias,  $Z(x)$ , donde  $x$  es la ubicación que pertenece al área investigada, cuya dependencia de uno con respecto al otro se especifica por unos mecanismos probabilísticos (Miyashiro, 1996).

La función aleatoria expresa el aspecto aleatorio y estructural de un fenómeno natural de la manera siguiente:

Localmente, el valor puntual  $Z(x)$  se considera como una variable aleatoria.

Este valor puntual  $Z(x)$  es también una función aleatoria en el sentido de que por cada par de puntos  $X_i$  y  $X_j + h$ , las variables aleatorias correspondientes  $Z(x_i)$  y  $Z(x_i+h)$  no son independientes pero se relacionan por una correlación que expresa la estructura espacial del fenómeno.

La variable regionalizada representa al fenómeno, (el conjunto de todos sus posibles valores distribuidos en el espacio), considerada como una realización particular de la función aleatoria construida sobre este fenómeno (el conjunto de una infinidad de variables aleatorias que representan los valores del fenómeno en cada punto del espacio).

### 2.1.2. Momentos Considerados en Geoestadística Lineal

En la geoestadística lineal son suficientes los primeros momentos de una función aleatoria  $Z(x)$ . De hecho en la mayoría de las aplicaciones prácticas la información disponible no permite inferir momentos de mayor orden. (Samper y Carrera, 1990, citado por Miyashiro, 1996).

- **Momento de Primer Orden o Esperanza Matemática.**

El momento de primer orden es la esperanza matemática denominada también como media, es una medida de tendencia central definida como:

$$E [Z(x)] = m(x) \quad (2.1)$$

La función  $m(x)$  es conocida como derivada y tendencia, aunque algunos autores prefieren usar el término de deriva.

**Momentos de Segundo Orden.** Los tres momentos de segundo orden considerados en geoestadística son los siguientes:

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

$$\sigma^2 = Var. [Z(x)] = E \{ [Z(x) - m(x)]^2 \} \quad (2.2)$$

La varianza es generalmente una función de  $x$ .

b.- La covarianza de dos variables aleatoria  $Z(x_i)$  y  $Z(x_j)$ ,  $C(x_i, x_j)$  definida como:

$$C(x_i, x_j) = E \{ [Z(x_i) - m(x_i)] [Z(x_j) - m(x_j)] \} \quad (2.3)$$

Es una función de dos puntos  $X_i$  y  $X_j$ . Esta Función es denominada a veces como función de autocovarianza.

c.- El variograma es definido como:

$$\gamma(X_i, X_j) = \frac{1}{2} E \{ [Z(x_i) - Z(x_j)]^2 \} \quad (2.4)$$

De la definición de los momentos de una función aleatoria se puede observar que tanto la varianza como el variograma son siempre positivos mientras que la covarianza puede adoptar valores negativos (Jourel y Huijbregts, 1981).

### 2.1.3. Inferencia Estadística y Funciones Estacionarias.

Algunos conceptos estadísticos básicos que servirán de referencia para el desarrollo del presente trabajo, son revisados en el apéndice A.

- **Hipótesis de estacionariedad.**

Una función aleatoria es estacionaria siempre y cuando la ley de probabilidad de los valores que toma esta función en  $n$  puntos arbitrarios no varíe por la traslación del conjunto de esos puntos.

Es decir, un fenómeno es llamado estacionario si posee una cierta homogeneidad espacial de naturaleza estadística que hace que se pueda repetir en cualquier punto del espacio (Mora, 1996).

Una función aleatoria es estrictamente estacionaria si su función de distribución es invariable respecto a cualquier variación del vector  $h$ , es decir la función de distribución del vector aleatorio  $[Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)]$  es idéntica a la del  $[Z(x_1+h), Z(x_2+h), \dots, Z(x_n+h)]$  para cualquier  $h$  (Samper y Carrera, 1990, citado por Miyashiro, 1996).

Se puede suponer entonces que cada realización particular es satisfactoria para tomar en cuenta el conjunto de realizaciones eventuales por lo que la inferencia estadística puede realizarse reemplazando los valores medios del conjunto de realizaciones posibles por medias espaciales sobre una única realización (Mora, 1996).

La geoestadística lineal está limitada a suponer la hipótesis de estacionariedad de los dos primeros momentos de la función aleatoria. Una función es estacionaria de orden dos cuando:

a.-  $E [Z(x)]$  existe y no depende de  $x$

$$E [Z(x)] = m \text{ para todo } x \quad (2.5)$$

Si  $m$  depende de  $x$ , se dice que existe derivada o tendencia.

b.- Para cualquier pareja de variables aleatorias  $\{Z(x+h), Z(x)\}$  su covarianza existe y no depende del vector de separación  $h$ :

$$C(x+h, x) = E [Z(x+h) Z(x)] - m^2 = C(h) \quad (2.6)$$

**Hipótesis Intrínseca.** Una función aleatoria  $Z(x)$  es intrínseca cuando no está definida la varianza pero sí la de sus incrementos, es decir:

$[Z(x+h) - Z(x)]$  tiene una varianza y esperanza matemática definidas e independientes de  $x$  para todo vector  $h$ .

$$\text{Var}[Z(x+h)-Z(x)] = E[Z(x+h)-Z(x)]^2 = 2\gamma(h) \text{ para todo } x; \quad (2.7)$$

La hipótesis intrínseca puede ser vista como una limitación de la estacionariedad de segundo orden en el incremento de la función aleatoria  $Z(x)$ .

La función  $\gamma(h)$  se denomina semivariograma, pero en geoestadística se le llama variograma, dichos términos son usados indistintamente.

## 2.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

### 2.2.1 Medida de la variabilidad espacial

- **Variograma.**

El variograma se considera como una función modificada de la covarianza o función de autocorrelación de la teoría de las funciones aleatorias.

El variograma se estima directamente mediante la siguiente expresión:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i + h) - Z(x_i))^2 \quad (2.8)$$

$\gamma(h)$  = Variograma experimental

$Z(x_i)$  = Valores experimentales en los puntos  $X_i$ , en los que se tiene datos tanto en  $X_i$  como en  $X_{i+h}$ .

$N(h)$  = es el número de pares de puntos separados por una distancia  $h$ .

El variograma mide la variabilidad espacial de un fenómeno de la misma forma en que lo realiza la covarianza. Cuando la función aleatoria es estacionaria, la relación entre el variograma y la función aleatoria es estacionaria, la relación entre el variograma y la covarianza es directa, como se muestra en la Figura 2. 1; se observa que el variograma crece con la distancia  $h$  hasta

hacerse constante; la covarianza decrece desde el valor de la varianza hasta anularse a una cierta distancia conocida como alcance. Esta distancia señala la zona de influencia en torno a un punto, más allá de la cual la correlación espacial es nula.

La relación entre la varianza y la covarianza se expresa por medio de la ecuación:

$$\gamma(h) = \text{Var}(Z) - C(h) \quad (2.9)$$

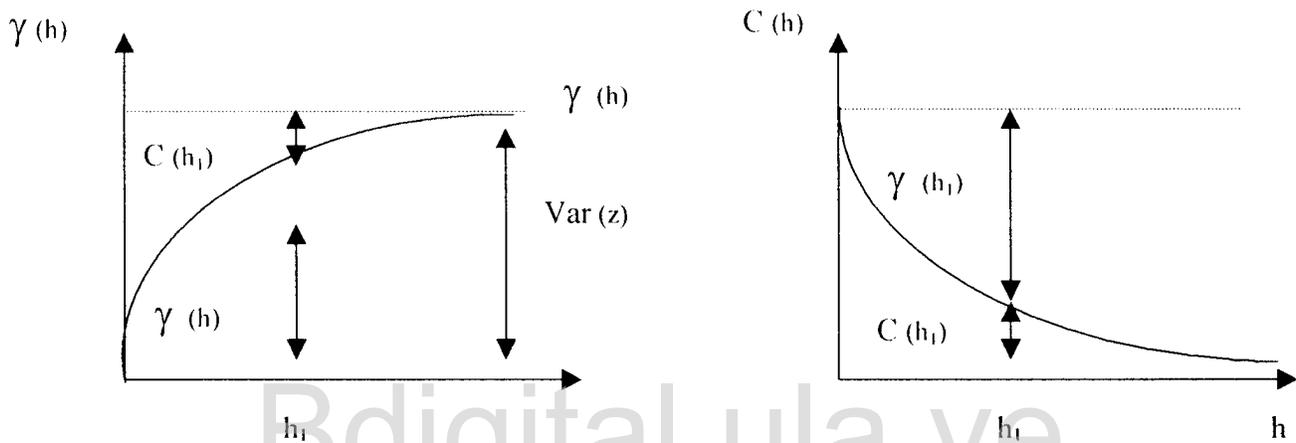


Figura 2.1. Relación existente entre el variograma y la covarianza

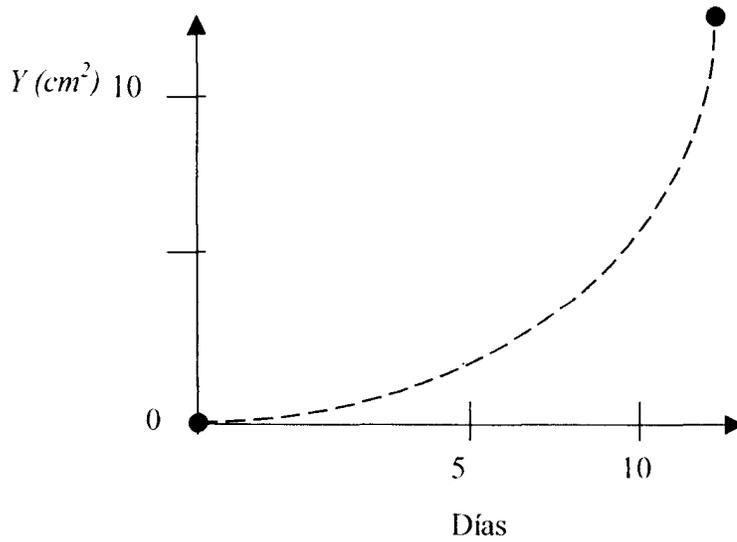
**Comportamiento del Variograma.** El comportamiento gráfico del variograma da una descripción sintética de la estructura del fenómeno estudiado y a su vez permite establecer la relación entre esta estructura y la precisión con la que se resuelve los problemas de interpolación y de estimación planteados.

Para establecer el comportamiento estructural se estudian las tendencias a cortas distancias y las asintóticas.

- *Comportamiento en el Origen.* Interpreta la continuidad que manifiesta la variable regionalizada. Se distinguen cuatro tipos:

- **Comportamiento Parabólico:** Describe a una variable excesivamente regular, derivable en media cuadrática.

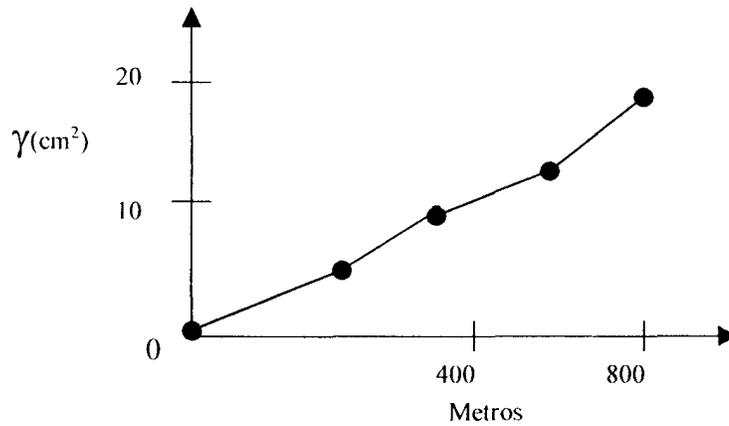
Ejemplo: Evolución diaria de niveles piezométricos en un pozo profundo. En la Figura 2.2, original de Delhomme (1978), se muestra este tipo de comportamiento (Mora, 1996).



**Figura. 2.2** Comportamiento parabólico en el origen de un variograma muestral.

- Comportamiento Lineal: Tendencia menos regular, continuo en media cuadrática pero no derivable.

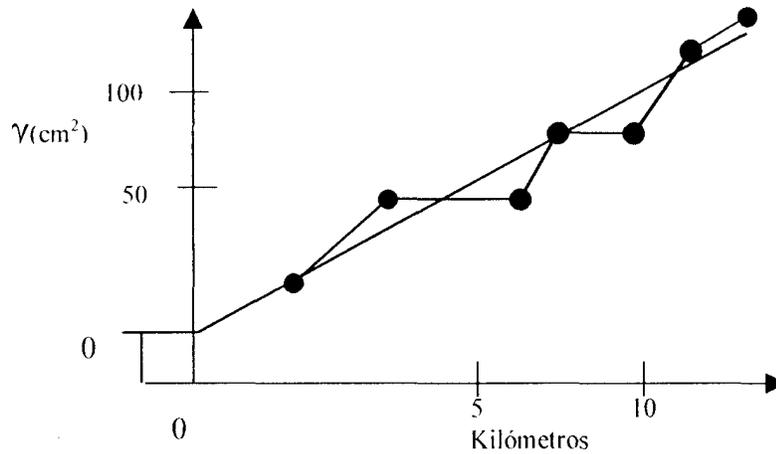
Ejemplo: La variación del espesor de una formación geológica. Figura 2.3



**Figura. 2.3** Comportamiento lineal del variograma

- Discontinuidad en el Origen. La variable es muy irregular, no continua en media cuadrática.

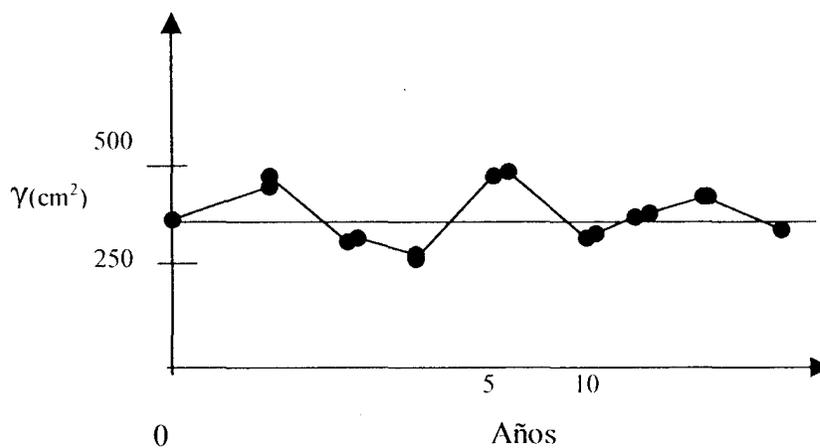
Ejemplo: La distribución de una tormenta en función de la distancia. Figura 2.4



**Figura 2.4.** Comportamiento del variograma con discontinuidad en el origen

- Aspecto Plano o Efecto de Pepita Puro: Es el caso de aleatoriedad pura para  $Z(x)$  y  $Z(x+h)$ , para una distancia  $h$  no nula, existe una variancia que oscila entorno a un valor constante.

Ejemplo: La evolución de las precipitaciones anuales en una estación. Figura 2.5



**Figura 2.5.** Comportamiento del variograma con efecto de pepita puro

- Comportamiento asintótico. El variograma puede crecer indefinidamente ya que es una función monótona no decreciente, al aumentar la diferencia  $Z(x+h) - Z(x)$ , pero si  $Z$  es estacionaria  $\gamma$  puede llegar a estabilizarse y alcanzar un valor límite constante denominado meseta la cual coincide con la varianza  $\sigma^2$  de  $Z$ .

La distancia a la cual se estabiliza el variograma se le llama alcance y esta indica la zona de influencia donde la correlación es nula.

- *Parámetros del Variograma.* En la Figura 2.6, se representan los diferentes parámetros de un variograma, los cuales son:

a.- Efecto de Pepita: A menudo el variograma es discontinuo en el origen con un salto finito que se le llama efecto de pepita. Este efecto puede deberse a:

Intervalos de Medidas y Superposición de Semivariograma: Siendo el semivariograma total la suma de los correspondientes a varias escalas de variabilidad del fenómeno buscado, puede resultar que aquellos de escalas más pequeñas aparezcan como efecto de pepita en el semivariograma experimental.

Efecto de la Disposición de Puntos de Medición: Cuando se trata de demarcar contornos de una región en estudio para efectos de delimitación de la superficie de algún acuífero, es frecuente que existan pozos cercanos a los límites de esas zonas. La consecuencia de tal disposición es que puntos próximos a los límites puedan provocar cambios notables en los valores que no son representativas de la variabilidad global de  $Z$ , dando lugar a un efecto de pepita aparente.

Errores de Mediciones: Toda medición puede contener errores, si se supone que estos son realizaciones de una variable aleatoria.  $E(x)$ , que  $Z(x)$  representa el campo real,  $Z_l(x)$  el campo medido y que los errores son aditivos, entonces  $Z$ ,  $Z_l$ ,  $l$  se pueden relacionar mediante:

$$Z_l(x) = Z(x) + l(x) \quad (2.10)$$

Suponiendo que  $Z(x)$  y  $l(x)$  son independientes puede establecerse que:

$$\gamma_{Z_l}(h) = \gamma_Z(h) + \gamma_l(h) \quad (2.11)$$

Asumiendo además que los errores carecen de correlación espacial y que tienen una varianza constante  $\sigma^2$  para todo  $h \neq 0$ , obteniéndose que:

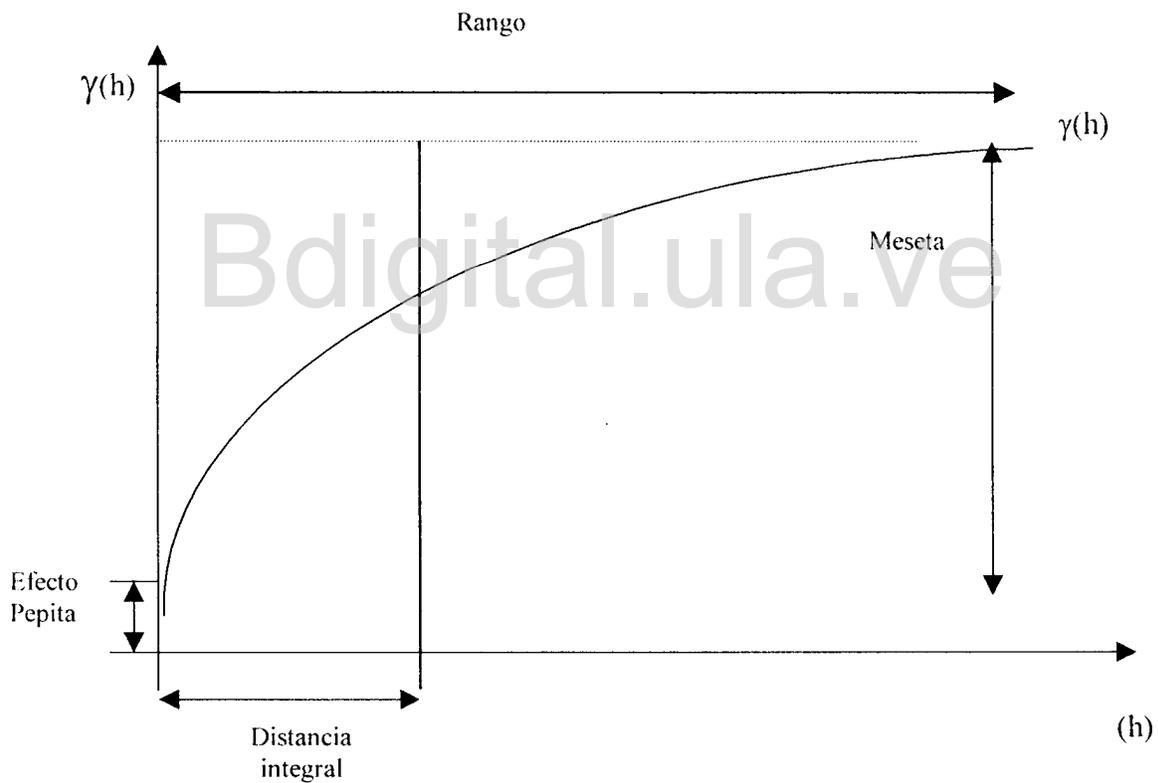
$$\gamma_{Z_l}(h) = \gamma_Z(h) + \sigma^2 \quad (2.12)$$

Se puede concluir finalmente que los datos  $Z_i$  tendrán un efecto de pepita puro de valor  $\sigma^2$  además del que pueda presentar  $Z$ .

b. Meseta: Si  $Z$  es estacionaria el variograma puede estabilizarse (comportamiento asintótico) y alcanzar un valor límite constante llamado meseta que coincide con la varianza  $\sigma^2$  de  $Z$ .

c. Rango: La distancia en la cual el variograma se estabiliza se denomina rango y denota la zona de influencia en la cual la correlación es nula.

d. Distancia Integral: Es aquella distancia  $h$  que al multiplicarla por la meseta permite obtener el área existente por encima del variograma a partir de esta distancia  $h$ . La distancia integral suele emplearse para medir el grado de correlación espacial de la variable.



**Figura 2.6.** Parámetros del Variograma

### 2.2.2. Variograma Teórico.

En el variograma experimental se presenta fluctuaciones aparentes, la mayoría de las veces éstas se deben a que los diferentes valores de  $\gamma(h)$  son estimaciones obtenidas partiendo de un pequeño número de pares de valores muestrales. En la práctica corriente esto justifica al ajuste de modelos teóricos empíricos a los variogramas muestrales con el objeto de garantizar la coherencia matemática de la estimación.

El término “teórico” se usa para diferenciarlos de los variogramas muestrales, es necesario destacar que estos variogramas teóricos no provienen de alguna hipótesis especial ni pretende representar fenómenos específicos.

Debido a razones de tipo numérico los Variogramas de tipo teóricos deberán cumplir con ciertas condiciones:

a.- De la definición de variograma se deduce que  $\gamma(h)$  debe ser nulo en el origen, es decir que,  $\gamma(0) = 0$

b.-  $\gamma(h)$  es una función “Condicionally definida negativa”, o también,  $-\gamma(h)$  es condicionalmente “positiva definida”. Es decir, que para todo conjunto  $X_1, \dots, X_n$  de punto arbitrarios y para todo conjunto  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  de coeficientes que satisfacen que:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 0 \quad (2.13)$$

Se debe cumplir que:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i - x_j) \leq 0 \quad (2.14)$$

c.- De la condición que  $-\gamma(h)$  es condicionalmente una función definida positiva se puede demostrar que el variograma necesariamente tiene un ritmo de crecimiento menor que  $h^2$  cuando  $h$  tiende a infinito, lo cual indica un ritmo de crecimiento menor (Journel y Huijbregts, 1979) es decir:

$$\lim_{h \rightarrow \infty} \frac{\gamma(h)}{h^2} = 0 \quad (2.15)$$

Tipos de Variogramas Teóricos. Son usados generalmente para ajustar los variogramas experimentales. Entre los modelos teóricos de variogramas se tienen dos tipos; modelo con una meseta o de transición y modelo sin meseta.

Modelo con una Meseta o Modelo de Transición. Entre ellos se encuentran:

- Modelo de efecto de pepita puro
- Modelo Esférico
- Modelo exponencial
- Modelo Gaussiano.
- Modelos Cúbicos.

Modelo de Efecto de Pepita Puro. Es indicativo de un fenómeno sin ninguna autocorrelación espacial. Se emplea su combinación con otro modelo. Su ecuación es:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } h = 0 \\ s & \text{si } h > 0 \end{cases} \quad (2.16)$$

$\gamma(h)$  = Variograma teórico:

$s$  = Meseta

$h$  = Distancia

Modelo Esférico. Se caracteriza porque alcanza la meseta para una distancia finita ( $h=a$ ), es indicativo de fenómenos continuos (o con un conjunto a los sumo numerable de discontinuidades) aunque no derivable. Es decir, fenómenos cuya representación gráfica puede presentar quiebres.

Viene expresado por la ecuación:

$$\gamma(h) = \begin{cases} \frac{s}{2} \left[ 3 \frac{h}{a} - \frac{h^3}{a^3} \right] & \text{si } h \leq a \\ s & \text{si } h > a \end{cases} \quad (2.17)$$

donde  $a$  es el alcance.

Sus características son el alcance  $a$ , la meseta  $s$ , la pendiente en el origen es  $1.5 \frac{s}{a}$  y la distancia integral  $\lambda$  esta expresada por:

$$\lambda = \frac{1}{s} \int_0^a s \left[ 1 - \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] dh = \frac{5}{12} a \quad (2.18)$$

Modelo Exponencial. Es representativo de fenómenos continuos, salvo en un conjunto de puntos (en una dimensión), líneas (en dos dimensiones) o planos (en tres dimensiones).

Su ecuación esta expresada por:

$$\gamma_{(h)} = s \left( 1 - e^{-\frac{h}{a}} \right) \quad (2.19)$$

Alcanza su meseta de forma asintótica:

$$meseta = \lim_{h \rightarrow \infty} s \left( 1 - e^{-\frac{h}{a}} \right) = s \quad (2.20)$$

Alcance efectivo  $a'$  será la distancia a la cual el variograma  $\gamma(h) = 0.95 S$ , que es aproximadamente:  $a' = 3 a$

La pendiente en el origen  $S/a$ , es menor que la de un variograma esférico con el mismo alcance  $a$ , pero que es mayor a la igualdad de alcance  $a'$ . Es decir, que la igualdad de alcance en el variograma exponencial crece y se aproxima a la meseta más rápidamente que el esférico (Miyashiro, 1996). La distancia integral es:

$$\lambda = \frac{1}{s} \int_0^a [s - \gamma(h)] dh = \int_0^a e^{-\left(\frac{h}{a}\right)} dh = \frac{a}{2} \pi \quad (2.21)$$

Modelo Gaussiano. Representa muy bien fenómenos suaves, es decir, continuos y derivables en la mayoría de los puntos.

Su comportamiento inicial es de tipo parabólico con pendiente el origen y es indicativo de una gran regularidad. Su expresión es:

$$\gamma_{(h)} = s \left[ 1 - e^{-\left(\frac{h^2}{a^2}\right)} \right] \quad (2.22)$$

Alcanza su meseta asintóticamente,

$$\text{meseta} = \lim_{h \rightarrow \infty} \gamma_{(h)} = s \quad (2.23)$$

Este modelo gaussiano, no tiene alcance, para efectos prácticos  $a = 3a$ , donde el variograma es igual a  $0,95 S$ .

La ecuación de la distancia integral es:

$$\lambda = \frac{1}{s} \int_0^{\infty} [s - \gamma_{(h)}] dh = \int_0^{\infty} e^{-\frac{h}{a}} dh = a = \frac{a^2}{3} \quad (2.24)$$

El variograma gaussiano suele conducir a problemas numéricos, salvo cuando se usa con efecto pepita, por lo que su empleo en la práctica es poco habitual.

Modelos Cúbicos. Su comportamiento en el origen es cuadrático por lo que es típico de fenómeno muy suaves, aunque no tanto como los componentes al modelo gaussiano del mismo alcance.

Sus expresiones son:

$$\gamma_{(h)} = \begin{cases} s \left( \frac{7h^2}{a^2} - \frac{35h^2}{4a^3} + \frac{7h^5}{2a^5} - \frac{3h^7}{4a^7} \right) & \text{si } h < a \\ s & \text{si } h \geq a \end{cases} \quad (2.25)$$

$$\gamma_{(h)} = \begin{cases} s \left( \frac{2h}{a} - \frac{h^2}{a^2} \right) & \text{si } h < a \\ s & \text{si } h \geq a \end{cases} \quad (2.26)$$

Modelos sin meseta. Aquí se pueden nombrar:

- Modelos monómicos
- Modelos logarítmicos
- Modelos con efecto agujero.

Modelos monómicos. Se usan para representar fenómenos no estacionarios, estos no tienen meseta, ya que tienden al infinito cuando lo hace h.

Su ecuación genérica es:

$$\gamma(h) = Kh^\theta \quad (2.27)$$

$\theta$  = Se acota estrictamente en el intervalo abierto (0,2) ya que si  $\theta = 0$  se tiene un efecto de pepita puro y si  $\theta \geq 2$  la función no es definida positiva.

$K$  = pendiente en el origen.

Modelos logarítmicos. No están definidos en el origen ni tampoco tienen meseta, ya que el  $\lim_{h \rightarrow \infty} \gamma(h) = \infty$ . Es de gran utilidad cuando el variograma experimental se comporta linealmente al usar una escala logarítmica para las distancias. Su ecuación es:

$$\gamma(h) = C_1 \log(h) \quad (2.28)$$

Modelos con efecto agujero. Es indicativo de fenómenos con componentes periódicas o cuasi-periódicas. Estas componentes son difíciles de estudiar por el método de Kriging. Si la periodicidad se conoce bien lo mejor es filtrarla por algún otro método. Si no existen datos suficientes para asegurar su existencia, se debe ignorar las ondulaciones del variograma experimental, ya que pueden ser debidas a otras causas.

Los variogramas más comunes con efecto agujero son:

$$\gamma(h) = s \left[ 1 - \frac{\text{sen}(h)}{h} \right] \quad (2.29)$$

Con comportamiento parabólico en el origen y negativo definido en tres dimensiones.

En la Figura siguiente se muestran los diferentes tipos de variogramas teóricos más comunes.

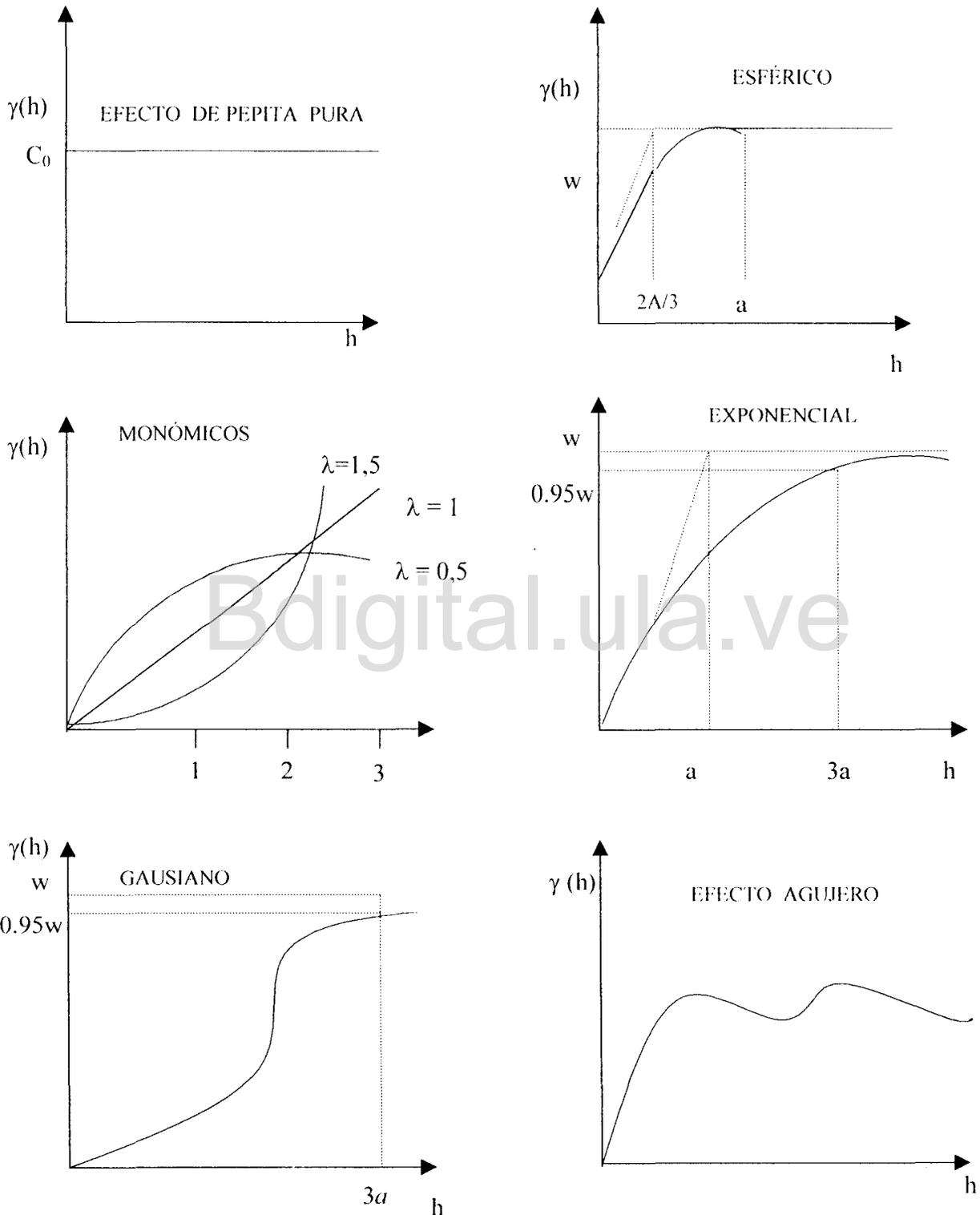


Figura 2.7. Variogramas teóricos más utilizados (tomado de Samper y Carrera, 1990).

## 2.3. KRIGEADO

El objetivo del kriging es conseguir la mejor estimación o predicción lineal posible de una variable a partir de la información disponible, valores muestrales y relaciones de dependencia espacial, asignando como criterio para ello la falta de sesgo y la minimización de la varianza de la estimación.

Con el kriging se obtendrá la estimación más precisa del valor en un punto cuando los datos siguen una distribución de probabilidad normal y además simultáneamente permite determinar la varianza de la estimación y con esto detectar un error sistemático.

### 2.3.1. Kriging ordinario.

Este método tiene como objetivo obtener la estimación de  $Z(x)$ , a partir de los datos medidos  $Z_i$  en los puntos de observación  $X_i$ , de la forma siguiente:

$$Z^* = \sum_i \lambda_i Z_i \quad (2.30)$$

Como no se conoce la media, se obliga a imponer un requisito adicional, el de sesgo nulo. Es decir,

$$E(Z^*) = E(Z) \quad (2.31)$$

Sustituyendo la Ecuación 2.30 en la Ecuación 2.31 se obtiene:

$$E\left(\sum_i \lambda_i Z_i\right) = E(Z) = m \quad (2.32)$$

o bien

$$\sum_i \lambda_i E(Z_i) = \sum_i \lambda_i m = m \quad (2.33)$$

Obteniéndose:

$$\sum_i \lambda_i = 1 \quad (2.34)$$

Condición necesaria para asegurar que el estimador es insesgado y la condición de optimalidad es nuevamente la de que la varianza de estimación sea mínima. Esta se derivó como:

$$E = [(Z^* - Z)^2] = \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j E(Z_i - Z_j) - 2 \sum_i \lambda_i E(Z_i Z) + E(Z^2) \quad (2.35)$$

donde:

$$E(Z_i Z_j) = C(X_i - X_j) + m^2 \quad (2.36)$$

$$E(Z^2) = C(0) + m^2 = \text{Var}Z + m^2$$

Sustituyendo en la Ecuación 2.35 se llega a:

$$E[(Z^* - Z)^2] = \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j C(X_i - X_j) - 2 \sum_i \lambda_i C(X_i - X) + C(0) + m^2 (\sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j - 2 \sum_i \lambda_i + 1) \quad (2.37)$$

El factor que multiplica a  $m^2$  es precisamente igual a  $\left(\sum_i \lambda_i - 1\right)^2$ , que es nulo por la condición que expresa la Ecuación 2.35. Con ello, la Ecuación 2.34 se reduce a:

$$E[(Z^* - Z)^2] = \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j C(X_i - X_j) - 2 \sum_i \lambda_i C(X_i - X) + C(0) \quad (2.38)$$

Minimizando para satisfacer la Ecuación 2.32, empleando el método de los multiplicadores de Lagrange que consiste en minimizar el lagrangiano  $L(\lambda_i, \mu)$ :

$$L(\lambda_i, \mu) = \frac{1}{2} E[(Z^* - Z)^2] - \mu (\sum_i \lambda_i - 1) \quad (2.39)$$

Respecto a los coeficientes  $\lambda_i$  y al parámetro  $\mu$ , denominado multiplicador de Lagrange. Para la minimización de la Ecuación 2.40 hay que igualar a cero las derivadas de  $L(\lambda_i, \mu)$ , Esto conduce a:

$$\sum_i \lambda_i C(X_i - X_j) - \mu = C(X_i - X) \quad j = 1, \dots, n \quad (2.40)$$

$$\sum_i \lambda_i = 1$$

Sistema lineal de  $n+1$  ecuaciones con  $n+1$  incógnitas, que constituyen las ecuaciones de kriging. Este sistema es regular y la matriz de coeficientes es independiente de  $X$ . determinando los  $\lambda_i$  y  $\mu$ , se obtiene el estimador  $Z^*$  y su varianza de estimación:

$$Z^* = \sum_i \lambda_i Z_i \quad (2.41)$$

$$Var(Z^* - Z) = Var(Z) - \sum_i \lambda_i C(X_i - X) + \mu \quad (2.42)$$

Esta varianza es superior a la obtenida en el caso de media conocida. Esto es debido a la incertidumbre, sobre  $m$ , que implica una restricción adicional en la elección de los coeficientes de ponderación. El valor de la media  $m$ , se tiene que determinar para poder estimar la función de covarianza. Esto puede evitarse trabajando con el variograma en vez de la covarianza.

## 2.4. SIMULACIÓN

La simulación estocástica de una función aleatoria, dada su función de distribución, consiste en generar posibles realizaciones de dicha variable aleatoria. Debido a que la información que a veces se dispone sobre una variable aleatoria solo permite la inferencia estadística de sus dos primeros momentos se desea que los valores simulados preserven la media, la varianza y la covarianza de la función aleatoria. A este tipo de simulación se le denomina simulación no condicionada en contraste con la simulación condicionada en la cual los valores simulados  $Zs(x)$  son coherentes (están condicionados) con los valores observados, es decir  $Zs(xi) = Z(xi)$  para  $i = 1, 2, \dots, n$

Los objetivos esenciales de toda simulación, tanto condicionada como no condicionada, se pueden clasificar en dos. El primero de ellos es reproducir la variabilidad espacial del fenómeno o de la variable de interés.

El segundo propósito de la simulación de una función aleatoria es generar valores de los parámetros necesarios en la simulación estocástica de ciertos procesos.

Edelman (1979), citado por Miyashiro (1996), menciona que la simulación estudia un sistema para conocer cómo cambian sus estados y predecir y controlar dichos cambios. Por su parte Coss (1994) toma como referencia la definición de Maisel y Gnugnoli, que la definen como una técnica numérica para realizar experimentos que involucran ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos que describen el comportamiento de diferentes sistemas a través de largos períodos de tiempo. Para Shannon, es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo, con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema.

Según Mora (1996), la simulación tiene como objetivo en geoestadística, la generación de funciones o conjunto de valores de una variable hidrogeológica consistentes con la información disponible. Un segundo objetivo lo constituye la generación de valores de los parámetros necesarios en la simulación estocástica de ciertos procesos; por ejemplo, valores simulados de lluvia media en una cuenca pueden ser empleados en la simulación de escorrentía de un modelo paramétrico previamente calibrado.

El mismo autor define la simulación estocástica de una función aleatoria, dada su función de distribución, como aquella que consiste en generar posibles realizaciones de la variable aleatoria.

La simulación puede ser condicionada o no, la primera es aquella en que los valores simulados están condicionados a los valores observados; mientras que la segunda, es la que se puede efectuar cuando la información de que se dispone sobre la variable aleatoria solo permite la inferencia estadística de sus dos primeros momentos y se desea que los valores simulados conserven la media, varianza y covarianza de la función aleatoria.

Los métodos de simulación que generalmente se usan son: el método espectral, el de bandas rotantes y el matricial, los dos primeros producen simulaciones no condicionadas que posteriormente deben condicionarse. El método matricial consiste en generar variables aleatorias cuya matriz de covarianza coincide con la obtenida por el krigeado.

Lo característico de una función aleatoria es que se puede concebir como la suma de una componente estructurada y otra aparentemente errática o aleatoria. La componente estructurada es la que permite asegurar que, si en una zona se dispone de varias medidas de valores altos, lo más probable es que en otros puntos de medidas adicionales a los valores también sean altos. La componente aleatoria, sin embargo, impide predecir con exactitud el valor de dichas hipotéticas medidas (Samper, 1994).

## CAPITULO 3

### METODOLOGÍA APLICADA EN EL ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO

#### 3.1 INFORMACIÓN BÁSICA RELACIONADA CON EL ÁREA EN ESTUDIO

##### 3.1.1. Localización y extensión del área de estudio

El área de estudio se localiza al Occidente del país, en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo y se enmarca entre las siguientes coordenadas:

Ubicación Geográfica: 09° 16' 00" y 09° 43' 15" Latitud Norte.  
70° 38' 27" y 71° 03' 26" Longitud Este.

Ubicación Astronómica: Norte: 1.075.000 m y 1.045.000 m  
Este: 270.000 m y 310.000 m

Ubicación Político Administrativa: Desde el punto de vista político administrativo se corresponde con los Municipios La Ceiba, Andrés Bello; parte de los Municipios Miranda, Sucre, Bolívar del Estado Trujillo y parte del Municipio Baralt del Estado Zulia.

Tiene una superficie aproximada de: 705.360 km<sup>2</sup>

Ubicación Hidrográfica: Se ubica en la margen derecha – izquierda del Río Motatán.

##### 3.1.2. Fisiografía

La altitud del área de estudio varía de 0 a 50 m.s.n.m., y presenta pendientes inferiores al 5%; disminuyendo en dirección Este – Oeste con promedios que oscilan entre 0,1 y 0,3% y en dirección Norte – Sur posee pendientes promedio de 0,7%.

### 3.1.3. Geología y geomorfología

- ***Geología Regional***

La unidad fisiográfica que enmarca la planicie aluvial del área en estudio se corresponde con la depresión tectónica de la Cuenca del lago de Maracaibo, cuyos orígenes se relacionan con el levantamiento post-eoceno de la Sierra de Perijá y la Cordillera Andina Venezolana.

Durante amplios y diversos períodos erosivos y deposicionales esta cuenca ha recibido los aportes de más de 10.000 metros de espesor, con edades que oscilan desde el Cretáceo, con afloramientos que se ubican hacia los límites Nor-este y Sur-este de la cuenca, hasta el Cuaternario Reciente, cuyos aluviones cubren actualmente gran parte de la misma.

- ***Geología Local***

La actual planicie aluvial que conforma la totalidad del área en estudio tiene su origen en procesos de erosión, transporte y acumulación de sedimentos que, desde el Oligoceno hasta nuestros días han contribuido al relleno progresivo de esa cuenca de subsidencia.

Los aportes sedimentarios provienen principalmente del Piedemonte Terciario y Cuaternario constituido por las Formaciones de Betijoque, Isnotú y Palmar y las terrazas y conos del Pleistoceno, así como de las diversas formaciones por las cuales atraviesa el río Motatán, entre las que destacan: Formación Sierra Nevada, Los Torres, Mucuchachí, Isnotú, Betijoque y Aluviones Cuaternarios.

### 3.1.4. Formaciones geológicas piedemontinas

- ***Formación Isnotú: Terciario - Mioceno***

Litología: Conformada por arcillas macizas intercaladas con capas de arcillas laminares, carbón y conglomerados, muy erodable, concordante transicional con las Formaciones Palmar y Betijoque.

- ***Formación Palmar: Terciario - Mioceno***

Litología: Formada por areniscas de grano fino intercaladas con arcilla. Toma el nombre de Isnotú cuando su litología cambia a arcillas carbonáceas, concordante con la formación Isnotú.

- **Formación Betijoque: Mio – Plioceno**

Consiste en general en aluviones originados en el período terciario.

- **Aluviones Cuaternario Reciente**

Según el francés Desnoyers citado por Vivas(1984) introdujo el término Cuaternario, como un agregado a la nomenclatura primario, secundario y terciario que constituye la escala geológica creada por Arduino en 1759 y que modernamente se sustituyó por Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico, respectivamente.

- **Litología:** “Son conglomerados macizos, mal escogidos y mal cementados, altamente susceptibles a los procesos erosivos representando una fuente de alimentación de materia sólida de los ríos Cheregüe, Buena Vista, Caús Pocó y La Vichú.”.

Este tipo de relieve cuaternario, formado por la sucesión terraza antigua o cono de deyección antiguo, Glacis Coluvial y Planicie Inundable, se prolonga bastante hacia el Sur – Oeste, hasta unirse con el pie de monte Andino – Lacustre que arranca en los alrededores del área de Agua Viva, en el Valle del río Motatán.

Los aportes piedemontinos disminuyen hacia el Sur-oeste, donde aumentan los materiales procedentes de la zona montañosa con predominio de areniscas y calizas para el río Caús y de micaesquistos, gneisses y granito para los ríos Buena Vista y Pocó.

### 3.1.5. Geomorfología

Antes de iniciar la descripción de las variables geomorfología - suelos es necesario aclarar que existen diversos estudios geomorfológicos y que en conjunto abarcan la casi totalidad de la zona de estudio, presentan diferentes niveles de detalle que no permiten homogeneizar la información. A los fines del presente diagnóstico resulta válido tomar como referencia el estudio realizado por Buitrago J, y Rangel O (1.988). En el mismo son definidas las diferentes posiciones geomorfológicas según el área que ocupan, la clase textural predominante, los meses secos y las limitaciones de las unidades de suelo en cuanto a drenaje, erosión e inundaciones.

La zona de estudio corresponde a la Región Fisiográfica de la Depresión del Lago de Maracaibo, se ubica sobre un paisaje de Planicie Aluvial con pendientes menores del 3% que tienden a disminuir a medida que se avanza hacia el litoral lacustrino.

Se distingue dentro de este paisaje de planicie una franja paralela a la costa sur - oriental del Lago de Maracaibo, con un ancho aproximado de 2000 metros denominada Margen Cenagosa y cuyas pendientes son las de menor valor en el área.

Desde el punto de vista geomorfológico, la dinámica fluvial en la planicie se expresa a través de procesos deposicionales de alta selección granulométrica que originan en el paisaje diversas posiciones geomorfológicas. Esta selección granulométrica actúa depositando los materiales como arenas y limos, cerca de los ejes de aporte, hacia las zonas más elevadas del terreno, mientras que los materiales con alta proporción de limos y arcillas se depositan en las zonas intermedias y más bajas respectivamente.

Las referencias consultadas indican la presencia de depósitos por explayamiento y depósitos por desborde cada uno con posiciones geomorfológicas características.

- ***Descripción de las posiciones geomorfológicas.***

*Napas de desborde.* Son depósitos originados por acumulación libre, durante el desbordamiento generalizado de los ríos. Forman conjuntos topográficos planos muy uniformes y de gran extensión, con texturas medianas predominantemente limosas. Esta forma fluvial se distribuye ampliamente sobre el área de estudio, ubicándose en las adyacencias de ambos márgenes del Río Motatán, alrededor de los Centros Poblados Santa Apolonia, El Doce, El Catorce, 3 de Febrero, algunos sectores al este de la margen Cenagosa y al Sur del Municipio la Ceiba.

*Cubetas de Decantación.* Presenta una topografía cóncava en forma de ponchera o batea y ocupa las posiciones más bajas de las zonas aluviales, su configuración es ovalada o elíptica, cerrada y estrangulada aguas abajo por una contra pendiente, lo que facilita el estancamiento de las aguas recibidas por lluvias e inundación. Todas estas condiciones originan procesos de decantación muy lentos, con partículas esencialmente arcillosas. Esta posición se ubica al Norte, hacia el margen izquierdo del río Motatán y hacia el Sur o Sureste del Municipio La Ceiba.

*Dique Aluvial.* Constituye una variable de la forma de banco, su topografía es convexa de forma alargada, estrecha y sinuosa; con texturas medias a gruesas, corresponden a las partes más altas de la zona deposicional.

Esta noción de dique abarca la mayoría de las formas axiales deposicionales: albardones, brazos, deltaicos, ejes, etc., originadas todas por exceso de carga. Se localiza en una extensa unidad al Nor-este del área y en pequeñas unidades hacia el Nor-oeste.

*Brazo Deltaico Colmatado.* Son los depósitos que se encuentran a ambas márgenes de los numerosos brazos en que se divide el curso principal dentro del sistema deposicional deltaico. Estos brazos, al dejar de funcionar, tienden a rellenarse por colmatación del cauce. Ubicados principalmente hacia las márgenes izquierda y derecha del río Motatán.

*Albardón de Orilla Colmatado.* Se origina, al igual que las dos divisiones anteriores, por exceso de carga. Son los diques naturales que acompañan los ríos en ambas márgenes. Se presenta bordeando un eje de escurrimiento actual o antiguo, con texturas livianas, ocupando las posiciones más altas de las zonas aluviales. Se ubica en pequeñas unidades de tierra hacia el Sur-oeste del área.

*Napas de Explayamiento.* Constituye un banco medio, de amplia extensión y forma masiva. Las texturas de estos depósitos son predominantemente areno francosas y franco arenosas. Se ubican en pequeñas unidades de tierra hacia el extremo sur-oeste del área.

*Napas de Desborde Reciente.* Generalmente estos depósitos se presentan haciendo contacto entre diques aluviales y las cubetas. Se ubican en pequeñas unidades hacia el sur-este, cercanas al Canal de la Vichú.

*Ciénagas.* Según Leotaudi y Moreno 1980, constituyen un medio deposicional del litoral lacustrino. Predominan las texturas arcillosas, con presencia permanente de agua en el suelo.

### 3.1.6. Suelos

En base a Leotaudi y Moreno (1.980) y Buitrago y Rangel (1.988), se describirán las unidades de suelo asociadas a la posición geomorfológica que ocupan. Dichas unidades han sido homogeneizadas según la composición granulométrica o clase textural predominante en el perfil.

- ***Suelos Francos***

Se localizan en las posiciones geomorfológicas de napas de explayamiento, diques, brazos deltaicos y napas de desborde. Estos suelos presentan buen drenaje y valores medios de agua útil.

Según Leotaudi y Moreno (1.980), los suelos francos ubicados al Este de la margen cenagosa son susceptibles a la compactación por lo que debe tenerse cuidado al aplicar laboreo mecánico. Son aptos para la mayoría de los cultivos de la zona a excepción de los períodos secos cuando requieren riego.

También se localizan en la planicie Sur y margen derecha del río Motatán y hacia el extremo Nor-este.

- ***Suelos Franco - Arenosos***

Se localizan fundamentalmente hacia el Norte en posición de dique aluvial y al Sur sobre unidades de brazos deltaicos y dique aluvial. Presentan limitaciones por drenaje excesivo, alto lavado de nutrientes y baja retención de humedad.

- ***Suelos Franco - Limosos***

Se ubican predominantemente hacia la margen derecha del Canal de la Vichú en posiciones geomorfológicas de napas de desborde y brazos deltaicos colmados.

Las altas proporciones de limo presentes en estos suelos, sumado a la fluctuación del nivel freático, dificulta las condiciones del drenaje; las prácticas de manejo deben ser cuidadosas ya que el excesivo laboreo puede afectar la estructura edáfica.

- ***Suelos Franco Arcillosos Limosos***

Se ubican principalmente a ambos lados de la carretera local 8 vía a La Ceiba, en posición de napas de desborde y cubetas de decantación.

Presentan un drenaje imperfecto y alta retención de humedad pero con prácticas adecuadas de manejo pueden ser suelos trabajables.

- ***Suelos Arcillosos***

Se encuentran ubicados hacia la margen izquierda del río Motatán, sobre posición geomorfológica de napa de desborde y en algunos sectores de cubeta cercanos a la margen cenagosa.

Su principal limitante está referida a las texturas pesadas que acarrearán imperfecciones en el drenaje.

- ***Suelos Arenosos***

Constituidos por texturas livianas con baja retención de humedad y drenaje muy rápido. Este tipo de suelo se ubica hacia la margen derecha del río Motatán y al Sur-oeste sobre posiciones geomorfológicas de napa de explayamiento y brazo deltaico colmatados.

- ***Suelos Arcillo - Limosos***

Son los suelos de menor extensión en la planicie, se ubican fundamentalmente en posición de cubeta de decantación y ciénaga. Sus texturas son pesadas presentando drenaje imperfecto y fluctuación de la masa de agua.

- ***Suelos Arcillo – Arenosos***

Presentan texturas pesadas con moderada retención de humedad. Están localizadas el Sur-este del Municipio la Ceiba sobre posición de cubeta de decantación.

Según lo expuesto, los suelos del área presentan predominantemente texturas medias y pesadas. CORPOANDES - ECOSA, (1.975), señala que por el Sistema de la Séptima Aproximación los suelos existentes pertenecen a las órdenes entisoles e inceptisoles desarrollados sobre acumulaciones aluviales recientes. El primero de estos órdenes se asocia con suelos muy jóvenes, sin desarrollo de un perfil con horizontes típicos, mientras que los suelos correspondientes al segundo orden mencionado tiene el comienzo de un horizonte típico.

Por otra parte los bajos contenidos de Materia Orgánica (C.O), Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) presentes en algunos sectores dan características de una baja fertilidad natural, con pocos nutrientes que requieren de dosis controladas de fertilizantes para un óptimo aprovechamiento, así como un adecuado manejo de los suelos que permita la recuperación de los mismos.

### **3.1.7. Clima**

El Clima del área está influenciado por los vientos alisios provenientes del N-E y por las masas de aire ecuatoriales que se internan en el territorio venezolano para el comienzo del período de lluvias (mayo-junio).

Por lo seco del clima del área, se infiere que los vientos alisios al llegar a este sector ya han descargado gran parte de su humedad en la zona sur-occidental del Lago de Maracaibo. Es

probable que las lluvias convectivas que se producen al chocar estos vientos con Los Andes, afecten el área debido a su cercanía al piedemonte andino.

- ***Elementos del Clima***

Se estudiaron la precipitación y la temperatura, tomando como fuente 3 estaciones climatológicas: La Ceiba, Ceuta y Canal Principal.

- ***Precipitación***

Según SIIT - CGR Ingenieros (1.994), la precipitación a lo largo del año presenta dos períodos de lluvia abril - mayo y septiembre - octubre intercalados por períodos secos. La precipitación media anual es de 1.741 mm en La Ceiba, 1.104 mm en Ceuta y 981 mm en Canal Principal. En el plano de isoyetas anuales consultado se observa que las precipitaciones en la planicie aluvial del río Motatán disminuyen hacia el Este, siendo más elevadas a las orillas del Lago de Maracaibo. Esto se debe a la cercanía del Lago, gran masa de agua donde se da una alta evapotranspiración.

- ***Temperatura***

Durante todo el año la temperatura es mayor de 27°C. A orillas del Lago (La Ceiba) las temperaturas son mayores de 28°C desde marzo hasta septiembre. En octubre comienzan a disminuir hasta llegar a 27.2°C en el mes de diciembre. Este descenso de temperatura está relacionado con el avance de las masas de aire frías del norte hacia el sur para esa época del año. En la estación Ceuta, al norte del área, se registran temperaturas de 25.9°C para el mes de febrero.

- ***Clasificación Climática***

El SHT – CGR Ingenieros (1.994) utilizó el Sistema de Clasificación Climática de Thornhwaite, que proporciona información de cómo funciona la disponibilidad de agua en el sistema durante el año.

Tomando los datos de precipitación y temperatura de las estaciones La Ceiba, Ceuta y Canal Principal, el clima es seco, Semi - Árido Megatérmico o cálido (D,d,A,a). En el balance hídrico para la estación La Ceiba se observa un déficit de humedad para los meses de enero, febrero, marzo, junio, julio y agosto; sin excesos durante el año. Al Norte y hacia el Este (Ceuta y Canal Principal) hay deficiencia de agua durante todo el año.

Como se puede apreciar, la disponibilidad de agua en el área es baja. Para actividades agropecuarias es necesario tener riego complementario para la época seca.

### 3.1.8. Hidrografía

- ***Características Generales de la Red Hidrográfica***

**Problemática de Inundaciones.** La Red Hidrográfica del área de estudio está constituida por ríos que presentan un régimen de tipo permanente y otros de régimen intermitente o esporádico que se comportan torrencialmente en los períodos de máxima precipitación.

Entre los principales cursos de agua de la zona destacan los ríos Motatán, Caús, Buena Vista y La Vichú y entre los cursos menores: Caños Carrillo, Mimbocito, Albarical y Palmira.

- *Río Motatán.* Constituye por su caudal y extensión, el río más importante de la zona; nace en los páramos andinos a más de 4000 m.s.n.m. Se ubica al Norte de la carretera local 8, atravesando toda la planicie aluvial del área de estudio en sentido Este - oeste para desembocar al Lago de Maracaibo, donde ha formado un extenso delta de acumulación progresiva.

Este río de régimen permanente, ha sido canalizado en sus últimos 13 kms de recorrido por que en la planicie ocasiona problemas de inundación afectando a zonas de cultivo ubicadas en las adyacencias de su cauce durante los períodos de máxima precipitación. En visita al área se tuvo conocimiento de esta problemática en los sectores La Carga y Matapalo cercanas al Caño Palmira.

- *Río Buena Vista.* Nace en la zona montañosa a 2800 m.s.n.m aproximadamente. Entre sus afluentes del área montañosa destacan las quebradas Amarilla, La Gata, La curva, San Rafael, San Antonio y el Río Mimbós, todos de régimen permanente.

Hacia la zona fluvial recibe las aguas de las quebradas La Catalina, La Chira y El Caño Mimbocito de régimen esporádico.

Este Río de dinámica fluvial estable en la parte montañosa, se vuelve inestable al llegar al piedemonte presentando problemas de inundación desde que entra a la planicie; aunque dentro del área de estudio esta particularidad ha sido parcialmente controlada por la canalización del río en un tramo de once kilómetros, desde la desembocadura del Caño Mimbocito hasta donde

concluye con un viejo cauce del río Pocó, a partir de aquí sigue su recorrido libremente hasta el final del Canal de la Vichú.

- *Río Caús*. Nace en el piedemonte, por la confluencia de las quebradas El Caraño, La Amarilla, La Palma, El Quebradón y El río Mimbós.

Presenta una dinámica similar al río antes descrito, perdiendo su cauce al entrar a la planicie e inundando extensas áreas.

Ya para 1.973, un estudio del Ministerio de Obras Públicas (M.O.P.) sobre la problemática de inundaciones entre las cuencas de los ríos Chama y Motatán destaca la gran cantidad de sedimentos en suspensión que arrastra este río y que al ser depositados por desbordamiento modifica desfavorablemente el perfil de los suelos. Siendo este el caso de la zona denominada Los Verales, una de las más afectadas por las inundaciones.

A partir de esta última localidad, el río sigue su recorrido hasta engrosar el caudal del Canal de la Vichú.

- *Río La Vichú*. Nace en el piedemonte, donde concentra la mayor parte de su cuenca de captación, por la unión de las quebradas La Vichú y San Alejo. Durante los periodos de máximas precipitaciones este río se comporta torrencialmente, presentando procesos de erosión y arrastre de gran cantidad de sedimentos hacia las zonas bajas de la planicie al sur del Río Motatán. Para 1.975 se concluyó la canalización de los tramos medio e inferior del río, a fin de solventar los problemas ocasionados por las inundaciones periódicas de extensas áreas. Sin embargo, al no haberse aplicado las medidas de manejo y conservación a los procesos erosivos originados en las cuencas altas y media de la subcuenca La Vichú, se presentan azoíamientos en el canal e inundaciones en sus áreas de influencia lo cual conlleva a elevados gastos de dragado y mantenimiento del canal.

- *Caños Mimbocito, Carrillo y Albarical*. Todos estos cursos nacen en la planicie aluvial, son caños secundarios intermitentes que se alimentan exclusivamente de las aguas de drenaje y permanecen con mínimo caudal la mayor parte del año.

**Disponibilidad de Aguas Superficiales.** Para el área de estudio específicamente para el sector ubicado al sur del Canal de La Vichú; CORPOANDES - ECOSA, (1.975) y M.A.R.N.R, (1.978), han realizado estudios sobre la calidad de las aguas, clasificando la de los Ros Caús y Buena Vista como salinas y no sódicas, aptas para riego.

Se destaca así mismo la no existencia de registros para la red hidrográfica ubicada al norte de la Carretera Panamericana, registros necesarios para futuros estudios de demanda y disponibilidad del recurso agua en la zona.

Los únicos datos existentes son señalados por el M.O.P (1.973), estimándose para los ríos Caús y La Vichú los siguientes gastos, medidos a la altura de la carretera panamericana, Tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Gasto medio para los ríos Caús y la Vichu.

Río	Gasto medio	Gasto pico 5 años retorno	Gasto pico 25 años retorno	Gasto pico 100 años retorno
La Vichú	0.825 m <sup>3</sup> /seg	150,88 m <sup>3</sup> / seg	262,4 m <sup>3</sup> / seg	426,39 m <sup>3</sup> / seg
Caús	2.317 m <sup>3</sup> /seg	201,18 m <sup>3</sup> / seg	505,4 m <sup>3</sup> / seg	821,34 m <sup>3</sup> / seg

FUENTE: M.O.P. 1973. Estudio Preliminar de la Problemática de Inundaciones en las Cuencas Situadas entre los Ríos Chama y Motatán.

**Disponibilidad de Aguas Subterráneas.** En general los cursos superficiales no proveen suficiente agua para riego, presentándose los mayores déficits hacia el extremo meridional del área de estudio. Una alternativa la constituye la existencia de pozos subterráneos que en la actualidad son utilizados por la población tanto para uso doméstico como para riego.

Los estudios existentes señalan la presencia de pozos saltantes ubicados entre los ríos Caús y Buena Vista y hacia las inmediaciones del Canal de La Vichú, así mismo en zonas aledañas a la localidad denominada 3 de Febrero; se ubicaron pozos con altos rendimientos “manteniéndose el nivel piezométrico entre 2 y 7 metros de profundidad. A partir de este asentamiento, la franja costera tiene permeabilidades menores, donde a pesar de que el nivel piezométrico se mantiene positivo, los pozos profundos dan poco rendimiento” CORPOANDES – ILPES (1.971).

Se hacen necesarios sin embargo, estudios hidrogeológicos detallados que abarquen la totalidad del área de estudio y que den cuenta del potencial de aguas subterráneas así como de su calidad para riego.

### 3.1.9. Vegetación

En la comprensión de la dinámica de los procesos erosivos resulta importante conocer las características de la cobertura vegetal existente. Esta última protege al suelo de los procesos erosivos y es factor de peso en su formación.

El área de estudio, se encontraba cubierta de amplias zonas boscosas, fue sometida a un fuerte proceso de deforestación a raíz de la construcción de la carretera panamericana en la década de los 50. Estos bosques fueron sustituidos por extensos pastizales dedicados a la actividad agropecuaria y actualmente solo pueden localizarse dentro del área en estrechas franjas cercanas a la costa lacustrina.

Según el mapa de vegetación obtenido a partir del Estudio de Vegetación de La Cuenca del río Motatán y Sistema Fluvial La Vichú, (1.994), elaborado por la Empresa Regional S.H.T. aparecen señaladas las siguientes formaciones vegetales.

- ***Formaciones Arbóreas***

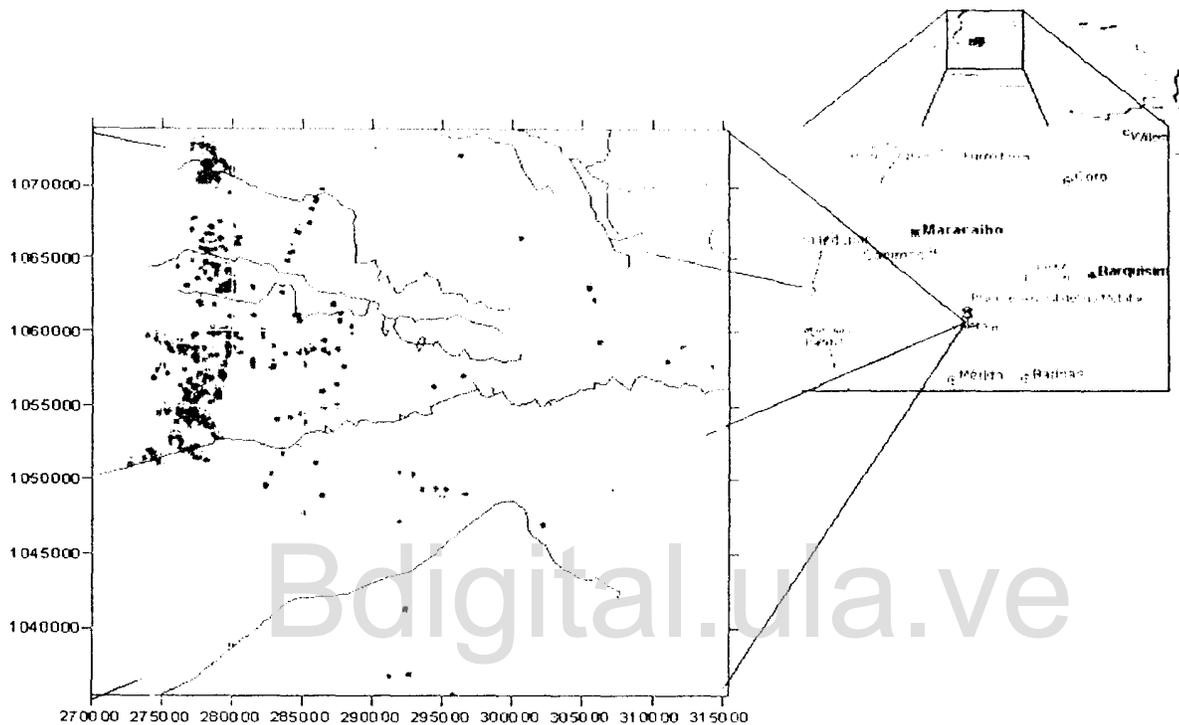
Bosque medio, ralo: Esta formación boscosa constituye por sus características, la más importante comunidad vegetal existente en el área. Aparece localizada ocupando pequeños sectores sobre la margen cenagosa inmediata al litoral lacustrino. Un sector hacia el extremo nor-occidental, al sur del Caño Carrillo y otro sector ubicado en una franja estrecha que se extiende desde las inmediaciones de La Ceiba hasta el extremo limítrofe sur - occidental del Municipio. Entre las especies vegetales destacan *Acacia* sp., *Ceiba Pentrandia*, *Machaerium Latialatum*, *Guazuma Ulmifolia*, *Roystonea Regia*.

Actualmente estas comunidades presentan un alto índice de intervención antrópica que pone en peligro la riqueza presente en estos bosques, su diversidad biológica y el hábitat natural de las pocas especies existentes de fauna silvestre.

- ***Formaciones Arbustivas***

Las comunidades arbustivas están representadas por el tipo "matorral" que ofrece menor protección al suelo y son producto de las reiterativas intervenciones antrópicas efectuadas en perjuicio de las comunidades boscosas existentes en el área y que "inician un período de recuperación; esperándose que logren desde el punto de vista ambiental la reconstrucción arquitectural del bosque inicial (primario)". Aparecen ubicadas en una pequeña extensión al sur de La Ceiba, haciendo contacto con un sector de la comunidad boscosa antes descrita.

A continuación, en la Figura 3.1, se muestra el mapa de ubicación geográfica de la zona en estudio.



**Figura 3.1.** Ubicación geográfica de la zona en estudio.

### **3.2. RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN BÁSICA EXISTENTE**

La información básica utilizada para el desarrollo del presente trabajo de investigación fue facilitada por la empresa regional Sistema Hidráulico Trujillano. La misma contiene el inventario de pozos realizado por la empresa en los años 1993-1994, el cual es de un total de 1296 pozos; pruebas de bombeo de 3 pozos; realizadas por el S.H.T y 5 pruebas hechas por CORPOANDES y procesadas por Rodríguez (1986), niveles piezométricos correspondientes a 103 pozos con registros históricos desde julio de 1993 hasta julio de 1999; perfil litológico de 316 pozos construidos, datos de construcción de 435 pozos, abatimiento de 186 pozos y cota de terreno correspondientes a 142 pozos.

Es de destacar que la información cartográfica disponible en cartografía nacional existe a una escala de 1: 25000 con curvas de nivel a equidistancia de 20 m, la cual no es conveniente utilizar ya que la planicie tiene una pendiente promedio muy baja ( $\leq 2\%$ ).

### 3.2.1 Variables utilizadas

- ***Identificación de pozos***

El SHT para la identificación de cada pozo utilizó un código compuesto de diez dígitos en el que los dos primeros representan el estado donde se encuentran ubicados (TR = Trujillo, ZU = Zulia); los cuatro siguientes son números arábigos que identifican a la sección extensa; la planicie fue dividida en once secciones extensas de aproximadamente 300 km<sup>2</sup> de superficie; luego tres números arábigos que representan el número del pozo dentro de la sección extensa y el último dígito es una letra que representa la condición de funcionamiento del pozo; por ejemplo:

TR5878004A: Corresponde a un pozo ubicado en el estado Trujillo dentro de la sección extensa 5878, identificado con el número cuatro y en funcionamiento para el momento del inventario.

- ***Coordenadas UTM***

La ubicación aportada de cada pozo estaba en coordenadas geográficas. Los diferentes programas a utilizarse en lo sucesivo requieren de coordenadas cartesianas (norte-este), las mismas fueron transformadas utilizando el programa TCOR7, tomado del banco de programas del CIDIAT.

- ***Cota de terreno***

Motivado a que la topografía disponible en cartografía nacional no es la más acorde al caso (curvas de nivel cada 20 m) y ante la dificultad de campo por lo extenso del área en estudio y la poca precisión del GPS en la estimación de las cotas de terreno donde se ubican los pozos, se hizo necesaria la búsqueda de otra alternativa para generar las mismas de aquellos pozos que no la poseían, la mayoría de los pozos ubicados en la planicie.

La unidad de sistema de información geográfica (sig) adscrita al SHT, facilitó el plano de puntos con sus coordenadas de terreno con lo que se procedió a realizar un plano digital de la planicie, generando curvas de nivel cada 5 m. A su vez también se digitalizó parte del borde sureste del Lago de Maracaibo, la carretera panamericana, el río Pocó, que constituyen los límites

Este, Oeste y Sur del área en estudio; así como las principales vías internas y los drenajes naturales mas importantes de la zona, este se muestra en formato electrónico en Anexo III.

Dicho plano se uso en el paquete Surfer 7.0 para generar las cotas de terreno con mayor confiabilidad, partiendo de un archivo de datos ASCII que contenía las variables identificación y coordenadas UTM de cada pozo, determinando las cotas a partir del criterio residual, parte del menú Map. del mencionado paquete.

- ***Nivel piezométrico***

El SHT a mediados del año 1993, instala una red de observación con el objeto de llevar un control mensual de la variación de los niveles de agua en el acuífero, la misma se estabilizó a finales del año 1994, tomando registros hasta julio del 1999; a estos pozos se les calculó el nivel piezométrico de la siguiente manera:

$$NP = CT - H \quad (3.1)$$

Donde:

*NP*: nivel piezométrico.

*CT*: cota de terreno.

*H*: distancia vertical medida desde la superficie del terreno hasta el nivel del agua.

- ***Niveles***

En base al mes de inicio que permitiera aprovechar al máximo el período de registro continuo, se seleccionó el 10/94 suficiente para elaborar el archivo de niveles más representativo de la planicie el cual será usado como dato que permita estudiar el comportamiento de los mismos cuando se dan variaciones en el espesor de las capas. El archivo se muestra en el Anexo III.

- ***Litología***

Según los registros litológicos suministrados por el SHT, 348 pozos poseían información

sobre su perfil. De este universo de datos se comienza la depuración de los mismos buscando obtener la mayor consistencia entre ellos.

Como primer criterio para comenzar la depuración se usó la similitud del perfil, como era de esperarse pozos cercanos debían poseer perfiles similares, entonces se optó por tomar aquel que fuese más representativo, tomando en cuenta básicamente la profundidad de perforación.

Para ello se introdujeron todos los perfiles en el paquete GWW, luego se imprimieron para facilitar la comparación, ya que previo a esto se habían ploteado los pozos con sus coordenadas UTM. Archivo en Anexo 1. De este primer descarte, del total de pozos quedaron 100 pozos, los cuales constituyen una buena cantidad para elaborar la representación litológica de las diferentes capas que constituyen el acuífero. Esta preselección no es la definitiva.

Para determinar si existía correlación entre las diferentes capas se procedió a plotear los pozos en una hoja de 1.5 x 1.5 m a escala 1: 25000, la cual se elaboró con un montaje de hojas impresas en el programa SURFER 7.0. este archivo se muestra en el Anexo III como litosurfer.

Sobre este plano se hizo una representación tridimensional del acuífero, determinando la correcta coincidencia entre las diferentes capas. Quince pozos más fueron descartados por diversas causas, entre ellas: muy cercano a un perfil similar, por no existir correlación en las capas con ninguno de los pozos a su alrededor, profundidad de perforación pequeña, en sus datos de construcción no menciona posición del filtro lo cual es un dato importante para la aplicación del modelo y posterior simulación del acuífero. Es decir, en definitiva del universo de pozos con información litológica, ochenta y cinco pozos muestran consistencia en la conformación de capas del acuífero; estos archivos se muestran en Anexo III, como litocidéf. GWW.

A continuación, en la Figura 3.2 se representa gráficamente con el programa GWW el perfil de tres pozos del universo graficado que permite buscar la mayor consistencia en la información de campo.

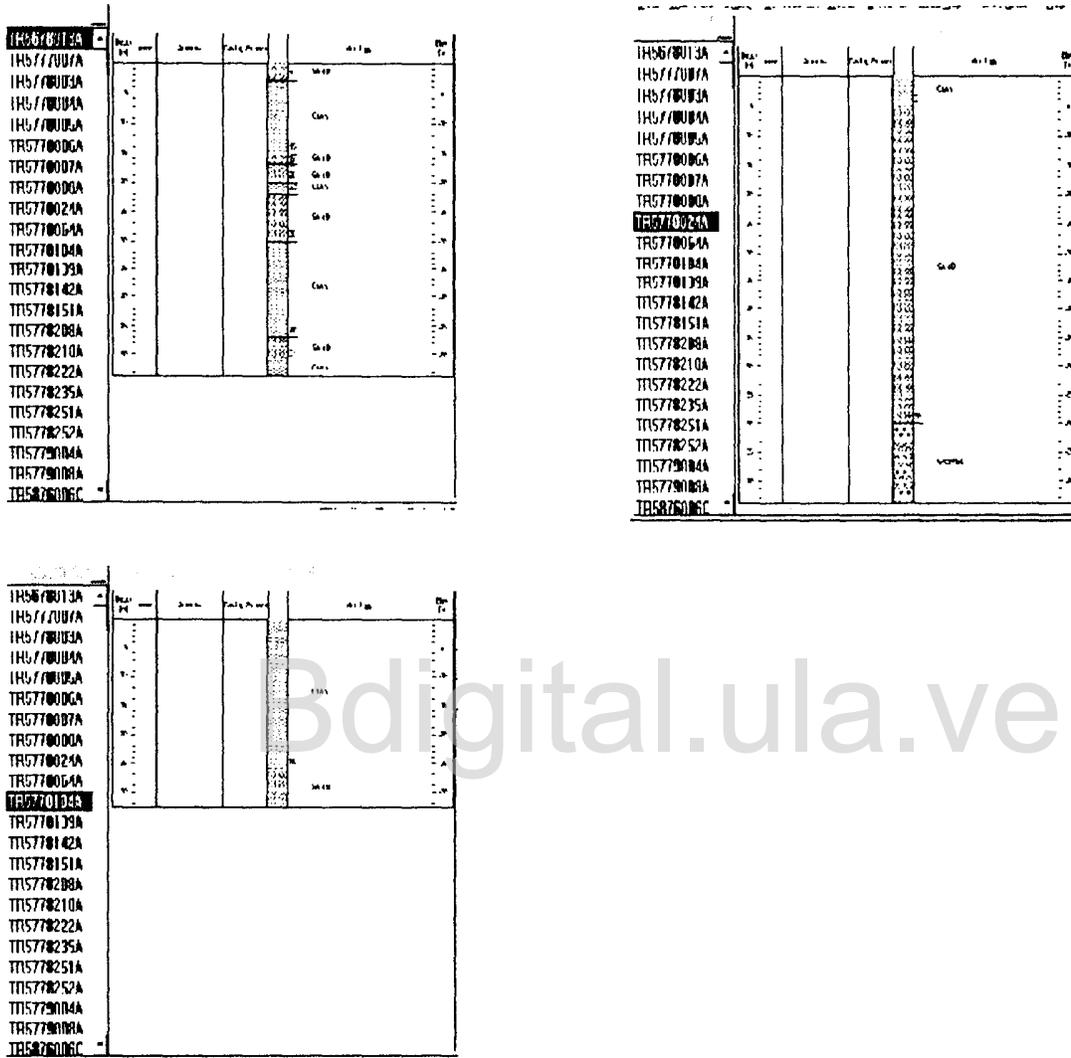
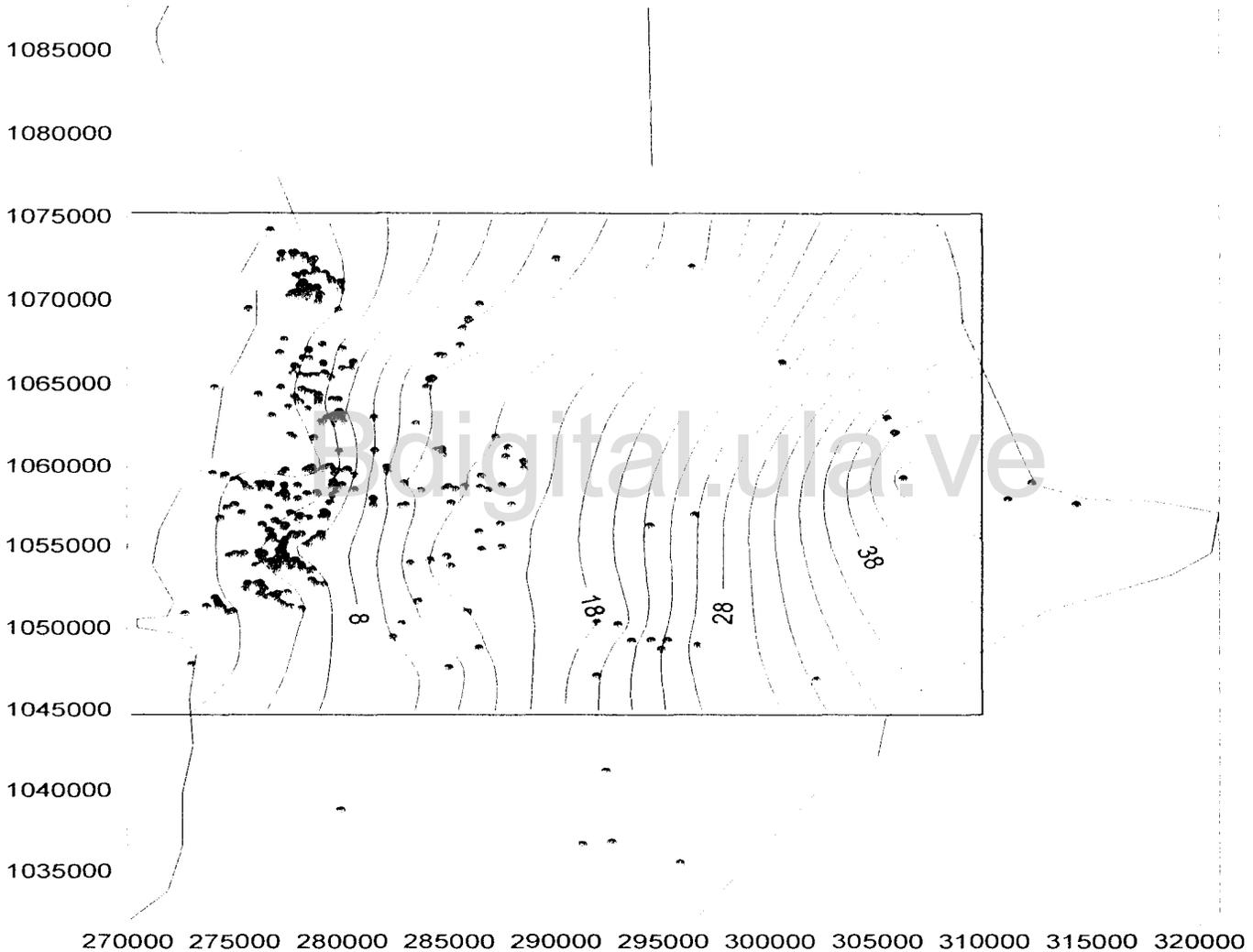


Figura 3.2 Perfiles de pozos construidos con el programa GWW.

Al observar la correlación definitiva de las capas se encontró que la profundidad más representativa era de 110 m; para dicha profundidad quedaba perfectamente definido un acuífero confinado estratificado en diez capas, alternándose entre impermeables y permeables con espesores variables que para efectos de la simulación condiciona el espesor de la capa en cada pozo.

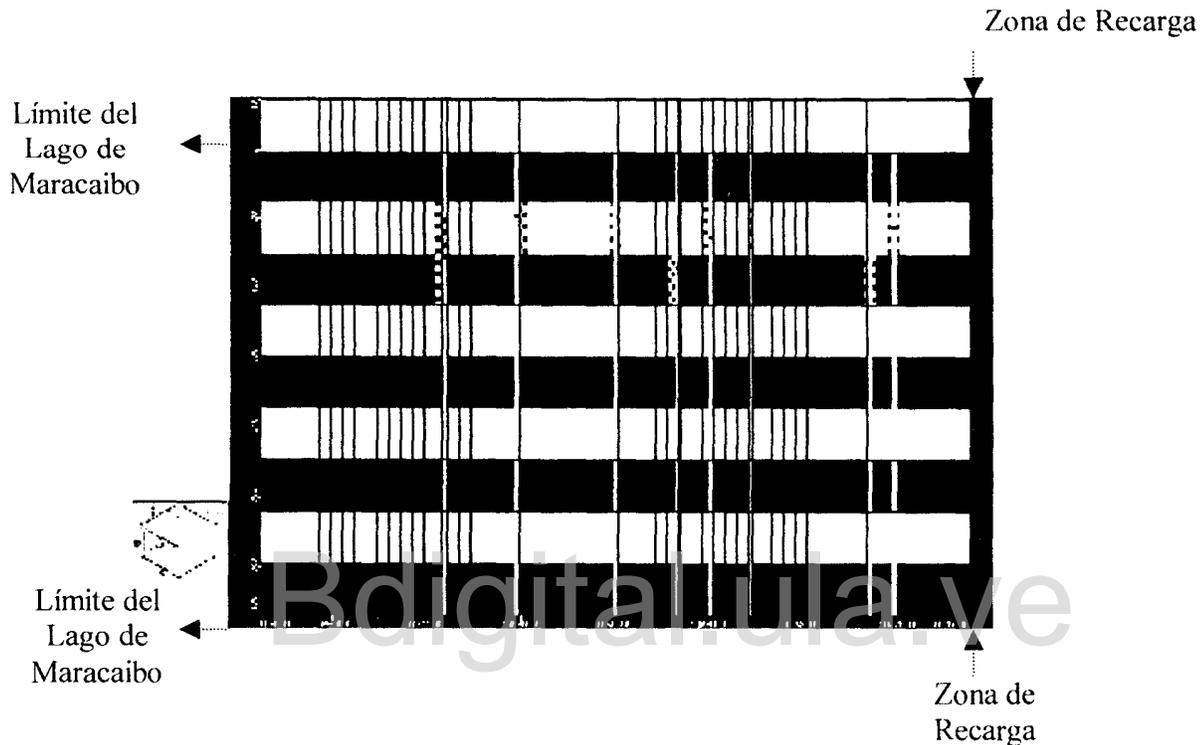
En función del análisis anterior se muestra en la Figura 3.4. el universo de pozos y el área total del acuífero, sobre la cual se demarca, con un rectángulo definido por las coordenadas 270000 a 310000m y 1045000 a 1075000m, el área definitiva seleccionada con la mayor información consistente relacionada con la litología en el acuífero: en base a la cual se construyen las mallas para el krigiado.



**Figura 3.3.** Área definitiva seleccionada del acuífero con la mayor información se muestra a curvas de nivel en el recuadro.

En la Figura 3.5 se muestra la definición adoptada según el análisis anterior de la estructura del acuífero en estudio, conformado por diez capas alternadas entre impermeable y permeable. La

cual fue elaborada con el programa MODFLOW. Sobre esta base se importan las capas simuladas que representan las posibles estructuras en las cuales se puede observar la variación de los espesores en cada capa.



**Figura 3.4.** Estructura adoptada de diez capas para el acuífero en estudio.

En la figura anterior se discretiza el acuífero estratificado dando a la primera capa impermeable el color blanco alternándose con capas permeables de color azul. Sobre esta base se importaran las capas simuladas.

Para la determinación de las cotas de fondo de cada capa simulada a importar, se tomaron en cuenta los diferentes espesores simulados condicionalmente.

Estos espesores simulados fueron condicionados por los espesores que se tenían como dato en los detalles de construcción de cada pozo.

Las cotas de fondo de la primera capa se determinan restando a la superficie de terreno el espesor de ésta en cada punto, las cotas de fondo para el resto de las capas se calcula de la misma forma, es decir, cota de fondo de la capa superior menos el espesor simulado de la capa considerada. Estos se muestran en el AnexoIII.

Los espesores observados de cada capa se evalúan con el modelo GEOEAS para determinar su correspondencia a una distribución normal.

Con esta evaluación se determina cuáles datos no siguen una distribución normal para proceder a transformar la variable y tratar de conseguir una distribución log-normal para cada una de las diez capas que forman el acuífero confinado estratificado, para la correcta aplicación de los métodos geoestadísticos.

- ***Coficiente de almacenamiento***

De las pruebas de bombeo realizadas por la unidad de hidrología del SHT, en los pozos mencionados anteriormente y procesadas en el paquete GWW se obtuvieron los valores promedio de dicho parámetro; se usaron también los valores generados por Rodríguez en 1986 cuando procesó pruebas de bombeo realizadas por Corpoandes. En vista de que solo se contaba con ocho valores del parámetro muy localizados en un área muy pequeña, que no era representativa del área de estudio y que el programa MODFLOW solo exige como dato de entrada un valor de coeficiente de almacenamiento, se tomó un valor promedio para el acuífero confinado de  $S= 10^{-4}$ .

- ***Caudal de Bombeo***

Los volúmenes de agua por unidad de tiempo que el pozo está descargando por bombeo se obtuvieron de los registros de la base de datos del SHT, los cuales fueron producto de aforos puntuales realizados en el momento en que se hizo el inventario de pozos de agua subterránea en la planicie en 1994 usando los métodos volumétricos y el de la trayectoria según el caso. Además se tomaron los tres valores usados en la prueba de bombeo y los cinco valores procesados por Rodríguez en 1996.

Los valores utilizados se muestran en el Anexo 1 como  $nacuifero.vmf$ ,  $n=$  número del acuífero.

- ***Recarga del acuífero***

El acuífero en estudio según la litología quedó definido como confinado estratificado, en tales condiciones solo puede recargarse por aportes de flujo subterráneo. Para el presente caso la principal fuente de agua que aporta al acuífero es el río Motatán, cuyos registros de escorrentía se miden en una estación ubicada a la altura del embalse Agua Viva justo antes del acuífero en estudio.

Para conocer el flujo subterráneo effluente, según Mejías; (2002) se utilizó el modelo de Simulación Hidrológica Mensual SIHIM elaborado por Duque en 1985 y modificado por Mora en el 2000.

Mejías realizó la calibración en el 2001 trabajando con 18 estaciones meteorológicas representativas de toda la cuenca, con registros mensuales para un periodo de 16 años entre 1955 a 1970, del cual se obtuvo un valor de recarga de  $3.08 \text{ m}^3/\text{s}$  lo que representa el 8.2 % del promedio anual de escorrentía del río el cual es de  $38 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### **3.2.2. Prueba de hipótesis de normalidad**

De las pruebas de distribuciones probabilísticas la que mejor adaptación tiene en el estudio de los fenómenos aleatorios, es la prueba de distribución normal. Además la gran mayoría de los parámetros hidrogeológicos tienden a una distribución logarítmica normal, con lo que se consigue un ajuste a una distribución normal de los datos.

Para calcular las cotas de fondo de cada capa como se explicó en la parte de litología, se aplicó el criterio, señalado anteriormente a los espesores observados de cada capa y bajo esta condición se utilizó para el ajuste de estos datos el programa GEOEAS.

A continuación se muestra la aplicación de este programa para el espesor de la primera capa. En las Figuras 3.a y 3.b se muestra el gráfico de distribución de probabilidades correspondiente a los espesores de las capas uno, en su valor natural y afectados por logaritmo respectivamente. Los demás gráficos se muestran en el Anexo I.

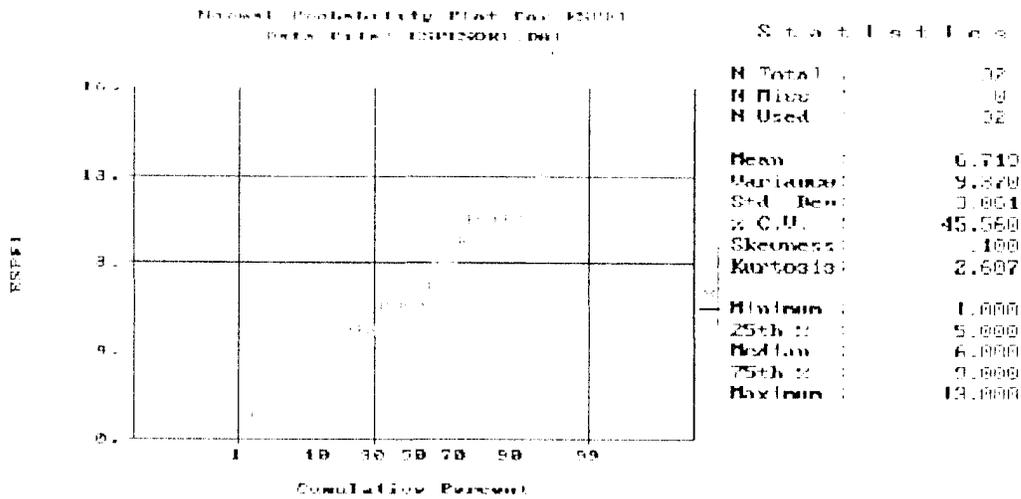


Figura 3.5a Distribución de probabilidades de los datos de espesores correspondientes a la primera capa.

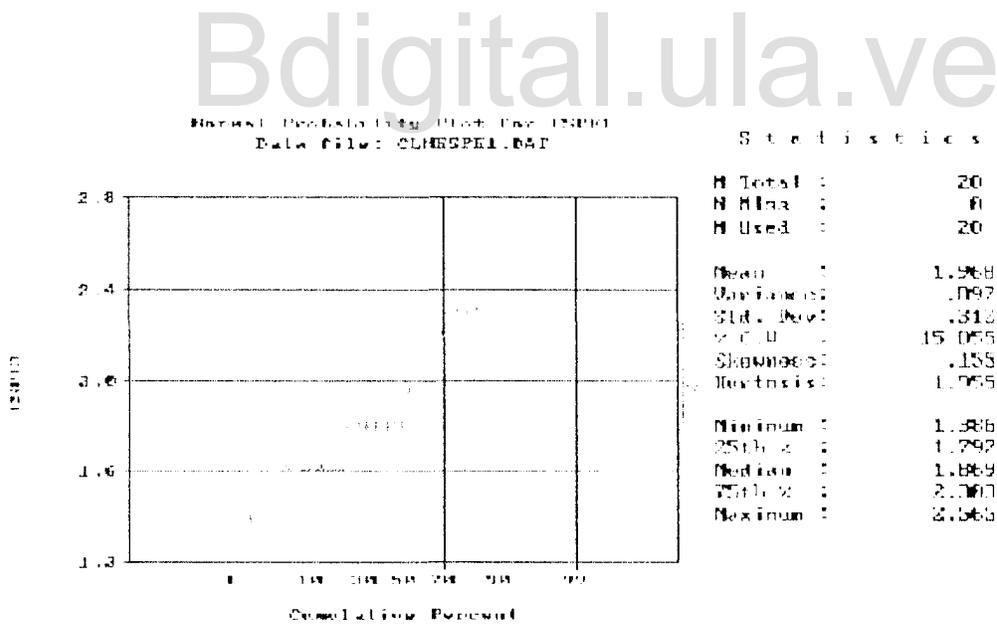


Figura 3.5b Distribución de probabilidades de los datos de espesores afectados por logaritmo correspondientes a la primera capa.

- **Análisis geoestadísticos**

**Análisis estructural.** El variograma experimental se estima en base a los datos y a la estructura del fenómeno, este variograma calculado en la práctica se le ajusta un variograma teórico como lo descrito en el capítulo 2, el cual se emplean frecuentemente para representar Variogramas reales.

**Estimación de los parámetros del variograma por capa.** Para esto se elaboró un archivo en Excel cuyas columnas de datos están dadas por las coordenadas x, coordenadas y, cota y la identificación del pozo.

Usando el programa SURFER 7 se procedió a elaborar el variograma experimental al cual luego se le ajusta un modelo teórico para la determinación de sus parámetros, esto se realiza para los espesores de cada capa como para la superficie del terreno.

El modelo utilizado permite la escogencia para el ajuste entre los distintos tipos de modelos teóricos más usados en el análisis geoestadístico de parámetros hidrogeológicos, con lo que se pudo determinar que el modelo teórico que mejor define los parámetros del variograma para los datos aquí analizados es el variograma esférico.

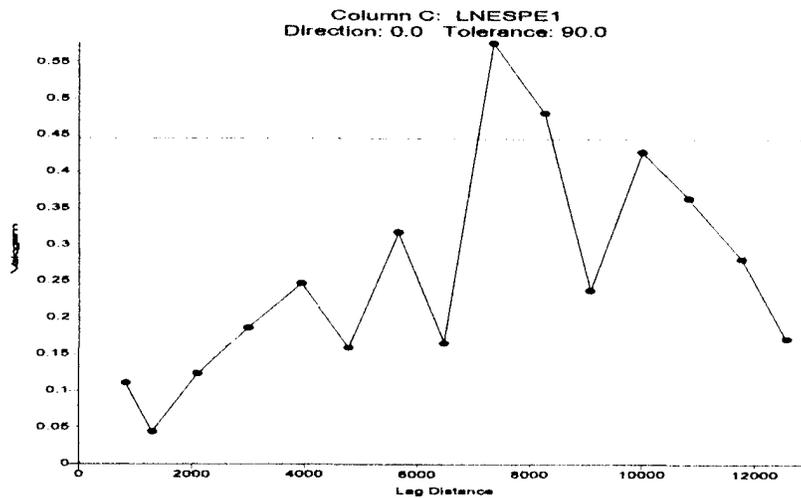
En la Figura 3.6, se muestra el variograma experimental correspondiente a los datos de espesor de la primera capa, a los cuales fue necesario transformar por logaritmo para ajustarlos a una distribución log-normal; a este variograma se le ajusta un modelo teórico esférico con el cual se consiguió optimizar los valores del alcance, meseta y de efecto pepita, valores que serán utilizados en el modelo SASIM para los efectos de la simulación condicional posteriormente.

Los valores optimizados para esta capa según el variograma de la Figura 3.7, son:

Alcance = 10 000m

Meseta = 0.42

Efecto pepita = 0



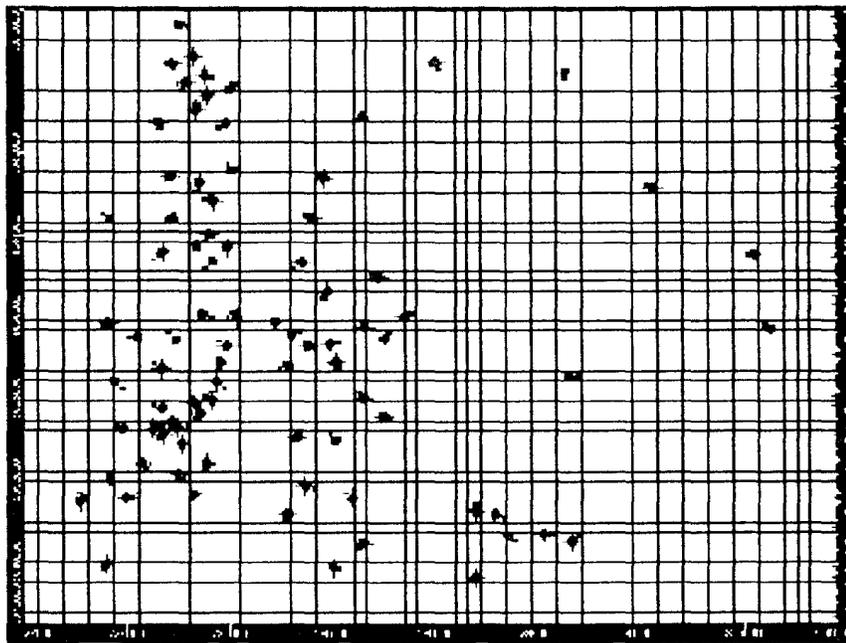
**Figura 3.6** Variograma experimental del logaritmo de los espesores de la capa uno ajustado a un modelo esférico.

**Simulación condicional por capa.** Mediante el método geostatístico de simulación condicional, se puede generar un número arbitrario de realizaciones que son estadísticamente indistinguibles del campo aleatorio real subyacente y constituyen, por tanto, representaciones igualmente verosímiles de la variable estudiada.

El objetivo de usar simulación condicional es el de determinar los posibles comportamientos de una variable aleatoria en función de los datos observados de un fenómeno en particular.

El programa utilizado para este caso es el SASIM el cual sólo genera simulaciones condicionadas, es una sub rutina del Programa WinGsLib que a su vez es una interfase del Programa GSLib.

WinGsLib permite importar y exportar archivos de parámetros y desarrollar simulaciones condicionadas de variables continuas a través de la sub rutina SASIM, condicionando en función de la entrada de datos estadísticos considerando el Histograma, Variogramas, Coeficientes de Correlación de la variable. El método empleado para la simulación condicionada en el SASIM es el método matricial que genera variables aleatorias cuya matriz de covarianza coincide con la obtenida por el Krigeado. Para este trabajo se desarrolló una malla de 65 columnas por 61 filas, como la que se muestra en la Figura 3.7.



**Figura 3.7** Malla elaborada con 65 columnas y 61 filas para el área en estudio.

Se aplicó el modelo SASIM realizando cincuenta simulaciones por espesor de cada capa, obteniendo así el archivo de datos de espesores simulados que se usará para calcular las cotas de fondo de cada capa.

De las cincuenta simulaciones realizadas condicionalmente para los espesores de cada una de las diez capas, se seleccionan diez simulaciones en cada capa y se calculan las cotas de fondo a cada una usando el programa SURFER 7, como se indica en el punto 3.2.1 relacionado con litología.

Al seleccionar diez simulaciones por capa se pueden construir diez posibles formaciones geológicas del acuífero en estudio.

Para la construcción de cada una de estas diez formaciones acuíferas se procede desde el MODFLOW abriendo el archivo, (estructura adoptada de diez capas para el acuífero en estudio, Figura 3.2, donde se encuentra la estructura adoptada para este acuífero y se importan desde el programa SURFER 7 las cotas de fondo calculadas, hasta construir las diez formaciones geológicas posibles del acuífero.

### 3.2.3. Representación tridimensional del acuífero.

- *Definición del modelo de un acuífero*

Se entiende por modelo de un acuífero, el proceso de evolución y producción, en el cual está integrada toda la información relacionada con el sistema de agua subterránea de la zona o área en estudio, en la cual se investiga o se chequea las proposiciones postuladas a través de la explotación, cuantifica varios parámetros y procesos futuros modificando las condiciones iniciales de recarga y descarga.

Se debe tener en cuenta que el modelaje de agua subterránea es una metodología para el análisis de ciertos mecanismos y controles del sistema de agua subterráneo y para la evaluación, acción y diseño que pueden afectar al sistema como tal.

Información necesaria para construir un modelo de un acuífero:

- Poseer un conocimiento básico de la hidrología del área.
- Determinar los parámetros básicos hidrogeológicos: porosidad efectiva, Transmisividad, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento.
- Conocer la evolución histórica de los niveles de agua.
- Ubicar los pozos y sus volúmenes de bombeo.
- Conocer las condiciones de frontera, parámetros de entrada de hidrológica, y flujo de ríos y fronteras hidráulicas.

Existen varias técnicas para encontrar una solución al problema del movimiento del agua dentro del acuífero. Los modelos existentes difieren básicamente en la forma de describir el sistema y en la forma de resolver la ecuación diferencial que representa el sistema (Custodio y Llamas, 1996).

**Proceso de modelación.** Los modelos son la simplificación de una realidad que solo se conoce puntualmente a través de un número limitado de datos. La validez de esta simplificación depende del objetivo que se pretenda conocer con el modelo.

La primera fase consiste en compilar toda la información geológica e hidrológica existente de la zona. La información que no existe debe ser generada, ya que toda esa información compilada es usada para desarrollar el modelo conceptual del modelo real con todos sus componentes de entrada y salida.

A continuación se realiza una breve descripción del modelo Visual MODFLOW, el cual se utilizará para lograr la representación tridimensional de las capas del acuífero de la planicie aluvial del río Motatán.

Visual MODFLOW es una modelación tridimensional del flujo de agua subterránea y transporte de contaminantes. Permite al usuario asignar gráficamente parámetros de entrada, ejecutar la evaluación, calibrar el modelo y visualizar los resultados como en vista de planta ó en cortes transversal.

- *Características de este modelo.* Son las siguientes:

Mejora automáticamente la malla optimizando el espaciamiento

Permite importar elevaciones de capas variables, respetando las propiedades heterogéneas del suelo y las condiciones de borde complejas.

Delinea a colores los resultados de calibración y de modelación.

Da una visualización personalizada de los resultados de contornos, líneas de trayectorias y sobre posiciones.

Posee herramientas y estadísticas de calibración completas.

Realiza una integración total (Asigna los parámetros de entrada y ejecuta la simulación).

- *Información de entrada al modelo (datos necesarios).* En primer lugar se deben definir las unidades a utilizar en las variables. El sistema de unidades adoptado fue el internacional por lo que cada uno de los datos introducidos y los resultados obtenidos, se presentan bajo este sistema de unidades Tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Unidades utilizadas en la modelación

Variables	Unidades
Longitudes	m
Cotas	m.s.n.m.
Caudales	m <sup>3</sup> /d
Recarga	m <sup>3</sup> /d
Conductividad hidráulica	m/d
Tiempo	.d
Coefficiente de almacenamiento	Adimensional
Porosidad efectiva	Adimensional
Niveles estáticos	m.s.n.m.

Seguidamente se definen los límites referentes al área en estudio:

- Se define la malla, esta información consiste en: número de columnas ( $X_{min}$ ,  $X_{max}$ ), número de filas ( $Y_{min}$ ,  $Y_{max}$ ), número de capas ( $z$ ), para de esta manera tener las celdas activas.
- Permeabilidad y porosidad de cada capa.
- Coeficiente de almacenamiento.
- Cota máxima y mínima.

Para la implementación de este programa se tomó como datos el coeficiente de permeabilidad "K", la porosidad "n" para cada capa considerando un valor promedio para la condición del tipo de material, como se indica en Tabla 3.3.

**Tabla 3.3.** Rango de valores de permeabilidad, permeabilidad promedio y de porosidad según el material.

Tipo de material	Permeabilidad K en m/d	Permeabilidad promedio en m/d	Porosidad n
Arena	$5 < K < 10$	8	0.25
Arcilla	$10^{-6} < K < 10^{-4}$	$10^{-5}$	0.10

Para el coeficiente de almacenamiento se tomó un valor promedio de  $S = 10^{-4}$  como se dijo en el capítulo 2.

También se introdujeron como datos las coordenadas, el caudal de bombeo y la ubicación de rejillas según sus cotas, para cada pozo.

La recarga de  $3.08 \text{ m}^3/\text{s}$  calculada por Mejías, se introdujo al MODFLOW repartida en 65 pozos, correspondiendo a cada pozo un valor  $4094.03 \text{ m}^3/\text{d}$ . con un lapso de cinco años para la recarga del acuífero para el tiempo de bombeo de cada pozo; también se le da la información que se está considerando el nivel constante del lago de Maracaibo.

A continuación se procede a importar las cotas de fondo de cada capa para entrar al programa VISUAL MODFLOW el cual permite hacer una representación bidimensional del acuífero detallando cada una de las diez capas que lo forman.

### **3.2.4 Evaluación del comportamiento del nivel freático**

Preparado el archivo de datos de niveles estáticos para el mes de mayor registro de lectura (10/94), se hace la corrida del programa MODFLOW una vez introducido los datos de las cotas de fondo y las características hidrogeológicas para cada capa que conforman cada simulación.

Cada una de estas corridas se aplicaron tomando en cuenta el mismo archivo de datos de niveles para realizar la evaluación al acuífero que permitan observar el comportamiento del mismo, por cada capa de cada acuífero, a través de los planos de equipotenciales que se generan en cada corrida.

Bdigital.ula.ve

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos una vez realizada la investigación, los cuales se dan según un análisis geoestadístico.

#### 4.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS GEOESTADÍSTICOS

Dentro del análisis geoestadístico se muestran los resultados correspondientes al análisis estructural de la variable así como también los referentes a la simulación condicional de los espesores por capa.

##### 4.1.1. Análisis estructural.

- *Parámetros del variograma que definen el modelo*

En las Figuras 4.1 y 4.2 se muestran los Variogramas de terreno y de espesores de la primera capa ajustados a un modelo teórico.

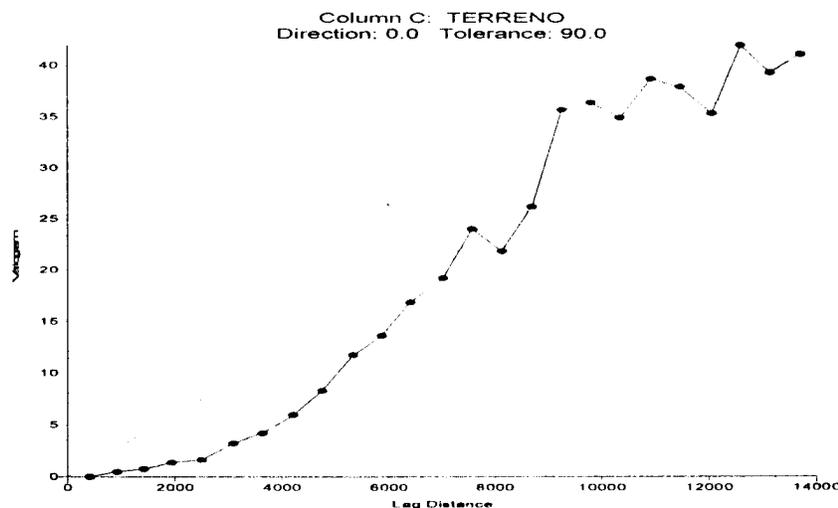


Figura 4.1. Variograma experimental de cotas de terreno ajustado a un modelo teórico lineal.

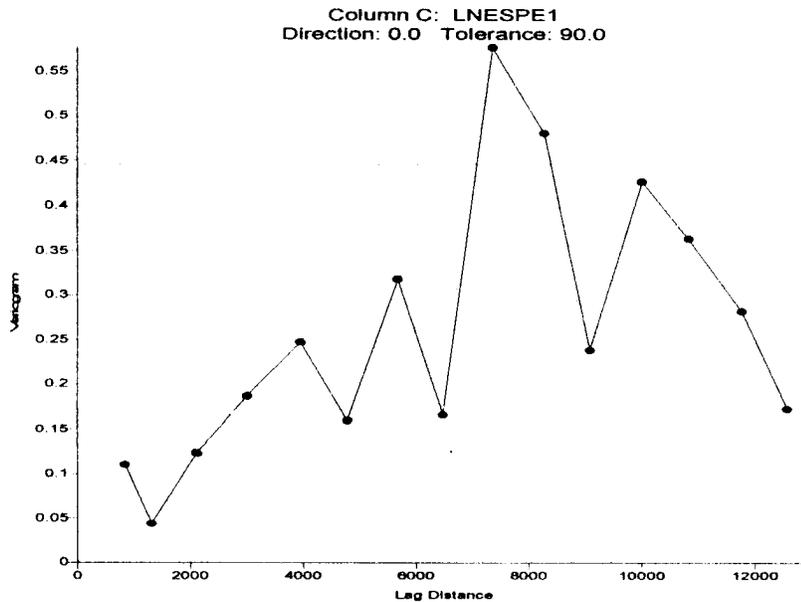


Figura 4.2. Variograma experimental de espesor de la capa uno ajustado a un modelo teórico esférico.

Tabla 4.1 Características de los variogramas teóricos ajustados de terreno y del espesor de la capa uno.

Variable	Meseta	alcance	Efecto pepita	Modelo ajustado
Cotas de terreno	No presenta	No presenta	0	Lineal
Cotas de fondo capa uno	0.42	10000	0	Esférico

El variograma experimental construido para la superficie del terreno muestra una representación suave de la variable donde se observa la tendencia hacia el infinito, es decir, no muestra la presencia de meseta o de estabilización por lo que se ajusta a un modelo teórico lineal con una pendiente del 0.003.

Para el variograma experimental correspondiente a los espesores de la primera capa representado en la Figura 4.2 se observan fluctuaciones de pequeña amplitud pero de gran frecuencia como de amplitud grande y frecuencia baja; es de hacer notar que amplitudes grandes definen una forma de estabilización de la variable la cual se encuentra para una distancia finita donde se observa que a partir de ésta se producen fluctuaciones de menor amplitud y períodos en

todas las escalas.

Estas características observadas permiten ajustarle un variograma teórico esférico para el cual se determinó la meseta, el alcance y el efecto pepita, como se indico en la Tabla 4.1

Para las nueve capas restantes se ajustó un modelo teórico esférico como se muestran en el Simul 1.

**Simulación condicional por capa.** La Tabla 4.2 muestra las simulaciones que fueron seleccionadas aleatoriamente por capa de las cincuenta realizadas a cada una para construir las diez formaciones acuíferas posibles.

**Tabla 4.2** Número de simulaciones tomadas aleatoriamente por capa para cada acuífero.

Espesor	Simul 1	Simul 2	Simul 3	Simul 4	Simul 5	Simul 6	Simul 7	Simul 8	Simul 9	Simul 10
Capa 1	1	34	2	7	26	45	19	4	20	5
Capa 2	46	18	48	41	25	16	8	22	9	10
Capa 3	29	26	11	8	28	34	36	6	14	13
Capa 4	43	40	8	46	38	29	41	6	2	12
Capa 5	46	22	28	5	36	11	35	43	8	15
Capa 6	22	30	50	8	47	27	25	6	21	42
Capa 7	48	15	18	7	23	42	27	9	21	10
Capa 8	41	22	29	20	24	4	7	1	13	15
Capa 9	33	26	20	39	14	5	45	31	40	25
Capa 10	50	33	18	9	30	11	47	27	31	42

Para comparar resultados, se toman dos capas cualesquiera, por ejemplo la capa cuatro y la capa nueve de cada uno de los diez acuíferos construido.

Para el análisis de estos resultados, se convierte la variable, (espesores simulados de la capa cuatro, para cada acuífero), en su valor natural aplicando antilogaritmo.

De esta manera se presenta a continuación, en la tabla 4.3a y 4.3b, los valores estadísticos más representativos de la capa cuatro.

Las Tablas 4.3 a y 4.3 b representan espesores simulados en logaritmo y transformados en su valor natural respectivamente. Corresponden a la simulación número 43 de la capa cuatro, para el primer acuífero. Estas tablas se presentan con el fin de indicar la transformación a realizar.

**Tabla 4.3 a** Espesores simulados en log.

Estadísticos	Simulados
Number of values	3965
Minimum	1.796532
Maximum	3.806609
Mean	3.0065576
Median	2.996383
Variance	0.20863806
Standard deviation	0.45676916

**Tabla 4.3 b** Espesores simulados naturales

Estadísticos	Simulados
Number of values	3965
Mínimum.	6.02
Maximum.	44.99
Mean	22.35
Median	20.01
Variance	98.58
Standard deviation	9.928

En la Tabla 4.4 Se muestran los estadísticos de los espesores observados de la capa cuatro para contrastar éstos con los valores de la simulación 43 presentados en la tabla anterior.

**Tabla 4.4** Estadísticos de los espesores observados para la capa cuatro

Estadísticos	Datos observados
Number of values	36
Minimum	6
Maximum	45
Mean	20.9
Median	17.5
Variance	125
Standard deviation	11.2

De la Tabla 4.2 se toman las simulaciones número: 43-40-8-46-38-29-41-6-2-12 y 33-26-20-39-14-5-45-31-40-25 que representan la variación de los espesores de la capa cuatro y nueve respectivamente, en cada acuífero .

Las Tablas 4.5 a y 4.5 b muestran los estadísticos calculados para cada acuífero en la capa cuatro y nueve permitiendo establecer comparaciones entre estos valores simulados y los espesores observados.

**Tabla 4.5a.** Comparación entre los espesores observados para la capa cuatro y los espesores simulados para la misma capa en cada acuífero.

Estadísticos	Datos capa 4	Simul 1	Simul 2	Simul 3	Simul 4	Simul 5
Numero de valores	36	3965	3965	3965	3965	3965
Mínimo	6	6.02	6.01	6.02	6.07	6.01
Máximo	45	44.99	44.99	44.99	44.99	44.99
Media	20.9	22.35	22.73	22.53	22.41	22.67
Mediana	17.5	20.01	20.53	20.16	20.21	20.47
Varianza	125	98.58	98.88	99.19	95.94	96.41
Des. Est.	11.2	9.92	9.94	9.95	9.79	9.819

**Tabla 4.5a** Continuación

Estadísticos	Datos capa 4	Simul 6	Simul 7	Simul 8	Simul 9	Simul 10
Numero de valores	36	3965	3965	3965	3965	3965
Mínimo	6	6.07	6.05	6.01	6.04	6.00
Máximo	45	44.99	44.99	44.99	44.99	44.99
Media	20.9	22.43	22.73	22.69	22.76	22.75
Mediana	17.5	20.35	20.29	20.58	20.30	20.54
Varianza	125	95.29	99.88	93.50	102.27	96.43
Des. Est.	11.2	9.76	9.99	9.66	10.11	9.81

**Tabla 4.5b.** Comparación entre los espesores observados para la capa nueve y los espesores simulados para la misma capa en cada acuífero.

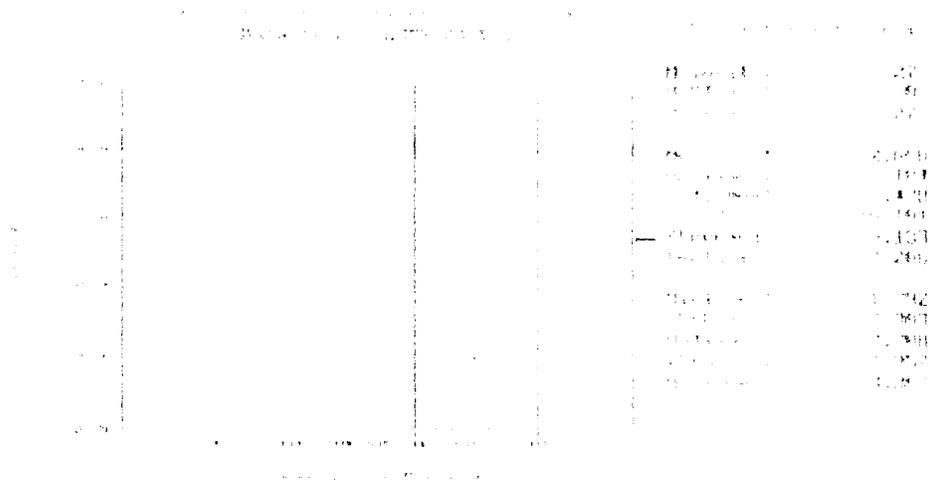
Estadísticos	Datos capa 9	Simul 1	Simul 2	Simul 3	Simul 4	Simul 5
Numero de valores	62	3965	3965	3965	3965	3965
Mínimo	3.00	3.04	3.00	3.01	3.08	3.034
Máximo	39.99	39.66	38.87	39.36	39.76	39.44
Media	13.20	14.42	14.29	14.50	14.71	14.49
Mediana	10.00	13.99	13.99	14.46	14.79	14.18
Varianza	50.72	34.49	33.38	32.81	35.42	35.24
Des. Est.	7.12	5.87	5.77	5.72	5.95	5.93

**Tabla 4.5b** Continuación.

Estadísticos	Datos capa 9	Simul 6	Simul 7	Simul 8	Simul 9	Simul 10
Numero de valores	62	3965	3965	3965	3965	3965
Mínimo	3.00	3.12	3.06	3.06	3.07	3.08
Máximo	39.99	39.83	39.59	39.75	39.68	39.56
Media	13.20	14.32	14.70	14.64	14.40	14.51
Mediana	10.00	13.99	14.91	13.99	14.18	13.99
Varianza	50.72	33.42	32.84	35.98	33.71	34.77
Des. Est.	7.12	5.781	5.731	5.99	5.80	5.89

A continuación se presentan las Figuras 4.3 y 4.4 correspondientes al análisis de distribución de probabilidades de las capas cuatro y nueve seleccionadas, donde se muestra la distribución de

probabilidades de los datos ajustados a una distribución log-normal.



**Figura 4.3** Distribución de probabilidades de los datos, capa cuatro.



**Figura 4.4** Distribución de probabilidades de los datos, capa nueve.

Realizadas las comparaciones entre los espesores observados de la capa cuatro y sus valores obtenidos de las simulaciones, se puede observar que la simulación produce un condicionamiento porque mantiene los valores mínimo y máximo del espesor observado.

Este condicionamiento permite construir representaciones de la conformación geológica del acuífero bastante aproximada a la realidad, según los datos de perforación.

Para comprobar aun más este condicionamiento, se chequea la media de los valores simulados para un intervalo de confianza del 95%.

- Capa cuatro: Esta capa tiene un valor mínimo y máximo simulado:

$$\bar{X} = 22.35m \text{ a } 22.75m$$

En la capa cuatro; para  $\alpha = 0,05$ , se tiene:

para  $\alpha = 0.05$

$$T_{1-\alpha/2} = 1.96$$

$$S_{(\alpha)} = 11.2$$

$$N = 36$$

Resolviendo el intervalo de confianza para el 95%, se tiene que el valor simulado para la media debe estar en un rango de 17.24m a 24.56m.

Se puede observar que los valores simulados para la media en la capa cuatro son valores que entran en el intervalo de confianza para un 95% de aceptación.

- Capa nueve: Esta capa tiene un valor mínimo y máximo simulado:

$$\bar{X} = 14.29m \text{ a } 14.71m$$

En la capa nueve, para  $\alpha = 0,05$ :

$$T_{1-\alpha/2} = 1.96$$

$$S_{(\alpha)} = 7.12$$

$$N = 62$$

Resolviendo el intervalo de confianza para el 95%, se tiene que el valor simulado para la media debe estar en un rango de 11.42m a 14.97m.

Para este rango la media aritmética en la simulación de los espesores de las capas cuatro y nueve es aceptable para un 95% de probabilidad, en consecuencia la simulación de las capas se considera aceptable.

Para el resto de las capas se procede de la misma forma y se presentan en el anexo en formato electrónico.

La conformación de la estructura del variograma es imprescindible para obtener los mejores resultados en la simulación, es por esto que el variograma experimental se le debe ajustar el mejor modelo teórico posible.

Seguidamente se presentan en la Figura 4.5 y 4.6, la estructura de los variogramas de los espesores de las capas cuatro y nueve que fueron seleccionadas al azar. De igual manera los variogramas de las capas restantes están, en el Anexo II.

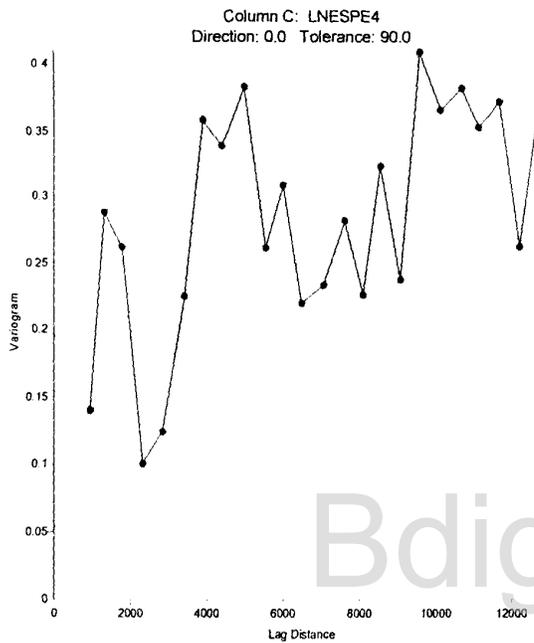


Figura 4.5. Variograma capa cuatro

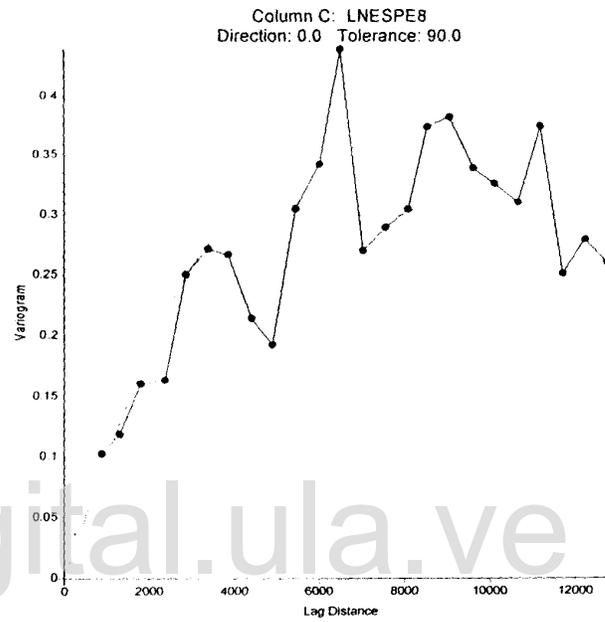
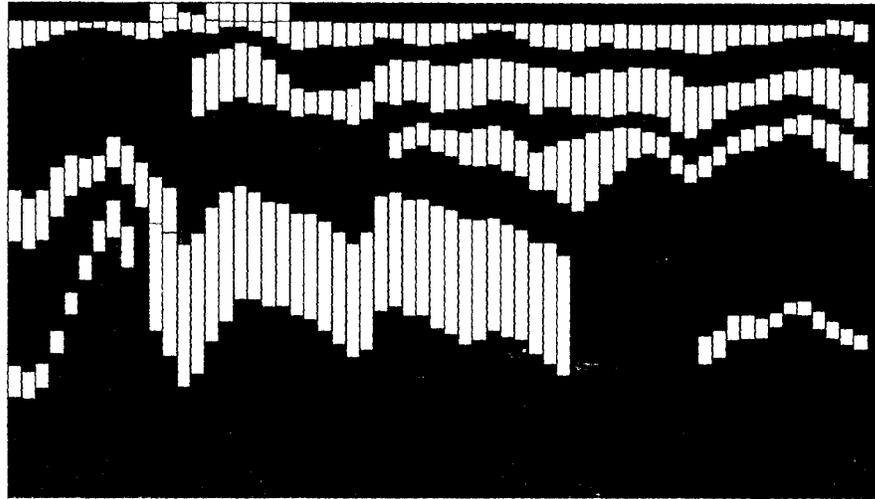


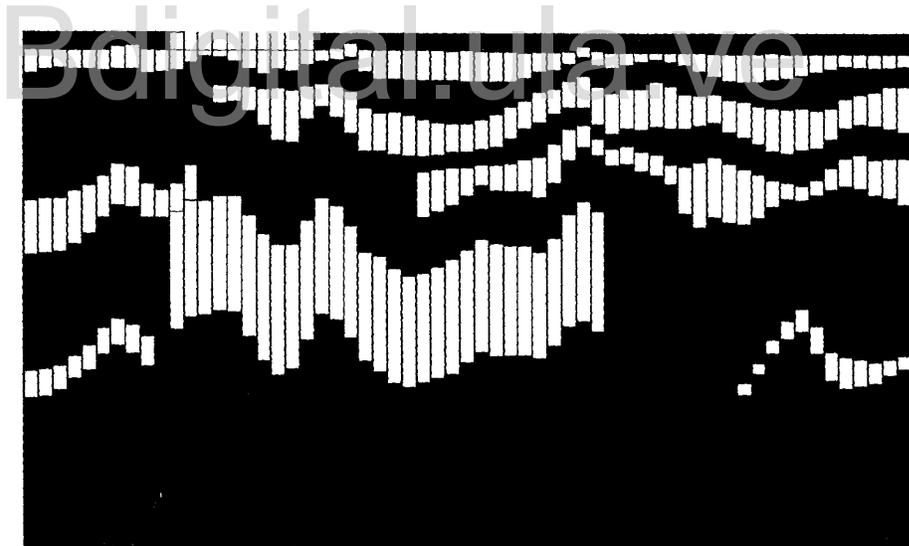
Figura 4.6. Variograma capa nueve

#### 4.2 REPRESENTACIÓN DE CORTES EN EL ACUÍFERO

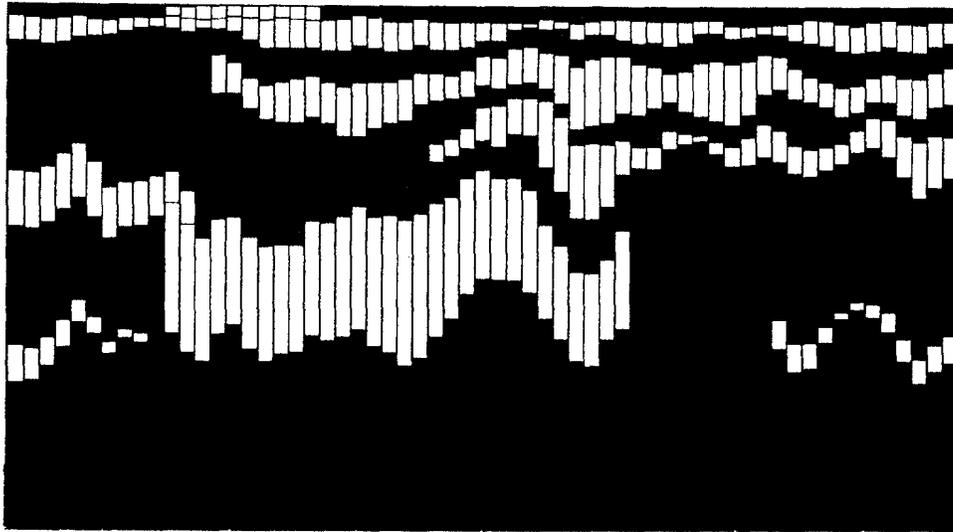
Se selecciona los acuíferos 1, 2 y 3 construidos según las simulaciones de los espesores de las capas indicadas en la Tabla 4.2. Para efectuar cortes en la columna 4 de cada uno de estos acuíferos con el fin de observar la variación de los espesores de las capas, los demás cortes se presentan en el Anexo II cortes.



**Figura 4.7. Simulación 1**



**Figura 4.8. Simulación 2**



**Figura 4.9.** Simulación 3

Una vez seleccionados los acuíferos, se efectuó un corte en la columna 4 de cada acuífero, según la malla en la Figura 3.3.

En las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9, se muestran estos cortes, donde se puede observar una misma tendencia en la conformación de la estructura geológica general y en particular muy pequeñas variaciones en la formación de algunas de las capas que integran cada una de las representaciones simuladas para cada acuífero.

Se puede observar como las capas impermeables tienden a desaparecer cuando se acercan al lago, aumentando los espesores de arena es decir de las capas permeables.

Para lograr observar este detalle fue necesario elaborar un programa que interactuara con el modelo MODFLOW. Este programa es llamado KSMD y fue desarrollado por MORA en el 2002; su estructura fuente se presenta en el formato electrónico, Anexo III, como: KSMD

Este programa básicamente realiza la comparación de los espesores de la capa con el valor cero, para cada punto de la malla.

Cuando el espesor es igual a cero el programa copia las propiedades hidráulicas de la capa anterior.

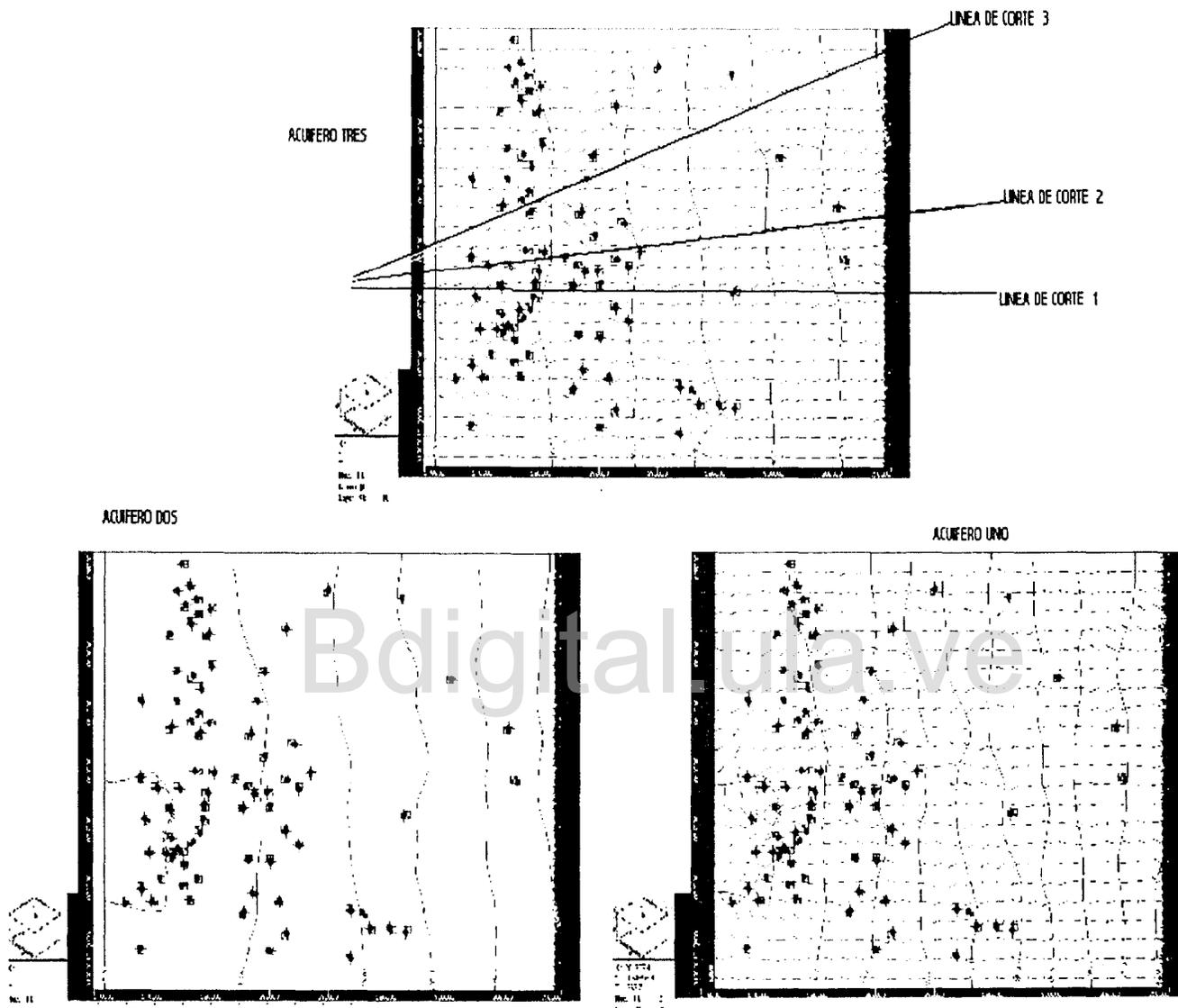
Observando los cortes a estos tres acuíferos, se nota una misma tendencia en la conformación de la estructura litológica general, presentando muy pequeñas variaciones en la formación de algunas capas que integran cada una de las simulaciones.

Esto se debe a que la construcción de cada acuífero se desarrollo respetando los valores observados en campo, es decir, es producto de la simulación condicional que se aplico para la generación de los espesores en toda el área en estudio.

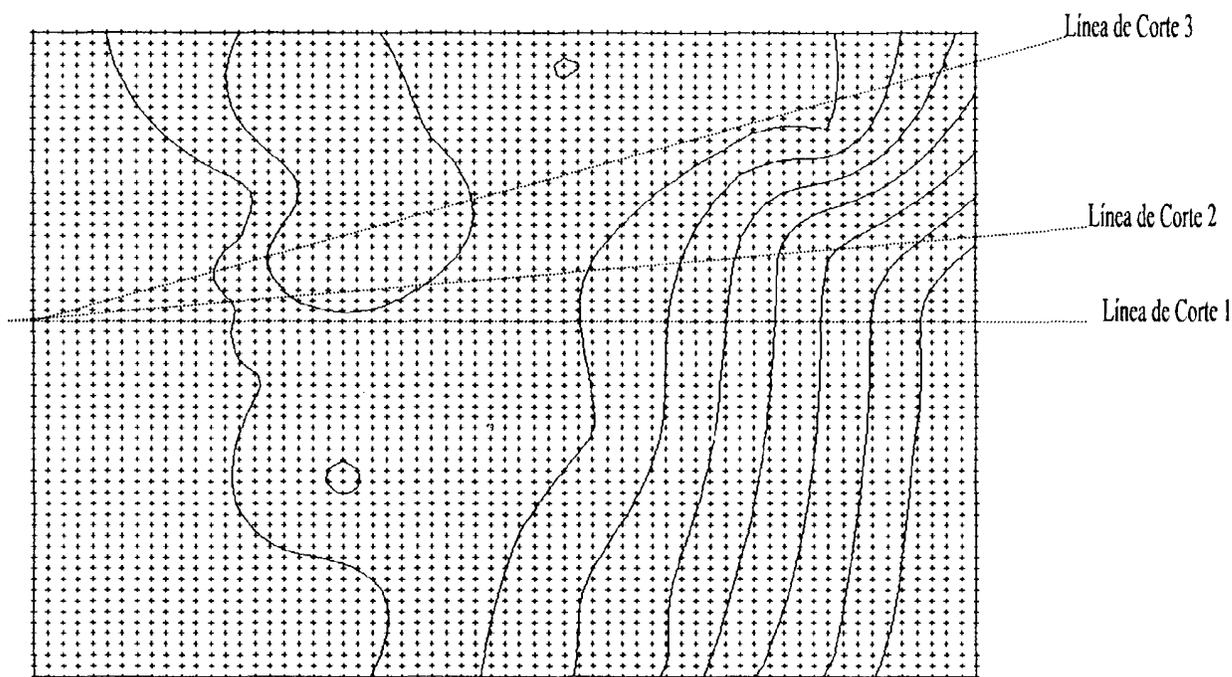
#### **4.2.1. Evaluación del comportamiento del nivel freático**

Para estudiar el comportamiento de los niveles en cada acuífero se procedió a realizar cortes a los planos de equipotenciales generados por las corridas hechas para cinco años con el programa MODFLOW a cada uno de estos tres acuíferos, así como también al plano de equipotenciales generado para la campaña del año 1998, como se muestra en las Figuras 4.10 y 4.11 respectivamente.

Bdigital.ula.ve



**Figura 4.10.** Cortes con líneas rectas a los planos de equipotenciales simulados.



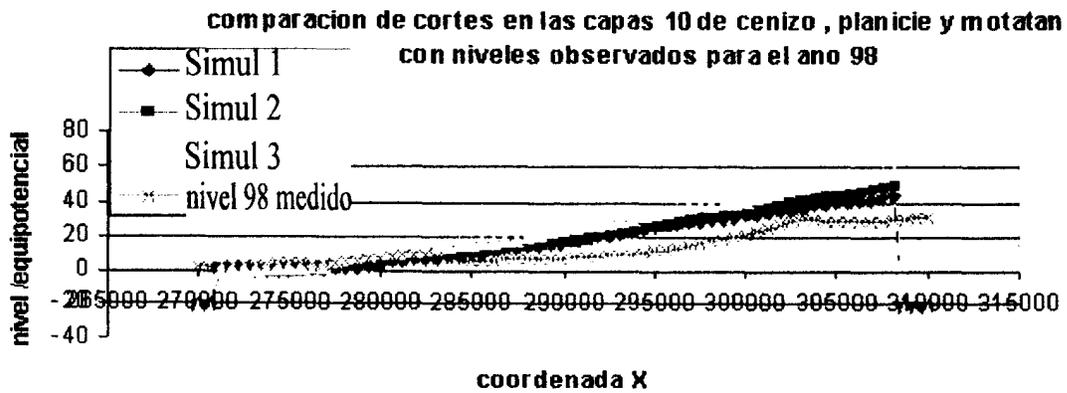
**Figura 4.11.** Cortes con líneas rectas a los planos de equipotenciales observados.

Como se puede observar el corte realizado en tres secciones diferentes, líneas de corte 1, 2 y 3 ver Figura 4.10, a los planos de equipotenciales de estos tres acuíferos escogidos al azar, la variación de los niveles no se ven influenciadas por la variación de los espesores de las capas.

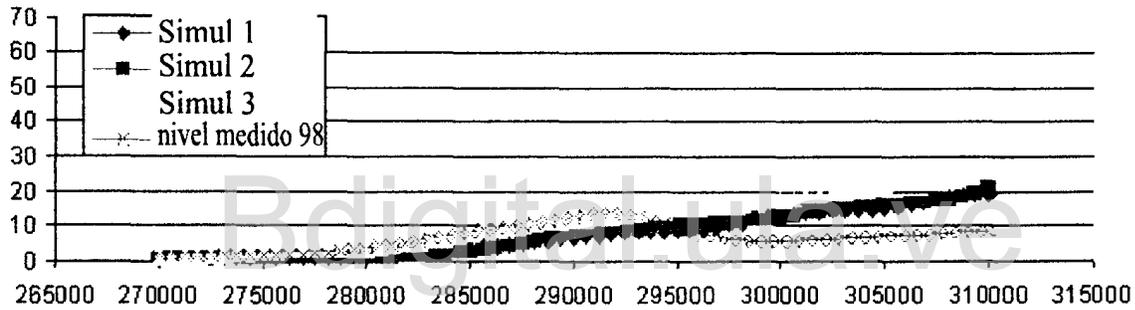
En la Figura 4.12 se aplicó una sección en una dirección casi perpendicular, (línea de corte 1), al plano de equipotenciales de los tres acuíferos y se puede observar que la tendencia de los niveles es muy similar.

En la Figura 4.13 se realizó la sección inclinando la línea de corte más al norte, (línea de corte 2), y también se encuentra que la variación de los niveles es mínima.

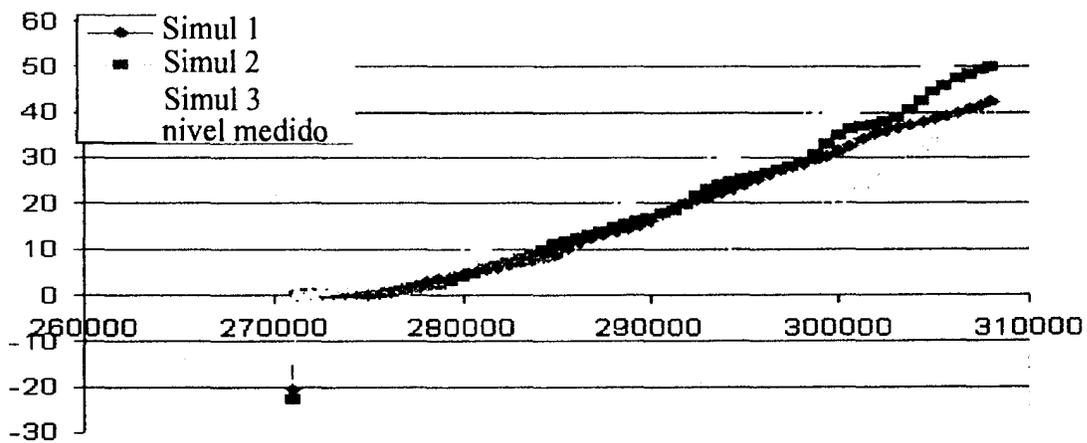
Por último se inclina aún más la línea para la sección, línea de corte 3, y se obtiene la Figura 4.14 donde se nota una disminución en los valores del nivel observado en una zona y que luego se recupera para mantener la misma tendencia que en las secciones anteriores.



**Figura 4.12.** Corte con línea de corte 1, perpendicular a las líneas equipotenciales.



**Figura 4.13.** Corte con línea de corte 2, inclinada un poco al norte.



**Figura 4.14.** Corte con línea de corte 3, inclinada más al norte.

Se quiso comprobar cual era el comportamiento de las equipotenciales por cada capa y se procedió a construir las curvas que representarían la variación de estas, calculando el promedio para cada capa solo considerando el acuífero uno y dos.

En la Figura 4.15 se puede observar que las equipotenciales siguen una trayectoria paralela entre estos dos por lo que se puede decir que no existe influencia en las equipotenciales por parte de la variación de los espesores.

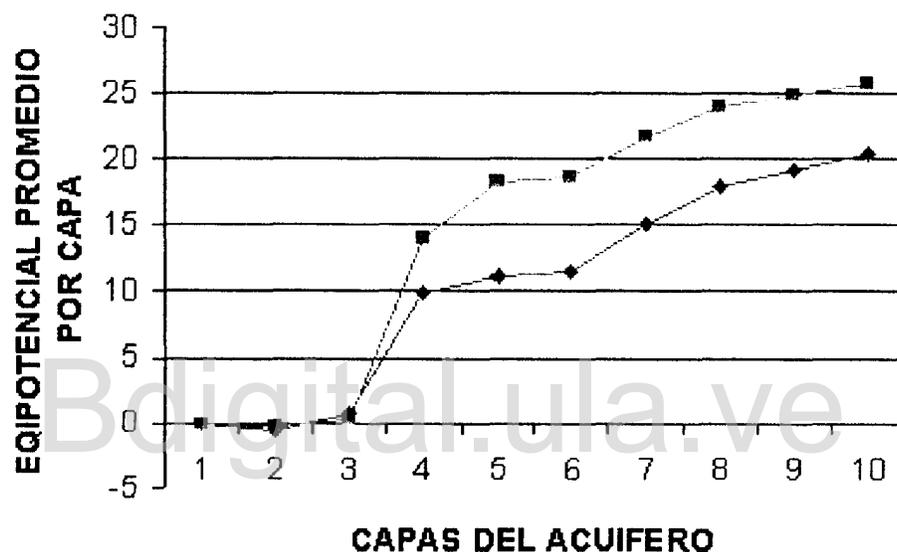


Figura 4.15. Equipotenciales promedio por capas entre el acuífero uno y dos

- **Interpretación de los planos de equipotenciales.**

Los diez acuíferos simulados presentan muy poca variación en el desarrollo de sus equipotenciales presentando un cierto paralelismo entre ellas comenzando con un valor máximo de 50m en el sitio de recarga que va descendiendo hasta llegar a cero, cota considerada constante para el lago de Maracaibo.

Por la forma en que se asignaron las fronteras hidráulicas para los acuíferos a simular, cuando se establecen comparaciones entre los niveles observados y los simulados se encuentra una pequeña diferencia causada por esta condición, pudiéndose despreciar.

Por ejemplo solo se está considerando recarga por el subsuelo de los acuíferos a simular.

Por esto, al realizar cortes en el plano de niveles observados para compararlos con el mismo corte en los planos simulados las curvas muestran esta mínima diferencia como se muestra en las Figuras 4.12, 4.13 y 4.14, antes analizadas.

Bdigital.ula.ve

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

Los métodos geoestadísticos que se aplicaron para la generación de capas acuíferas permiten estimar la presencia o no de un material en el subsuelo basándose en datos observados según los detalles constructivos de los pozos.

Con estos métodos se puede llegar a elaborar un modelo conceptual de un acuífero en cuanto a la variación de los espesores de las capas así como a la tendencia general de los niveles freáticos.

Según los métodos aquí aplicados no se puede establecer una correspondencia directa entre la variación de los niveles de agua subterránea con relación a la variación de los espesores de las capas que conforman el acuífero.

El número de simulaciones por capa es independiente, en forma general, de los resultados que se obtienen.

Se observó una variación mínima entre los niveles simulados y los observados en correspondencia a la similitud entre la condición litológica natural existente en la planicie del río y la condición dada por las simulaciones.

#### 5.2. RECOMENDACIONES

Con el fin de obtener una mejor aproximación de la representación estratigráfica del acuífero se hace necesario realizar las simulaciones con un número mayor de treinta datos condicionantes, que permitan construir una buena estructura del variograma.

Desarrollar este estudio considerando las recargas reales del acuífero.

Las simulaciones desarrolladas en este trabajo son bidimensionales por lo que se recomienda realizar simulaciones tridimensionales que permitan una mejor correspondencia con el acuífero real.

Es necesario usar un modelo que permita la visualización del acuífero de manera tridimensional, ya que por este método desarrollado se observan las tres dimensiones separadas en corte y en planta.

Es necesario profundizar el análisis aquí desarrollado ya que no se evaluó hasta qué punto es cierto que se puedan tomar las capas de manera aleatoria, es decir, evaluar su independencia entre capas.

Las empresas u organismos encargados de la toma de datos de campo deben mantener un control riguroso en cuanto a la obtención ordenada de los datos, de tal forma de acceder a ellos según condiciones hidrogeológicas.

Bdigital.ula.ve

## LITERATURA CITADA

- Buitrago J. y Rangel O 1988. **Clasificación de Tierras Agrícolas en la Planicie Aluvial del Río Motatán.** Trujillo – Venezuela.
- Caura y Aata INT, INC. 1997. **Estudio de Impacto Ambiental.** Proyecto: Perforación Exploratoria y Producción Temprana, Bloque La Ceiba. Trujillo, Venezuela
- Corpoandes – ECOSA 1975. **Estudio Hidrológico Semidetallado. Planicie Aluvial Caús – Pocó.** Estado Trujillo. Venezuela.
- Corpoandes – ILPES. 1971-. **Plan de Desarrollo Integral de la Planicie Aluvial del Río Motatán.** Estado Trujillo. Venezuela.
- Coss. R. 1994. **Simulación. Un enfoque Práctico.** Editorial 6 Limusa S.A. México D.F. México.
- Delhomme, J-P. 1978. **Application de la Théorie des Variables regionalisées Dans les Sciences de l'eau.** Orléans. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, BRGM. III (4)
- Deutsch, C. y Journel, A. 1992. **Geostatistical Software Library and User's Guide.** Oxford University Press, Inc. 340 p.
- Grupo de Investigación de Suelos y Aguas. 1997. **Informe Técnico de Perforamiento de Pozos.** Proyecto 3D La Ceiba. GISA – NURR, Trujillo.
- Journel, A. y Huijbregts, Ch. 1981. **Mining Geostatistics.** London: Academia Press Inc. 600 p.
- Vivas, Leonel. 1984. **El Cuaternario.**
- Leotaudi y F. Moreno. 1980. **Clasificación de Tierras con Fines Agrícolas, Planicie Aluvial Motatán – Caús, Estado Trujillo.** Tesis de Grado. Escuela de Geografía, Facultad Ciencias Forestales. U.L.A. Mérida – Venezuela.
- M.A.R.N.R. 1978. **Mapa Sistémico con Fines de Administración del Ambiente.** Venezuela.
- Mejías. 2002. En comunicación personal.
- Ministerio de Obras Públicas (M.O.P) 1973. **Estudio Preliminar de la Problemática de Inundaciones de las Cuencas ubicadas entre los ríos Motatán y Chama.**

- Miyashiro, V. 1996. **Evaluación Estocástica de Políticas de Explotación del Agua Subterránea. Aplicación al Acuífero del Valle de Quibor.** Tesis de MSc. Mérida: CIDIAT.
- Mora, L. 1996. **Aplicación de Métodos Geoestadísticos para el Análisis de Parámetros de Calidad de Agua en Acuíferos.** Tesis de MSc. Mérida: CIDIAT.
- Mora. 2002. En comunicación personal.
- Rodríguez, R. 1986. **Simulación del Comportamiento del Acuífero de la Cuenca Baja del Río Motatán, Bajo Diferentes Políticas de Explotación.** Tesis de MSc. Mérida: CIDIAT.
- S.H.T. – C.R. Ingenieros. 1994. **Estudio Agroclimático en la Planicie Aluvial Cáus – Pocó. Trujillo – Venezuela.**
- Samper, F. y Carrera J. 1990. **Geoestadística: Aplicación a la Hidrología Subterránea.** Editorial CIMNI. Barcelona. 481 p.
- Samper, J. 1994. **Métodos Estadísticos y Geoestadísticos En: Temas Actuales de Hidrología Subterránea** – pp. 37-78. Bocanegra, E y Rapaccini, A – Editores. Universidad Nacional de Mar de la Plata. La Plata.
- Waterloo Hydrogeologic Inc. 1996. **User's Manual for Visual Mudflow.** Waterloo, Ontario, Canadá. 315 p.

**ANEXOS**

Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento

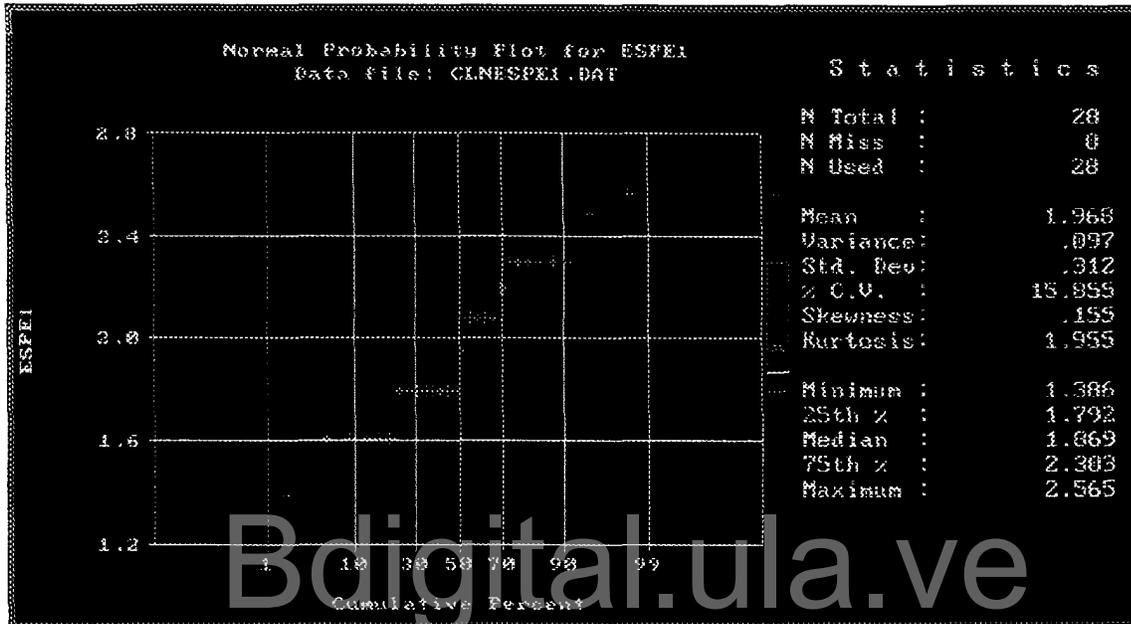
**ANEXO I. Anexo correspondiente al capítulo 3**

Bdigital.ula.ve

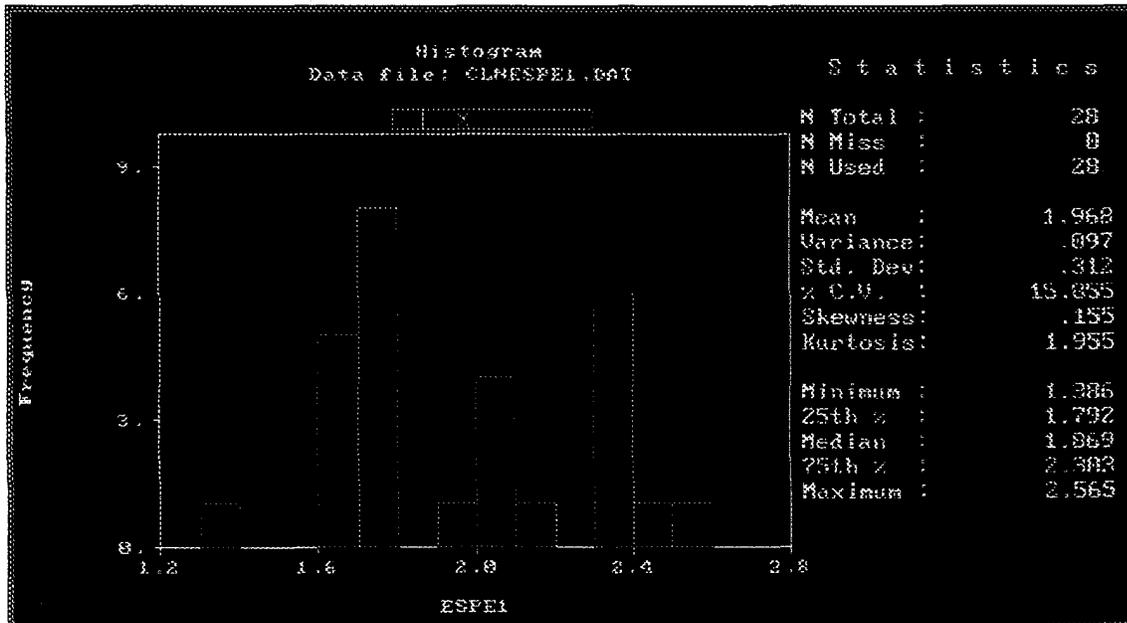
C.C.Reconocimiento

# PRUEBA DE NORMALIDAD DE LOS ESPESORES AFECTADOS POR LOGARITMO

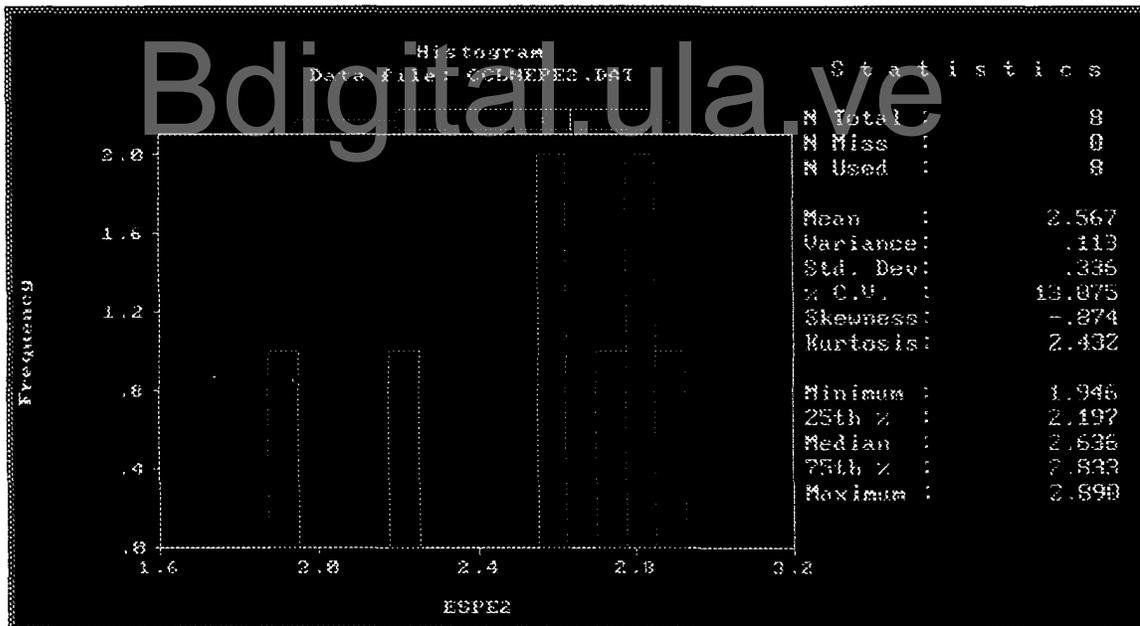
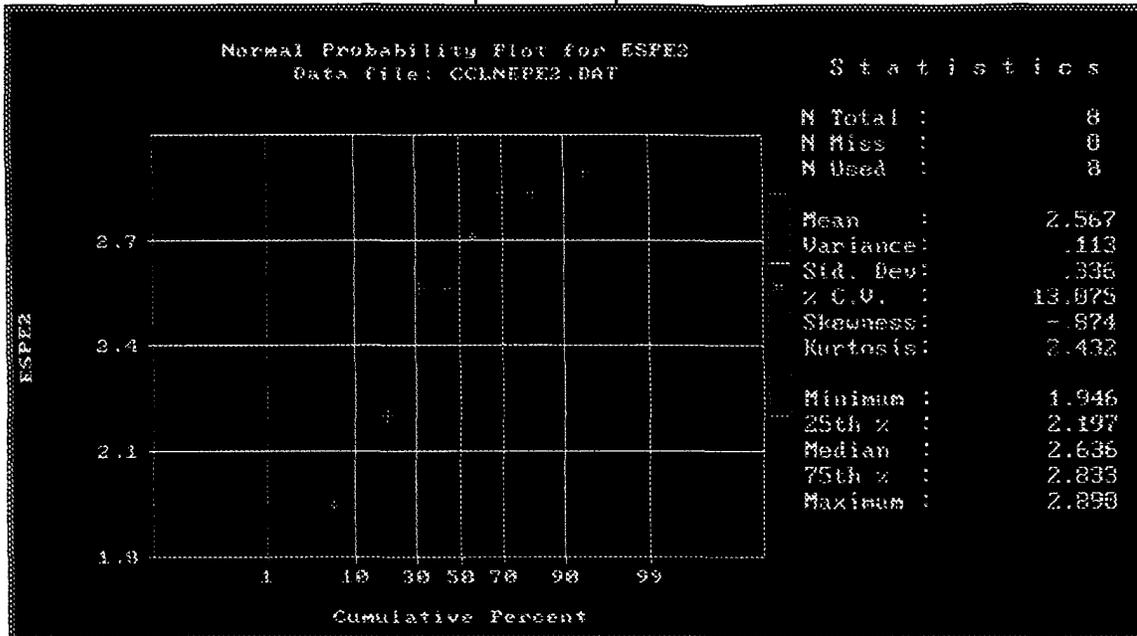
## PRUEBA CAPA 1



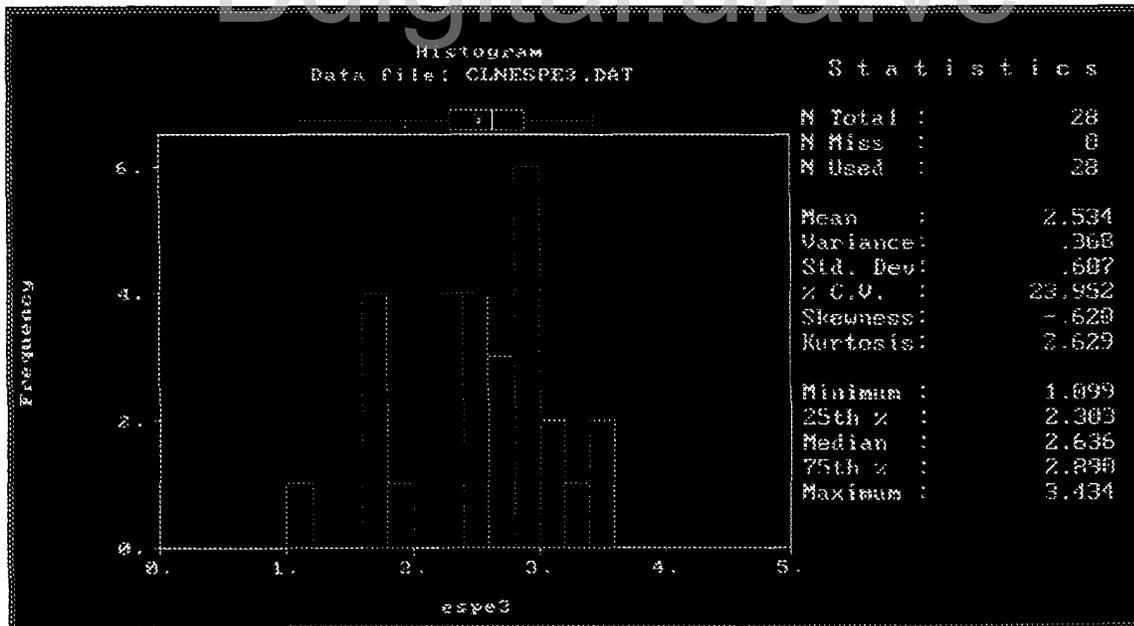
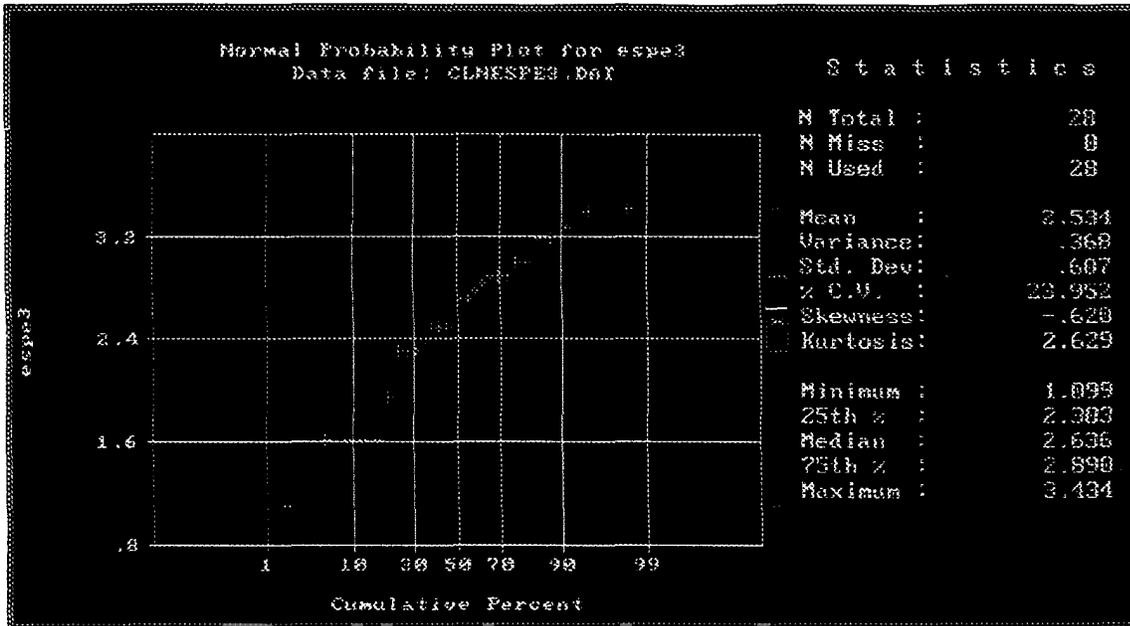
## HISTOGRAMA



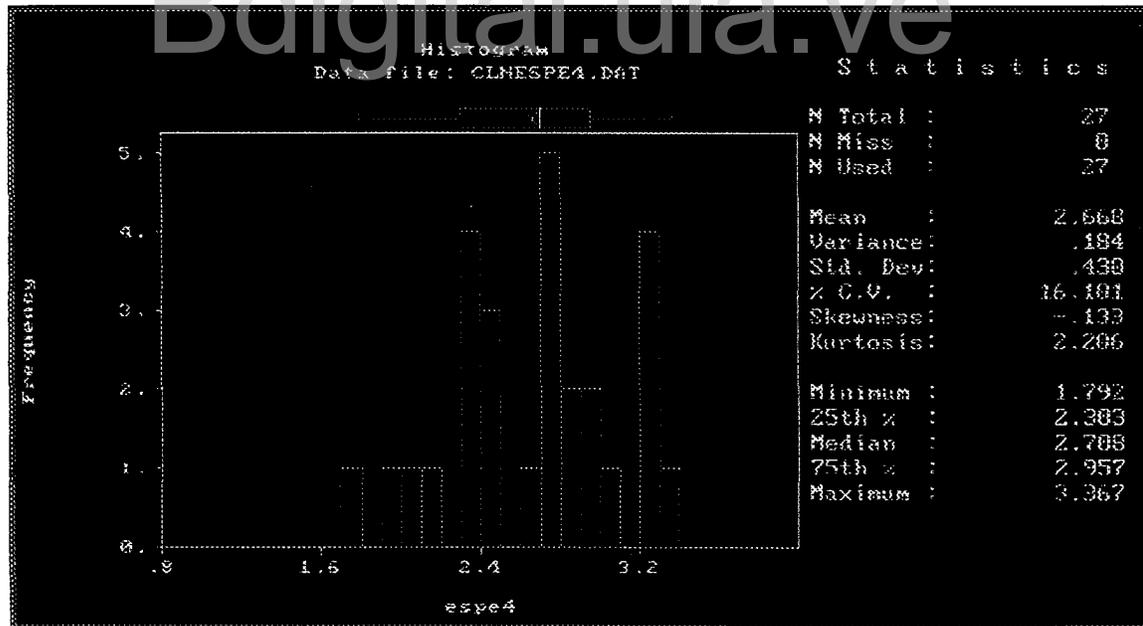
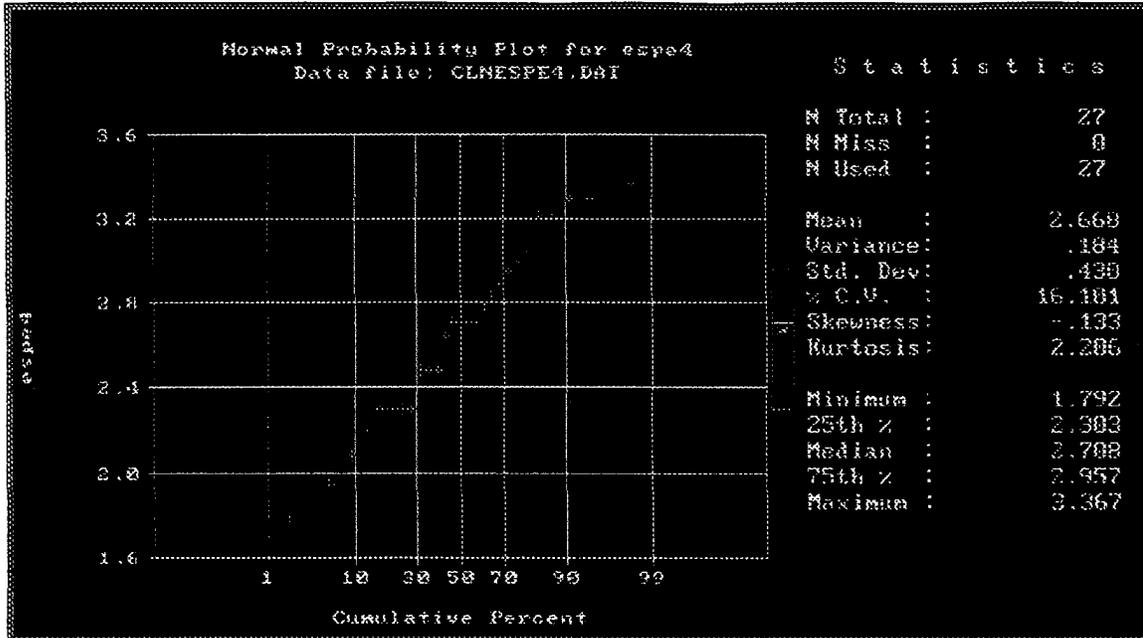
## prueba capa 2



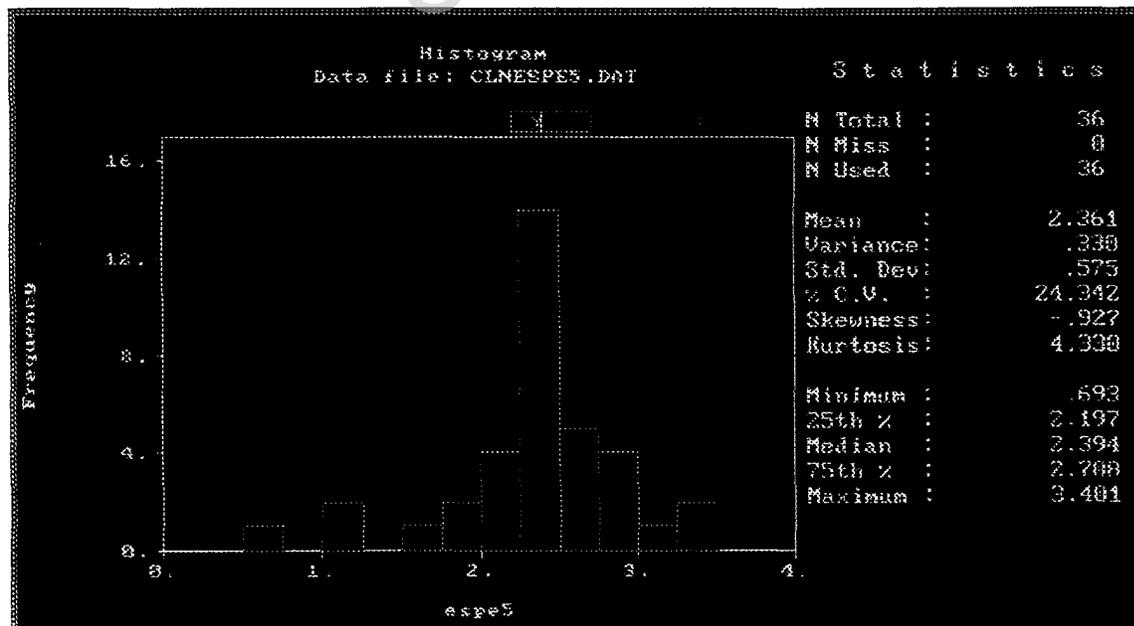
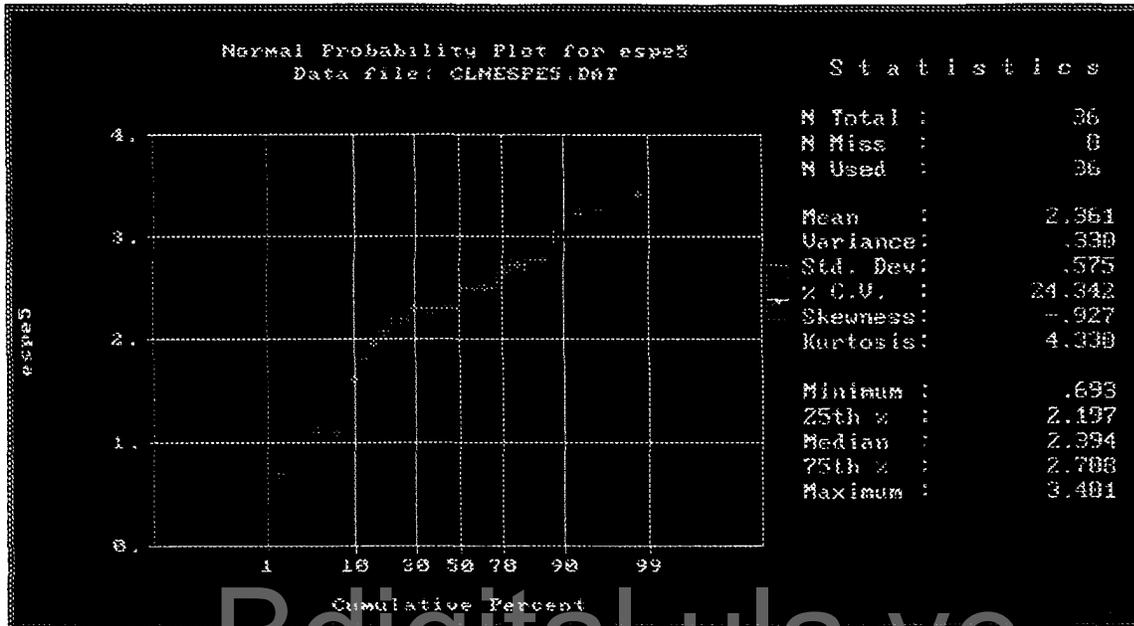
### CAPA3



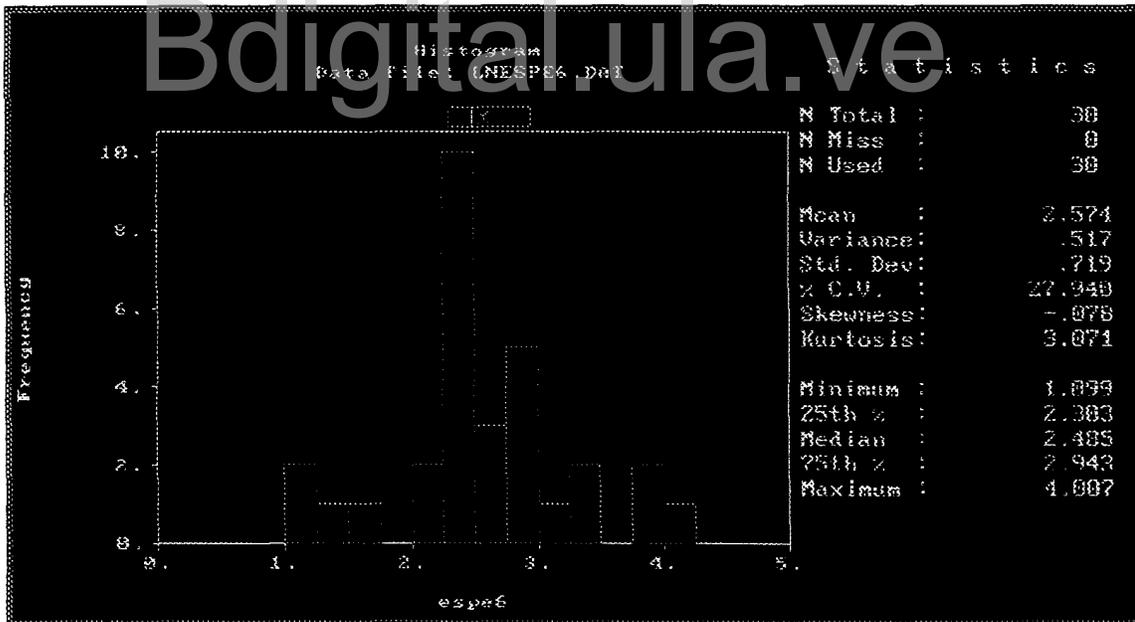
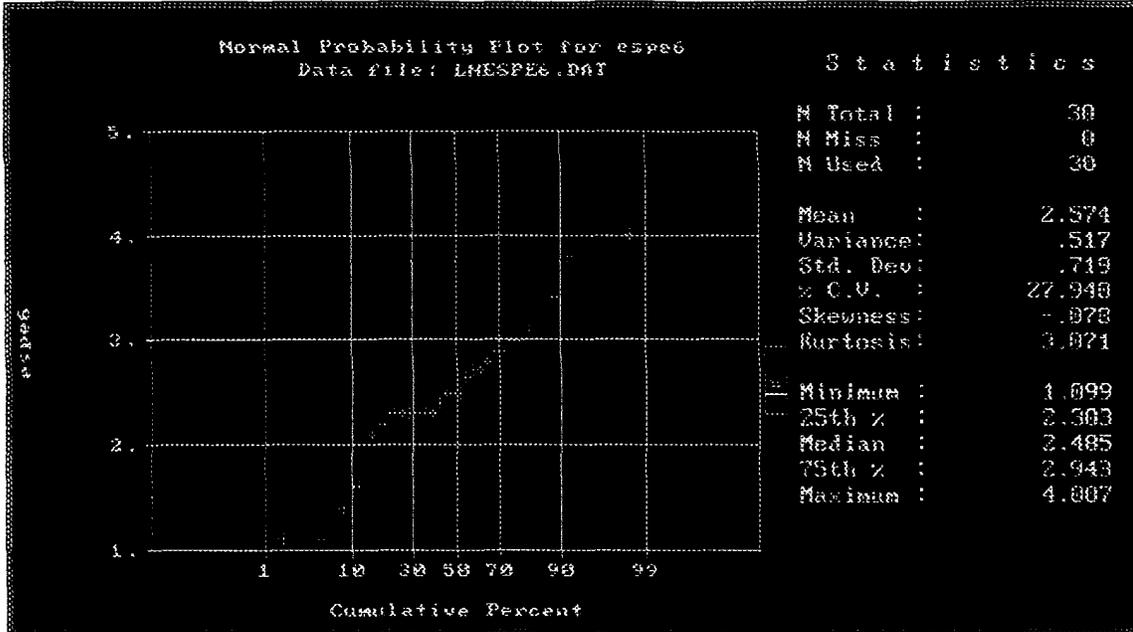
# CAPA4



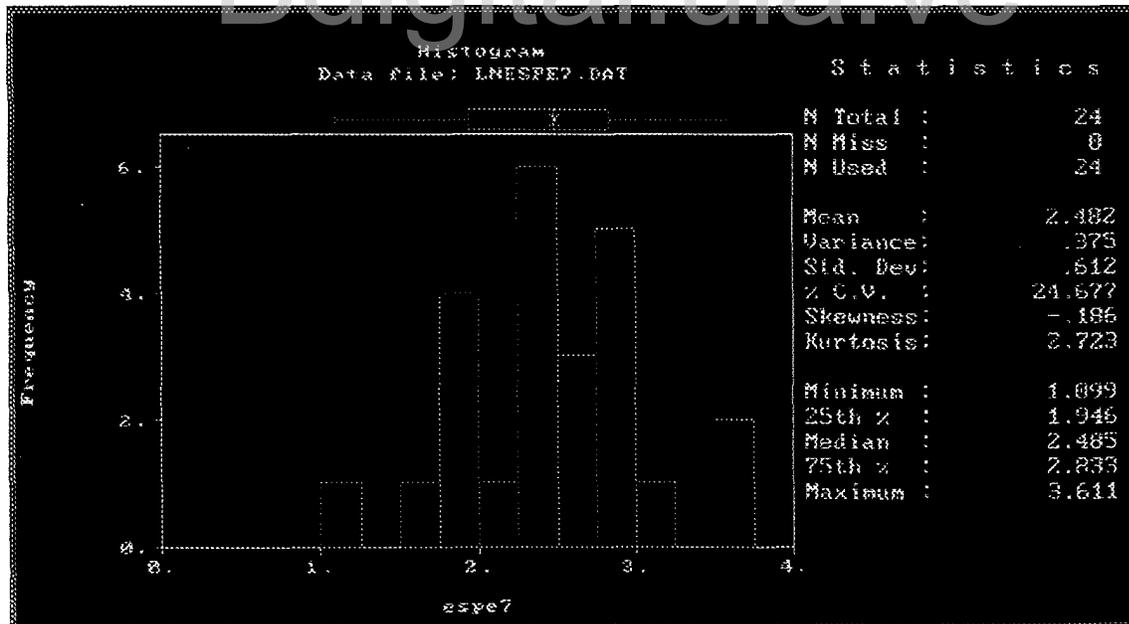
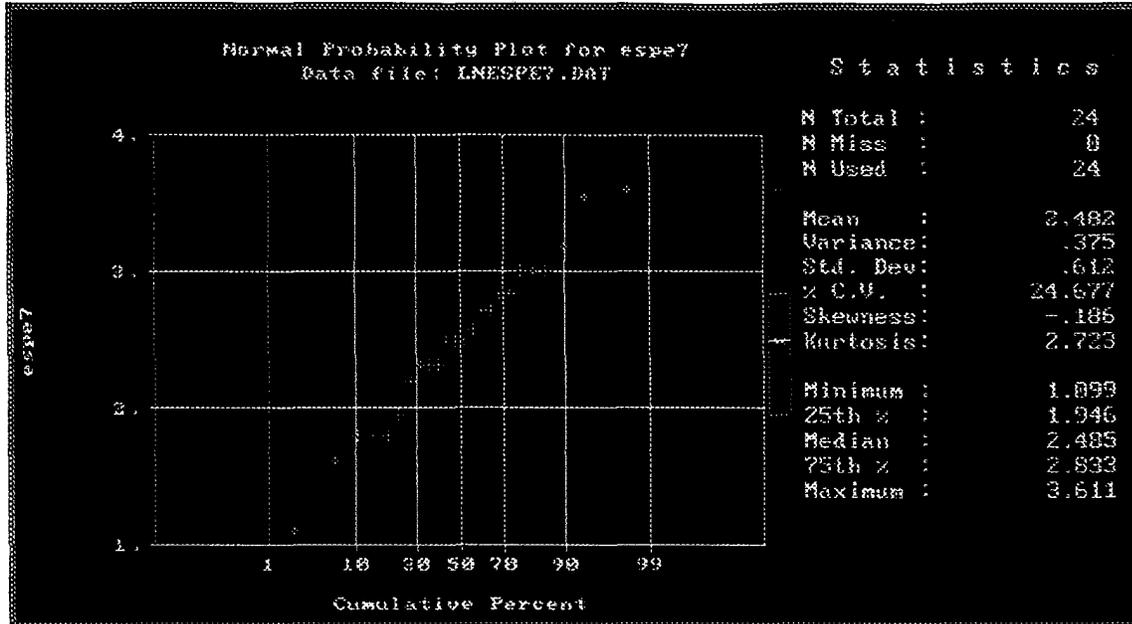
# CAPA5



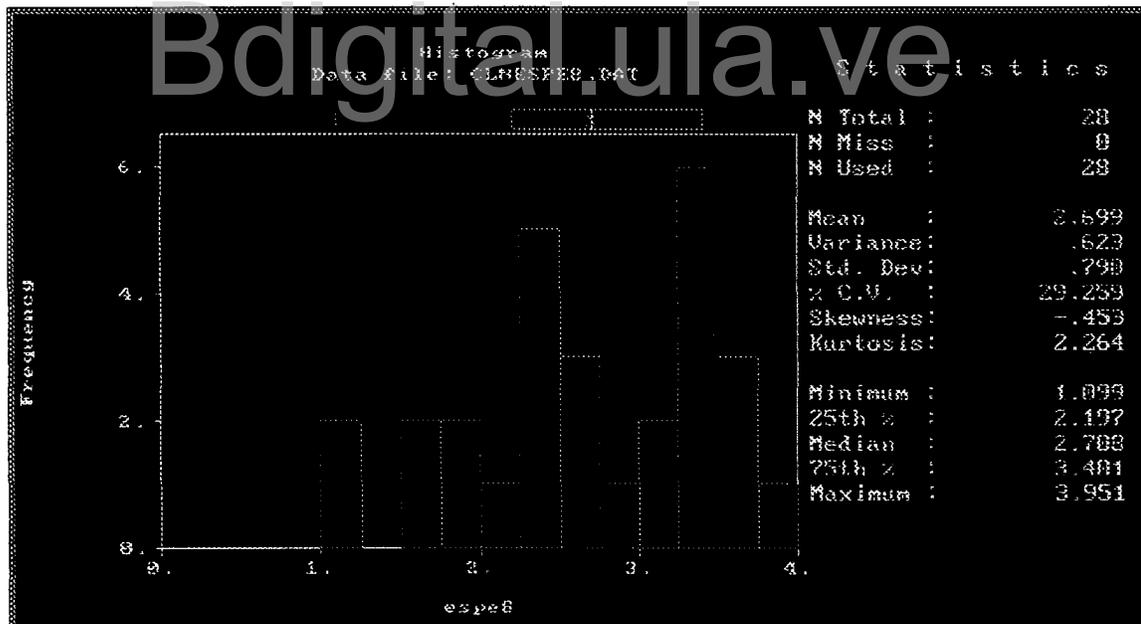
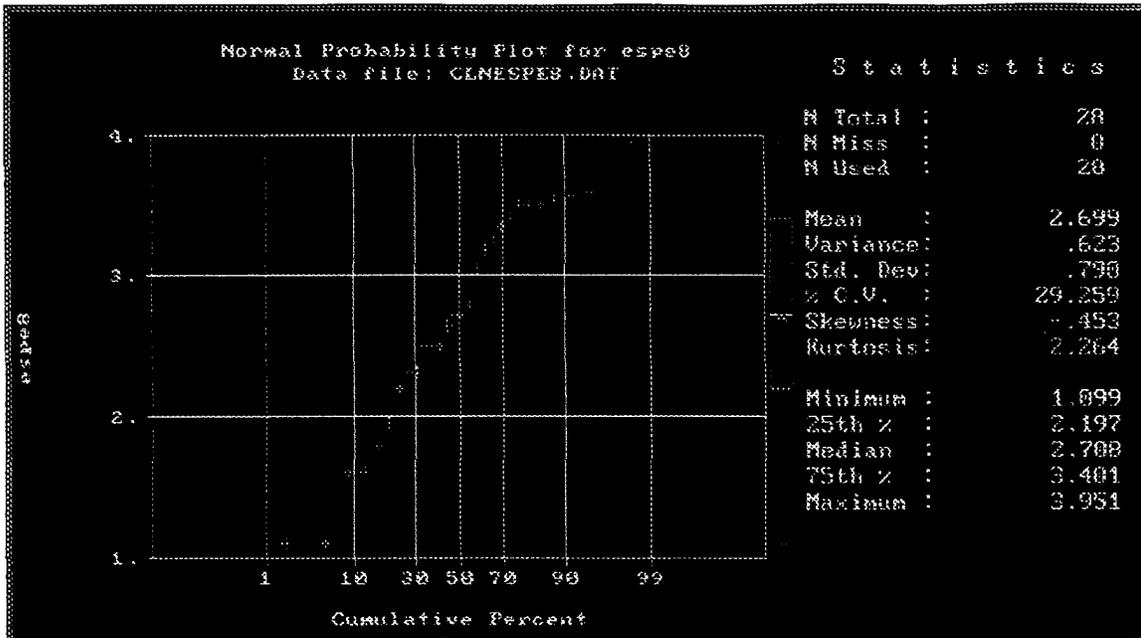
## CAPA6



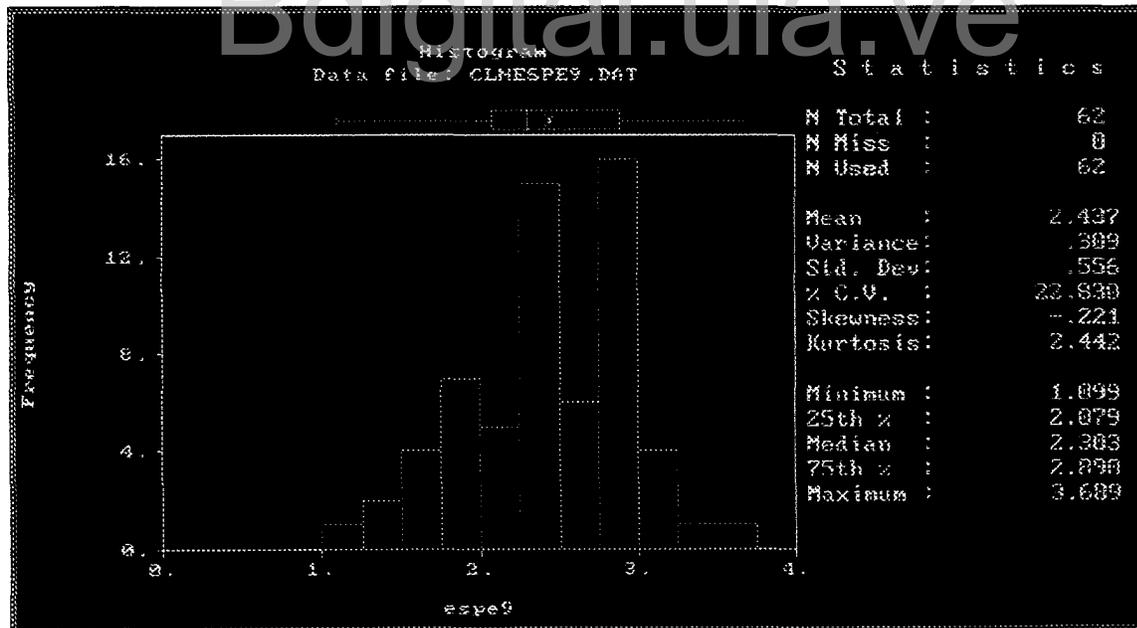
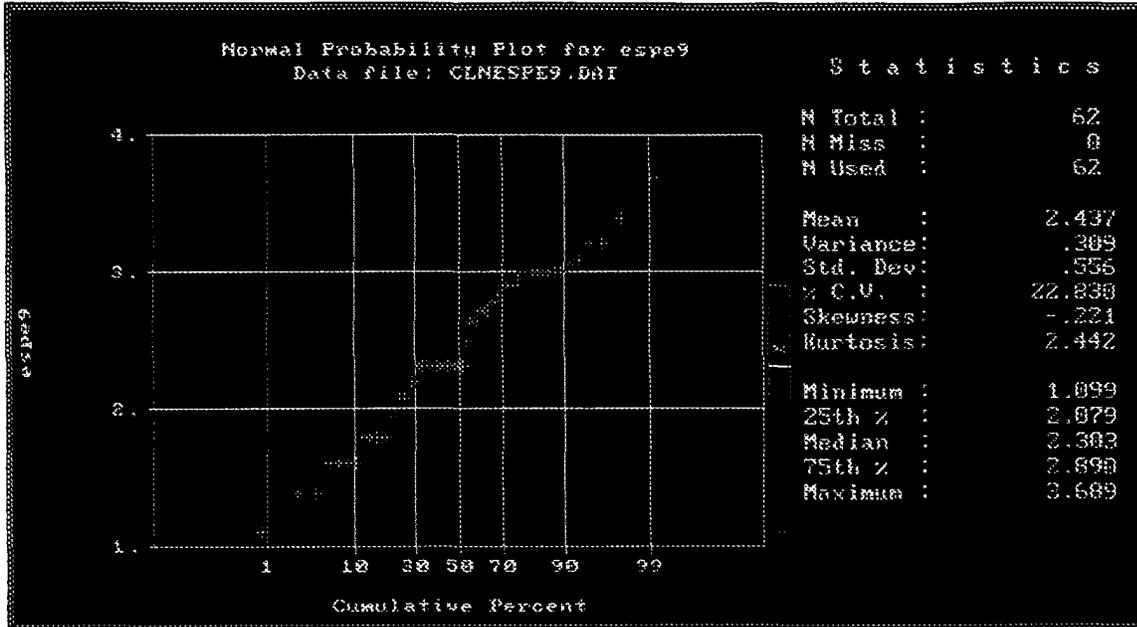
### CAPA7



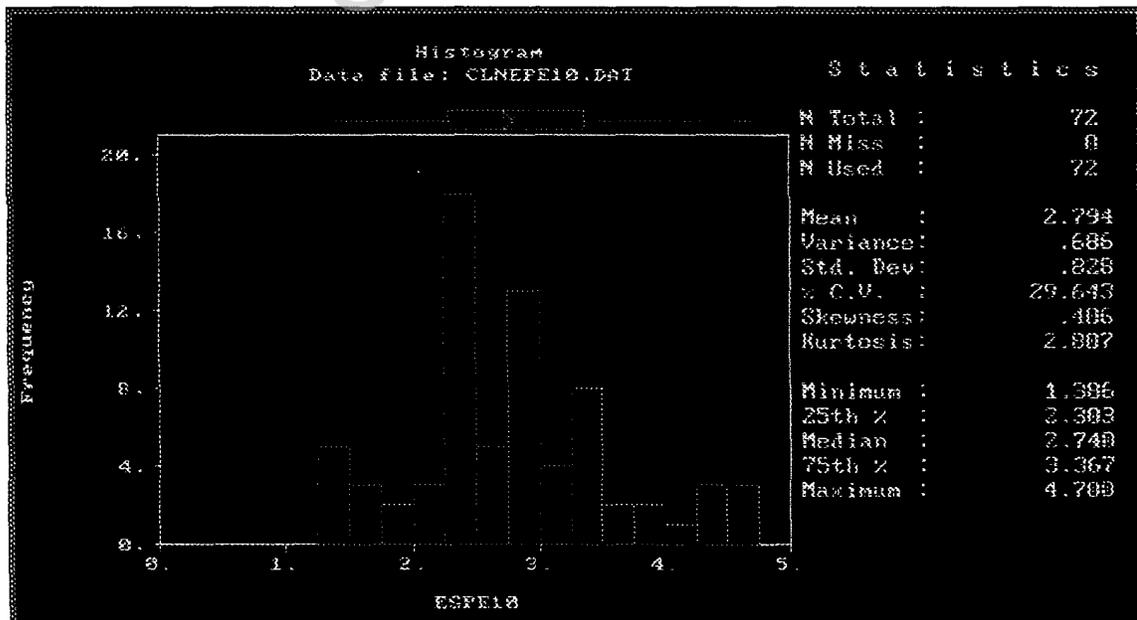
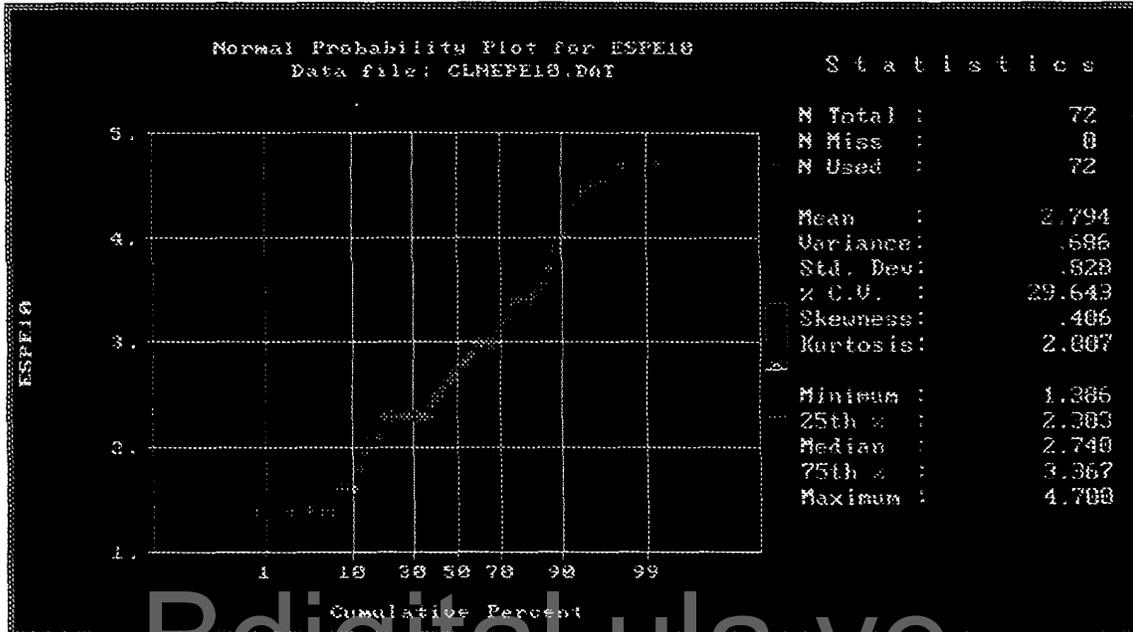
## CAPA8



# CAPA9



## CAPA10



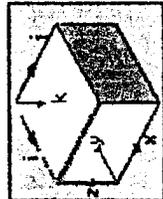
**ANEXO II. Anexo correspondiente al capítulo 4**  
**Formato electrónico incluido en CD anexo**

NOTA: EL COLOR AZUL INDICA ZONA PERMEABLE

CORTE EN COLUMNA 1

Visual MODFLOW - [ c:\vmodm\mplotan.vmf ] File Grid Wells Properties Boundaries Particles Calibrate Annotate ZBud MT3D Help

- View Column
- View Row
- View Layer
- Go to
- Previous
- Next
- Assign Single
- Assign Polygon
- Assign Window
- Edit Single
- Edit Property
- Copy Column
- Database



X: 270307.7  
Y: 1059162.7  
Z: 35.7  
Row (I): 1  
Column (J): 1  
Layer (K): 1

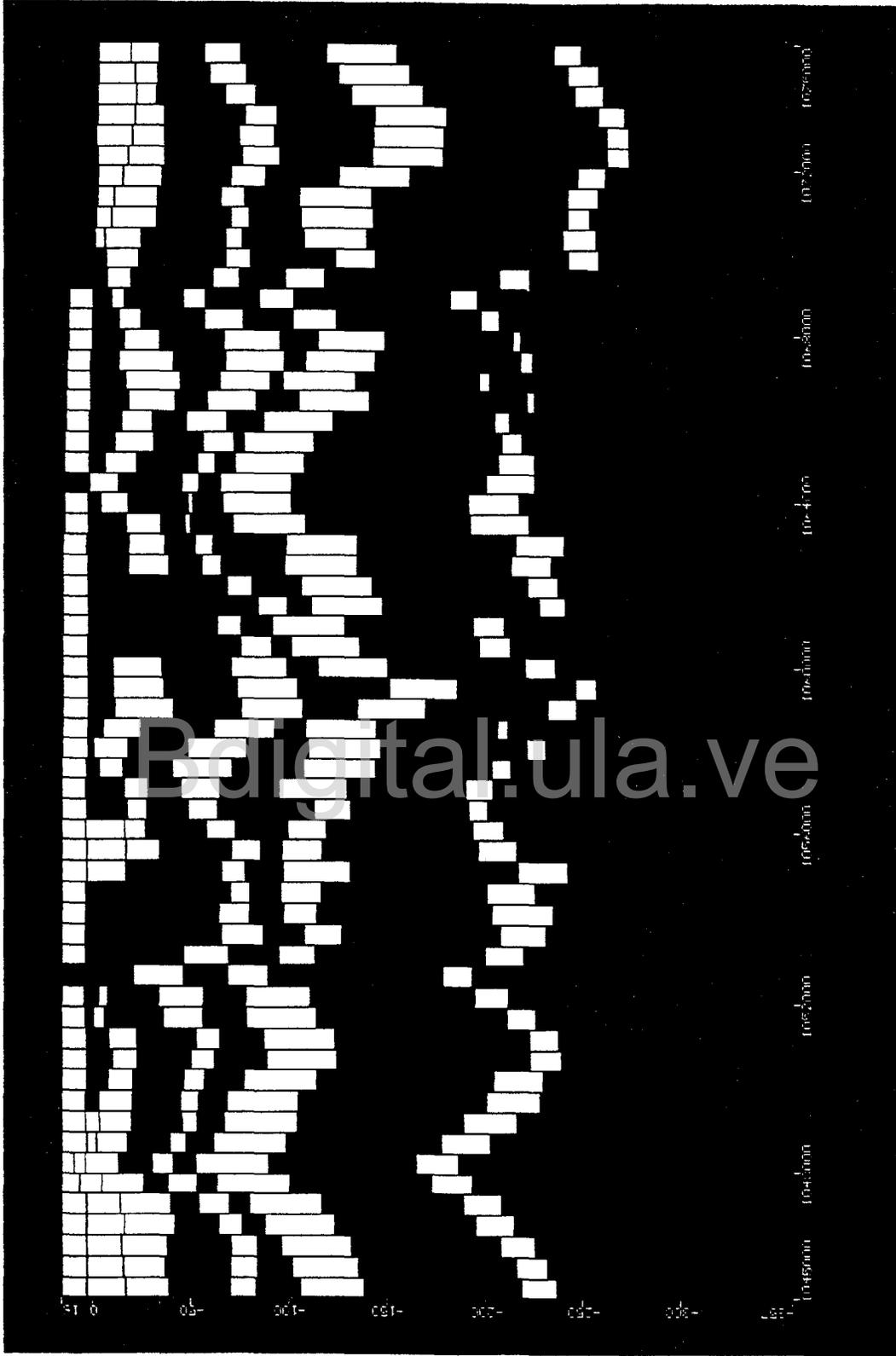
- F1 Help
- F2
- F3 Save
- F4 Map
- F5 Zoom in
- F6 Zoom out
- F7 Pan
- F8 Vert drag
- F9 Over Lay
- F10 Main Menu

CORTE EN COLUMNA 30

[-] [X]

Visual MODFLOW - [c:\vmodn\mplotan.vmf] File Grid Wells Properties Boundaries Particles Calibrate Annotate ZBud MT3D Help

- View Column
- View Row
- View Layer
- Goto
- Previous
- Next
- Assign Single
- Assign Polygon
- Assign Window
- Edit Single
- Edit Property
- Copy Column
- Database



X : 288153.8  
 Y : 1057952.8  
 Z : 5.8  
 Row (I): 35  
 Column (J): 30  
 Layer (K): 1

- F1 Help
- F2
- F3 Save
- F4 Map
- F5 Zoom In
- F6 Zoom Out
- F7 Pan
- F8 Vert exag
- F9 Over Lay
- F10 Main Menu

Conductivity edit module



Visual M... CORTES.d...

12:47

CORTE EN COLUMNA 60



Bdigital.ula.ve

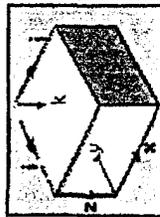
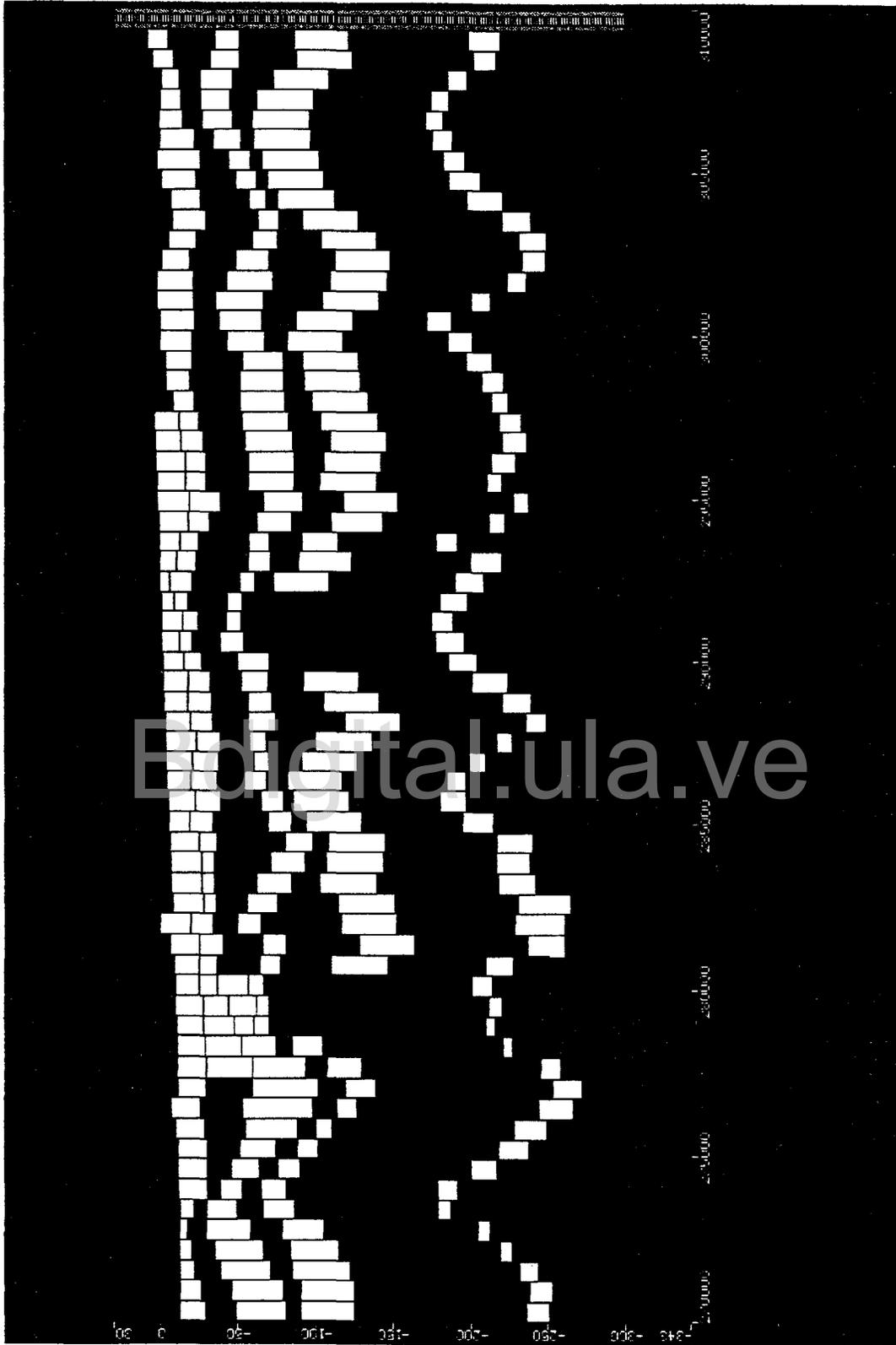
CORTE EN FILA I

[-] [B] [X]

: Visual MODFLOW - [c:\vmodn\mplotan.vmf]

File Grid Wells Properties Boundaries Particles Calibrate Annotate ZBud MT3D Help

- View Column
- View Row
- View Layer
- Goto
- Previous
- Next
- Assign Single
- Assign Polygon
- Assign Window
- Edit Single
- Edit Property
- Copy Row
- Database



X : 271621.6  
 Y : 1074754.1  
 Z : 94.7  
 Row (I): 1  
 Column (J):  
 Layer (K):

- F1 ? Help
- F2 [F2]
- F3 [F3]
- F4 [F4]
- F5 Zoom in
- F6 Zoom out
- F7 Pan
- F8 Vert Exag
- F9 Over Lay
- F10 Main Menu

Conductivity edit module



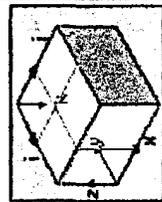
Visual M... CORIES.d

1246

CORTE EN FILA 30

Visual MODFLOW - [c:\vmod\mod\mofatran.vmf] File Grid Wells Properties Boundaries Particles Calibrate Annotate ZBud MT3D Help

- View Column
- View Row
- View Layer
- Goto
- Previous
- Next
- Assign Single
- Assign Polygon
- Assign Window
- Edit Single
- Edit Property
- Copy Row
- Database



X : 283603.6  
Y : 1060491.8  
Z : -157.5  
Row (I): 30  
Column (J): 23  
Layer (K): 8

- F1 ? Help
- F2 [ ]
- F3 [ ] Save
- F4 [ ] Map
- F5 [ ] Zoom in
- F6 [ ] Zoom out
- F7 [ ] Pan
- F8 [ ] Vert
- F9 [ ] Over Lay
- F10 [ ] Main Menu

Conductivity edit module



Visual M... CORTES.d



12:48

Bdigital.ula.ve

CORTE EN FILA 60

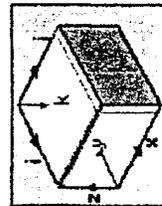


Visual MODFLOW - [ c:\mmod\modaten.vml ]  
 File Grid Wells Properties Boundaries Pgrticles Calibrate Annotate ZBud MT3D Help

- View Column
- View Bound
- View Layer
- Goto
- Previous
- Next
- Assign Single
- Assign Polygon
- Assign Window
- Edit Single
- Edit Property
- Copy Row
- Database



digitalula.ve



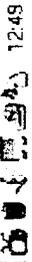
X : 273918.9  
 Y : 1045737.7  
 Z : 76.7  
 Row (I) : 60  
 Column (J) :  
 Layer (K) :

F1 Help  
 F2  
 F3 Save  
 F4 Map  
 F5 Zoom In  
 F6 Zoom Out  
 F7 Pan  
 F8 Vert Drag  
 F9 Over Lay  
 F10 Main Menu

Conductivity edit module



Visual M... | CORTES.d...



NOTA: EL COLOR AZUL INDICA ZONA PERMEABLE

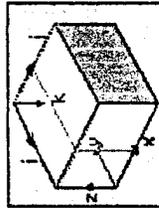
CORTE EN COLUMNA I



Visual MODFLOW - [c:\vmodm\planicie.vml]

File Grid Wells Properties Boundaries Particles Calibrate Annotate ZBud M13D Help

- View Column
- View Row
- View Layer
- Goto
- Previous
- Next
- Assign Single
- Assign Polygon
- Assign Window
- Edit Single
- Edit Property
- Copy Column
- Database



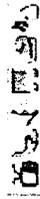
X: 288153.8  
 Y: 1045236.5  
 Z: -84.4  
 Row (I): 61  
 Column (J): 30  
 Layer (K): 6

- F1 ? Help
- F2
- F3 Save
- F4 Map
- F5 Zoom In
- F6 Zoom Out
- F7 Pan
- F8 Vert. Exag.
- F9 Over Lay
- F10 Main Menu

Conductivity edit module



Visual M... PLANICIE...

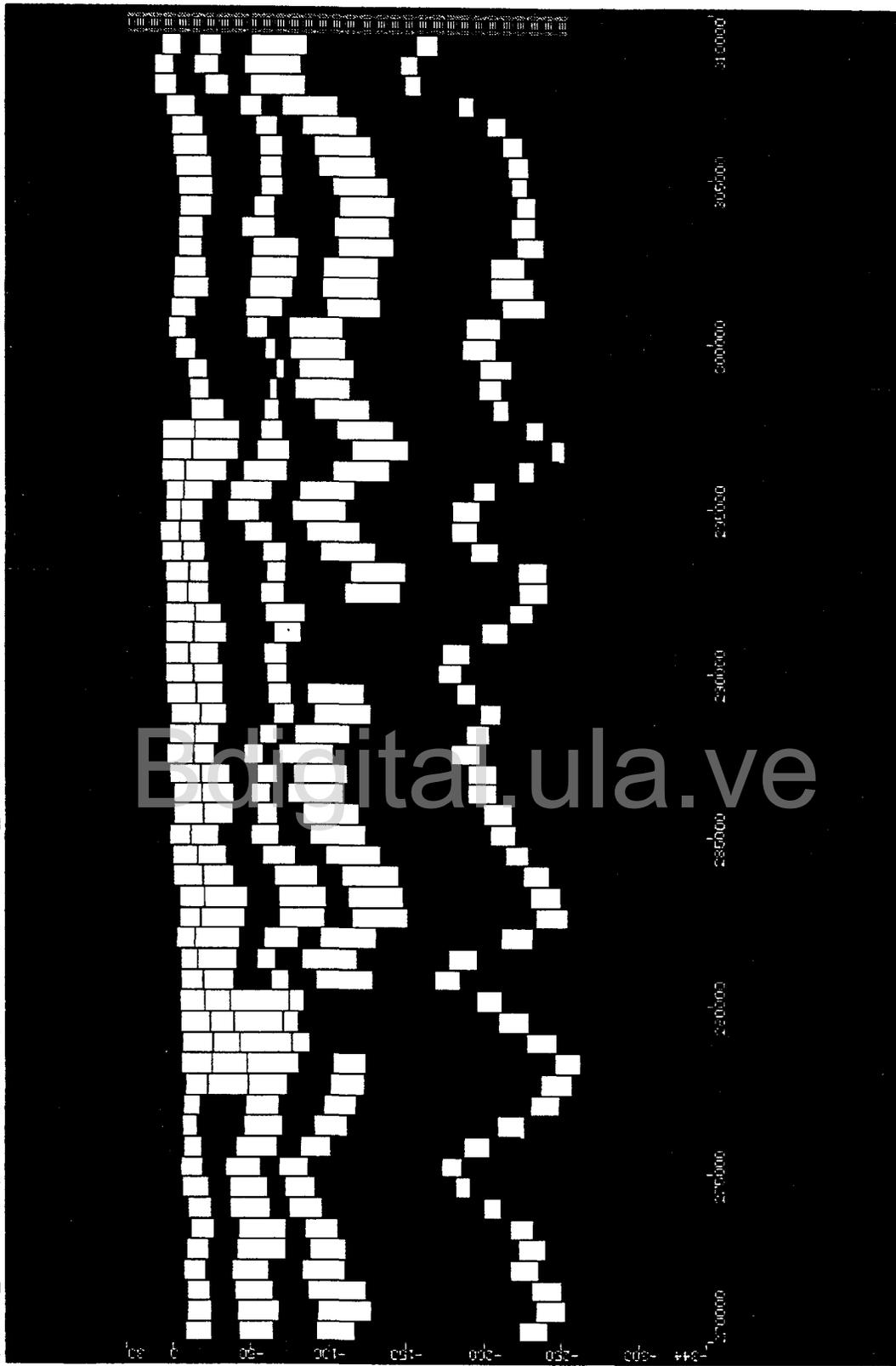


11:58

CORTE EN COLUMNA 60



- View Column
- View Row
- View Layer
- Goto
- Previous
- Next
- Assign Single
- Assign Polygon
- Assign Window
- Edit Single
- Edit Property
- Copy Row
- Database



X : 2731532  
 Y : 1074754.1  
 Z : 103.7  
 Row (I): 1  
 Column (J):  
 Layer (K):

F1 ? Help  
 F2 |h.  
 F3 Save  
 F4 Map  
 F5 Zoom in  
 F6 Zoom out  
 F7 Pan  
 F8 Vert Exag  
 F9 Over Lay  
 F10 Main Menu

Conductivity edit module



Visual M... PLANICIE...

CORTE EN FILA 30

Visual MODFLOW - [c:\vmodm\planicie.vmf]

File Grid Wells Properties Boundaries Particles Calibrate Animate ZBud MT3D Help

View Column  
View Row  
View Layer  
Goto Previous Next  
Assign Single  
Assign Polygon  
Assign Window  
Edit Single  
Edit Property  
Copy Row  
Database



X: 280675.7  
Y: 1060491.8  
Z: -166.6  
Row (I): 30  
Column (J): 18  
Layer (K): 7

F1 ? Help  
F2 [F]   
F3 [S] Save  
F4 [M] Map  
F5 Zoom in  
F6 Zoom out  
F7 [P] Pan  
F8 View Legend  
F9 Over Lay  
F10 Main Menu

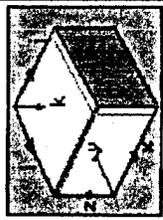
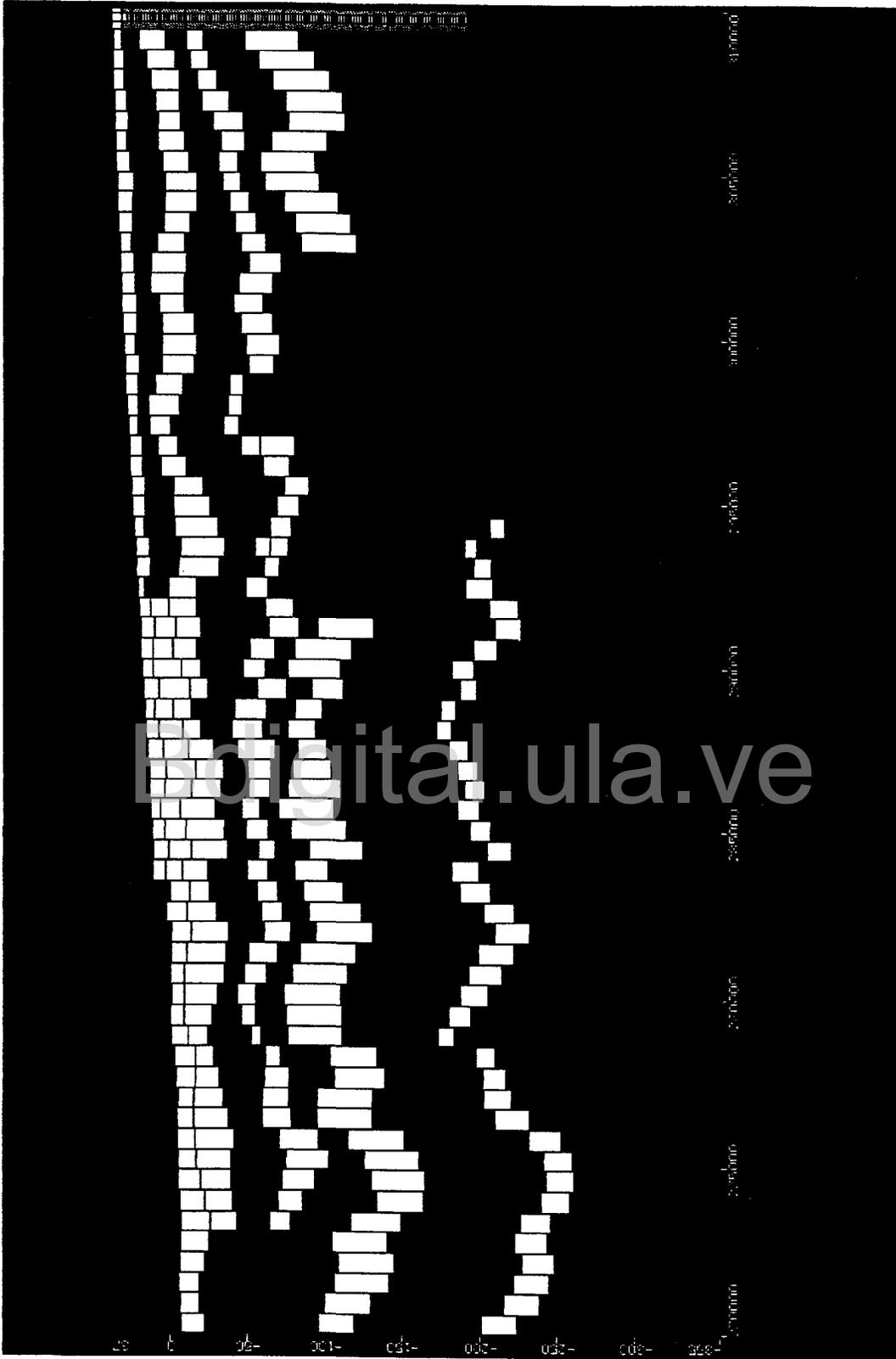
Visual MODFLOW PLANICIE

Start

Conductivity edit module

11:59

- View Column
- View Row
- View Layer
- Goto
- Previous
- Next
- Assign Single
- Assign Polygon
- Assign Window
- Edit Single
- Edit Property
- Copy Row
- Database



X : 2779730  
 Y : 1045737.7  
 Z : -421.5  
 Row (I): 60  
 Column (J):  
 Layer (K):

F1 ? Help  
 F2 h  
 F3 Save  
 F4 Map  
 F5 Zoom In  
 F6 Zoom Out  
 F7 Pan  
 F8 Vert Exchange  
 F9 Overlay  
 F10 Main Menu

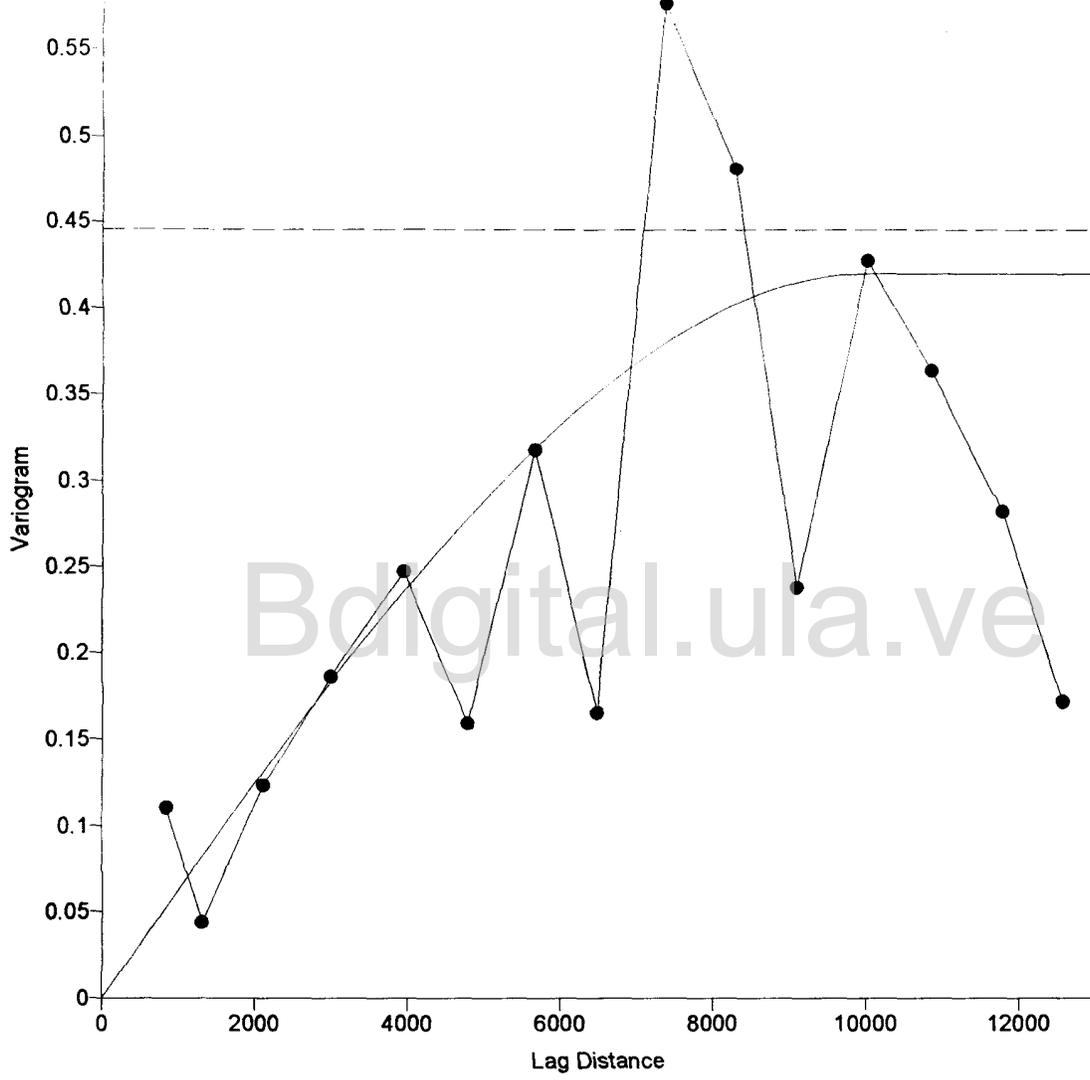
Connectivity edit module



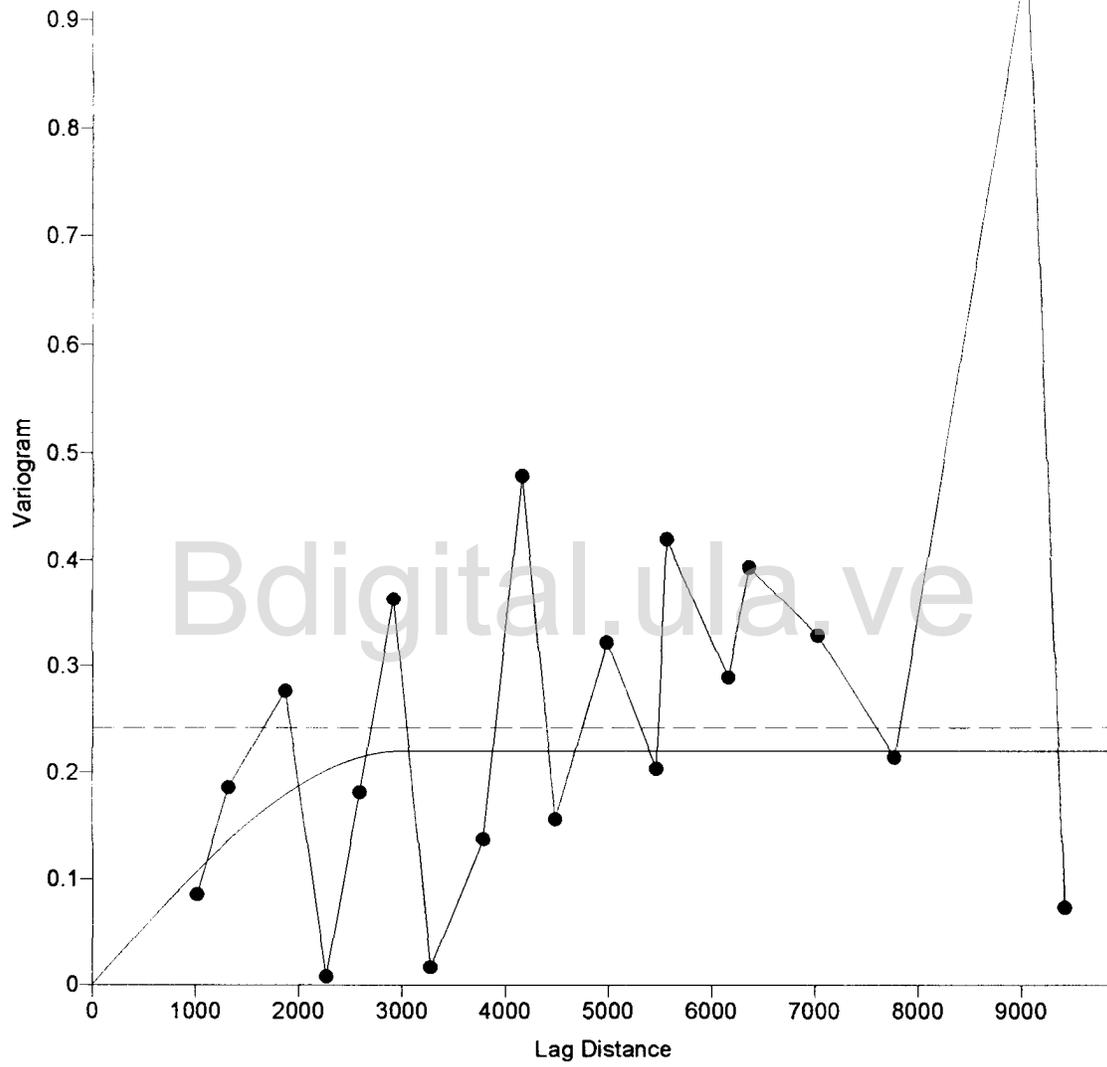
Visual M... PLANICE...

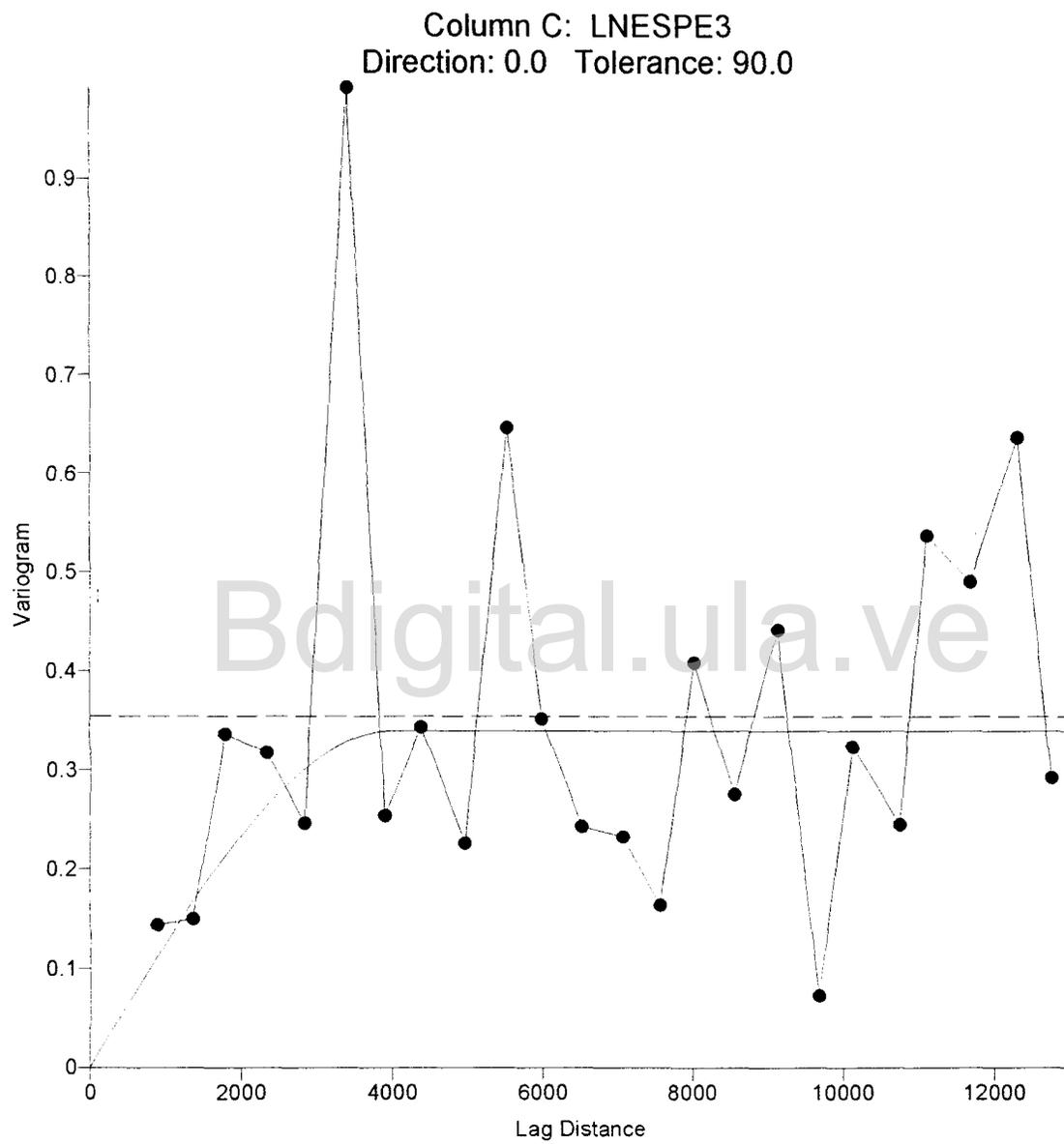
Original.ula.ve

Column C: LNESPE1  
Direction: 0.0 Tolerance: 90.0

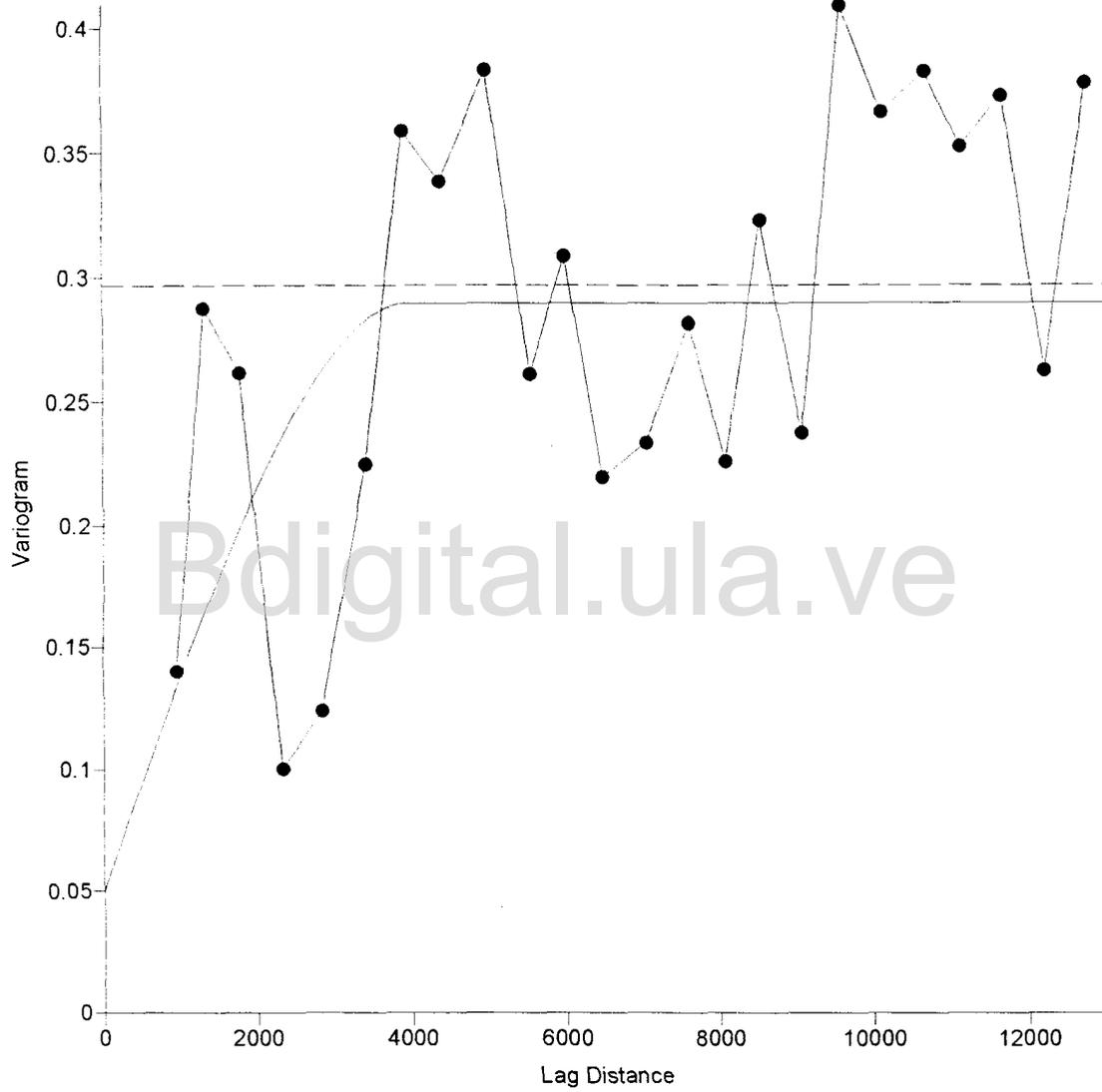


Column C: LNESPE2  
Direction: 0.0 Tolerance: 90.0

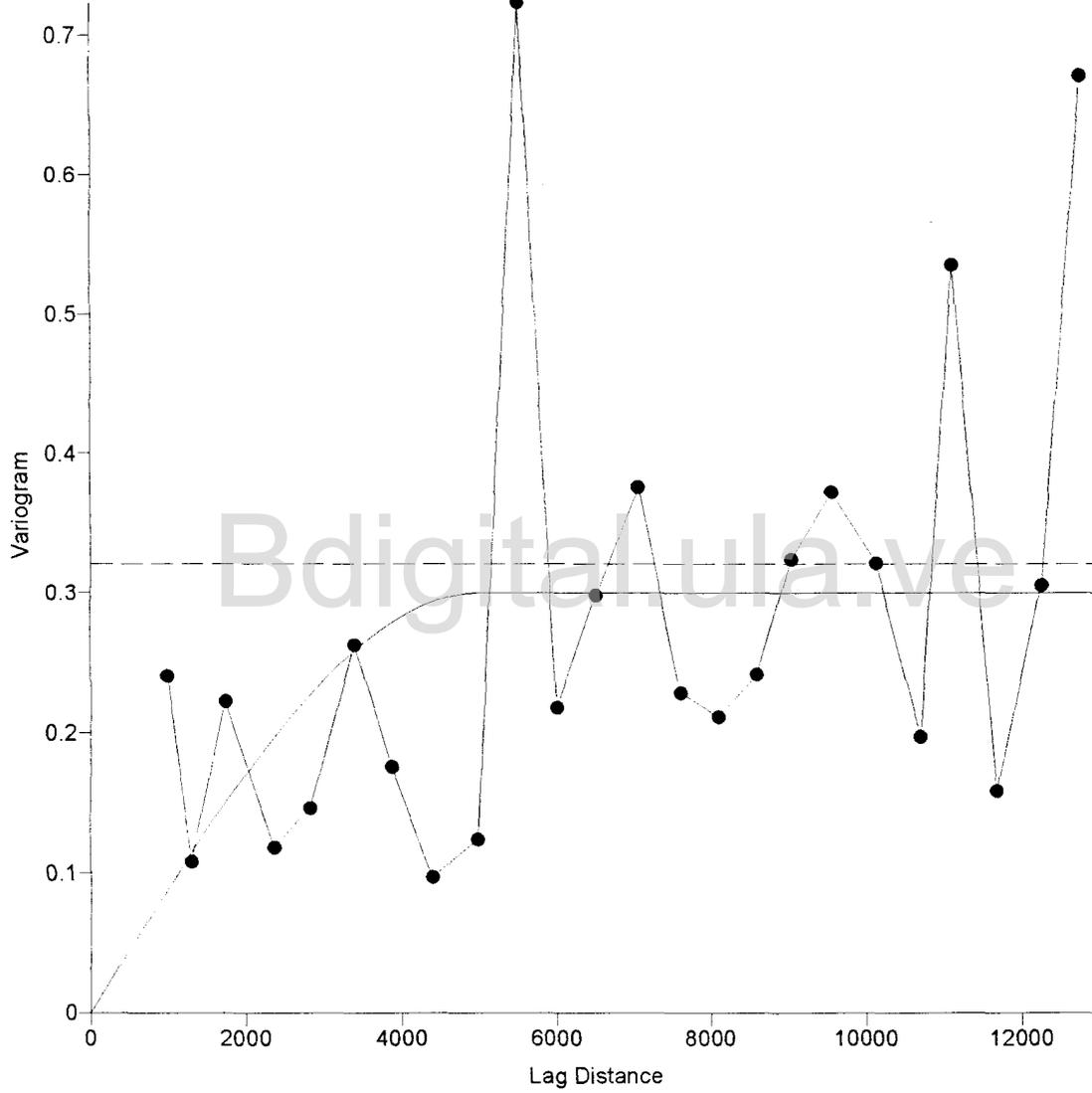




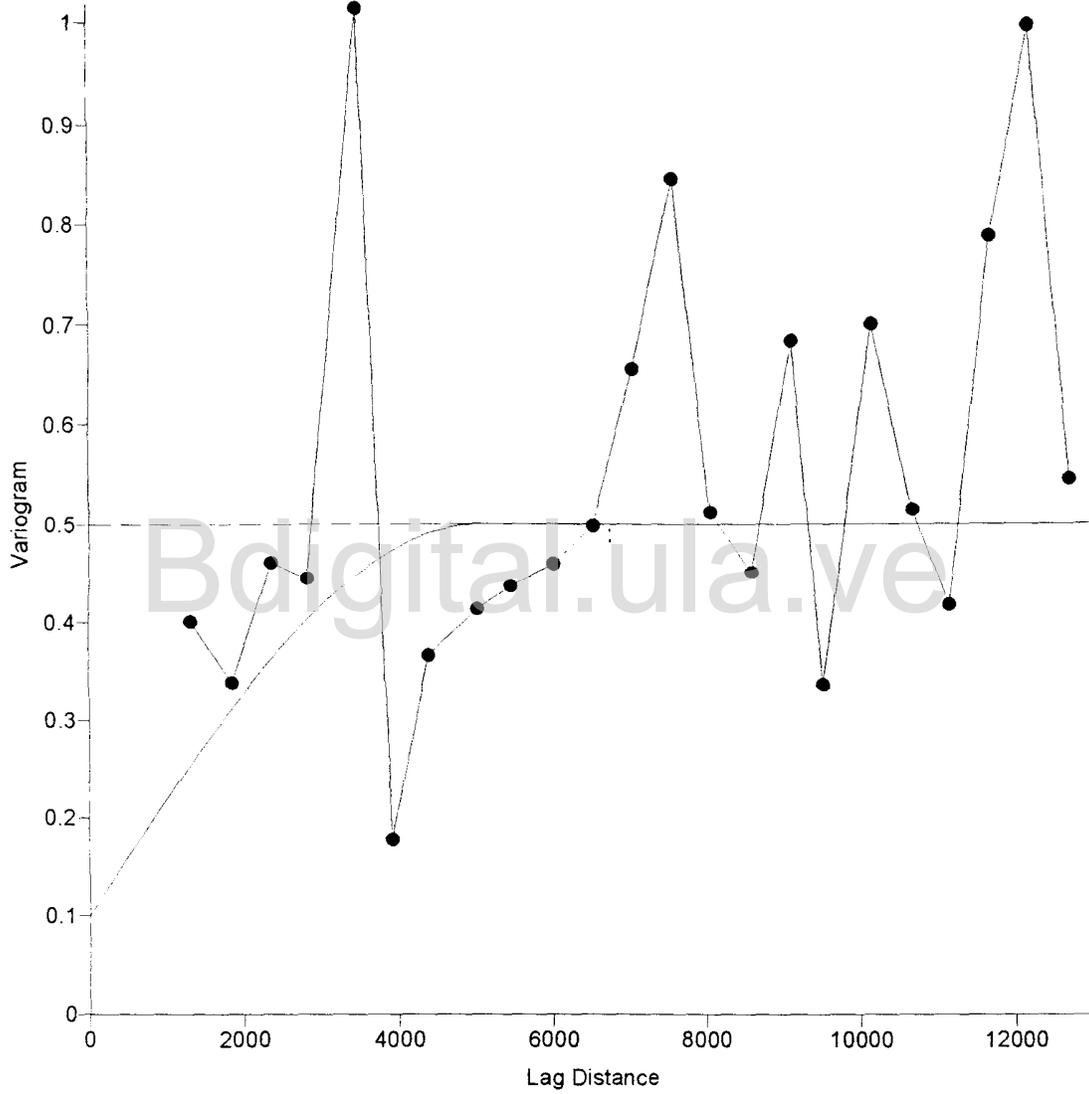
Column C: LNESPE4  
Direction: 0.0 Tolerance: 90.0

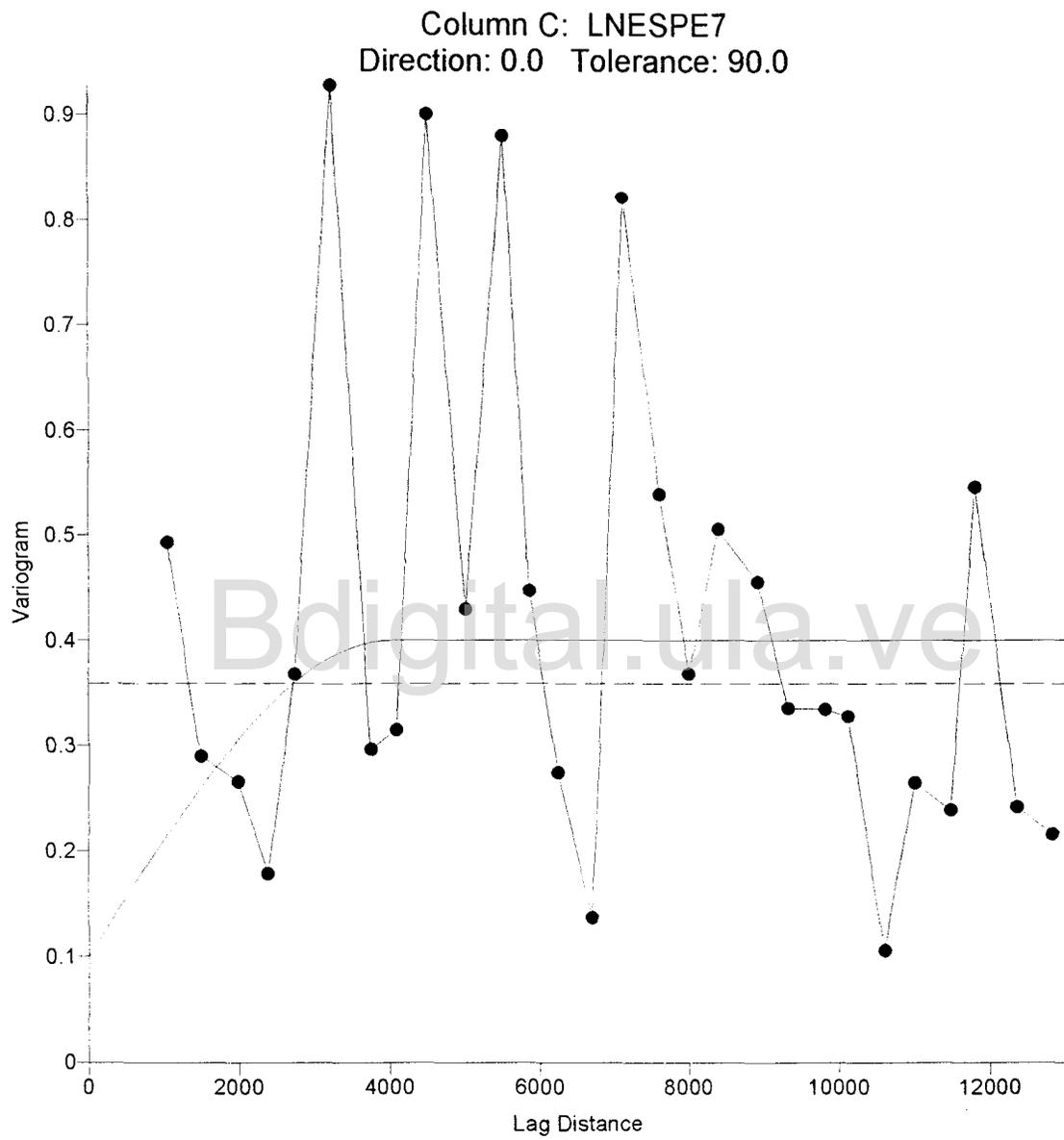


Column C: LNESPE5  
Direction: 0.0 Tolerance: 90.0

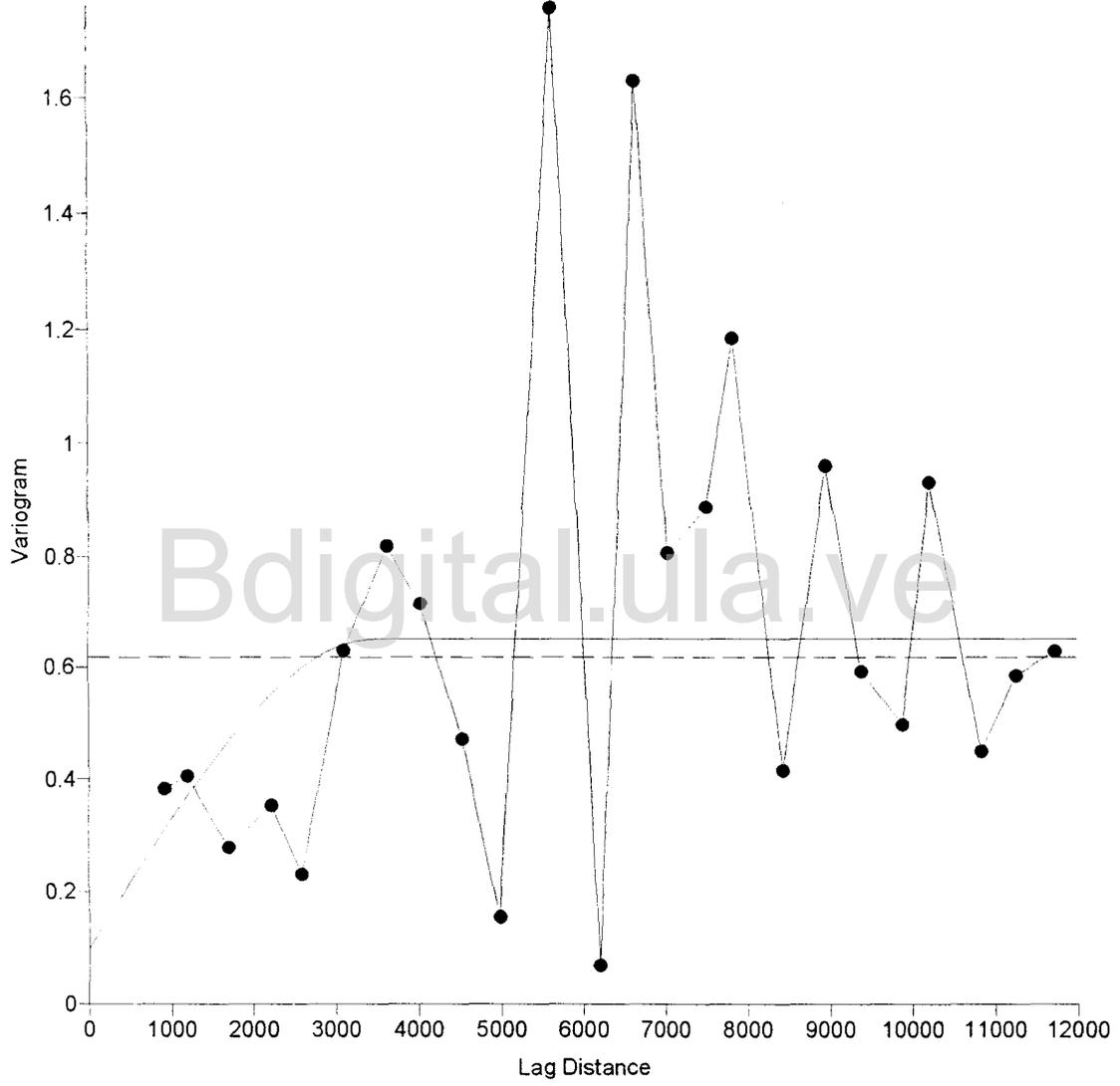


Column C: LNESPE6  
Direction: 0.0 Tolerance: 90.0

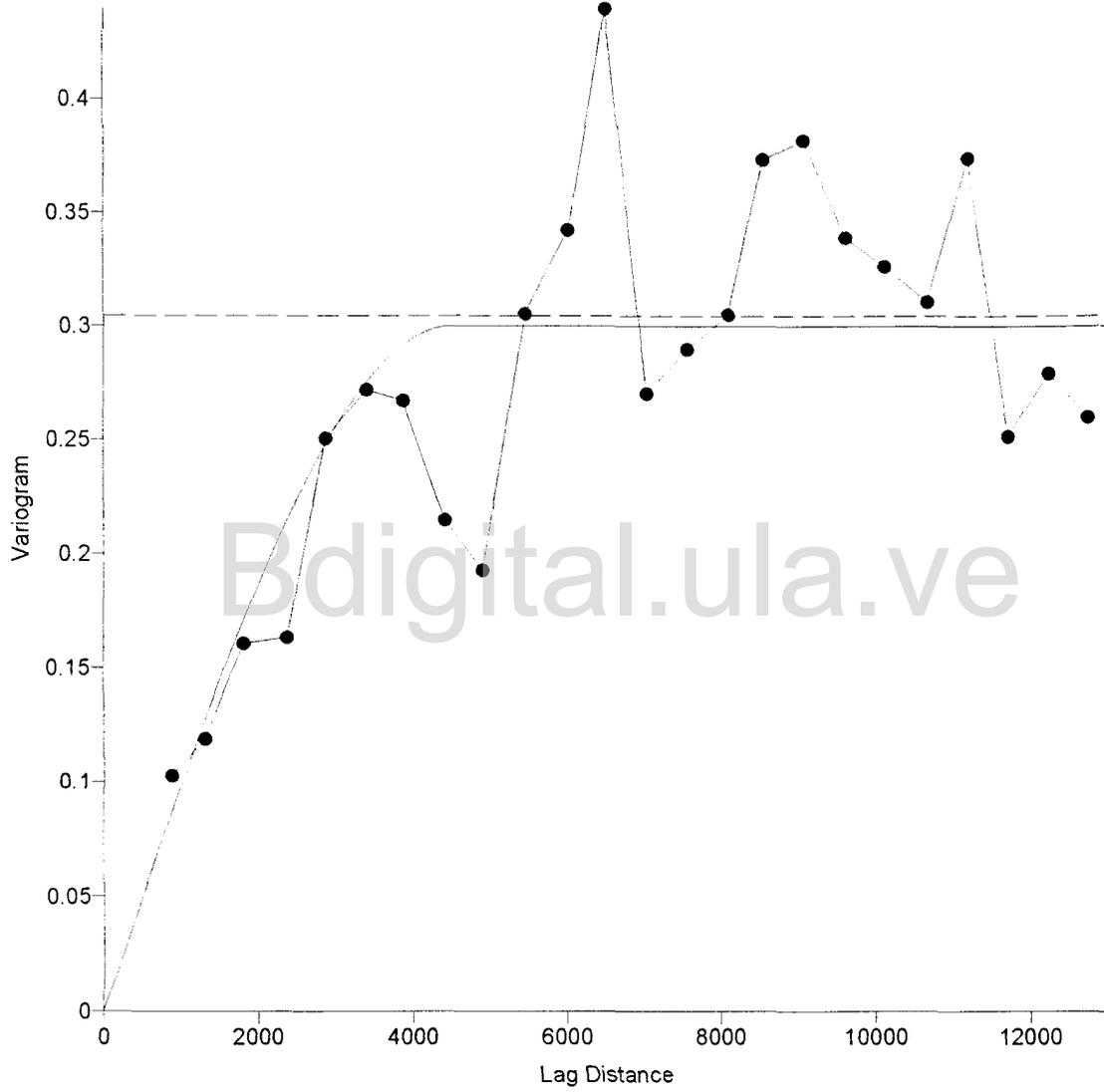




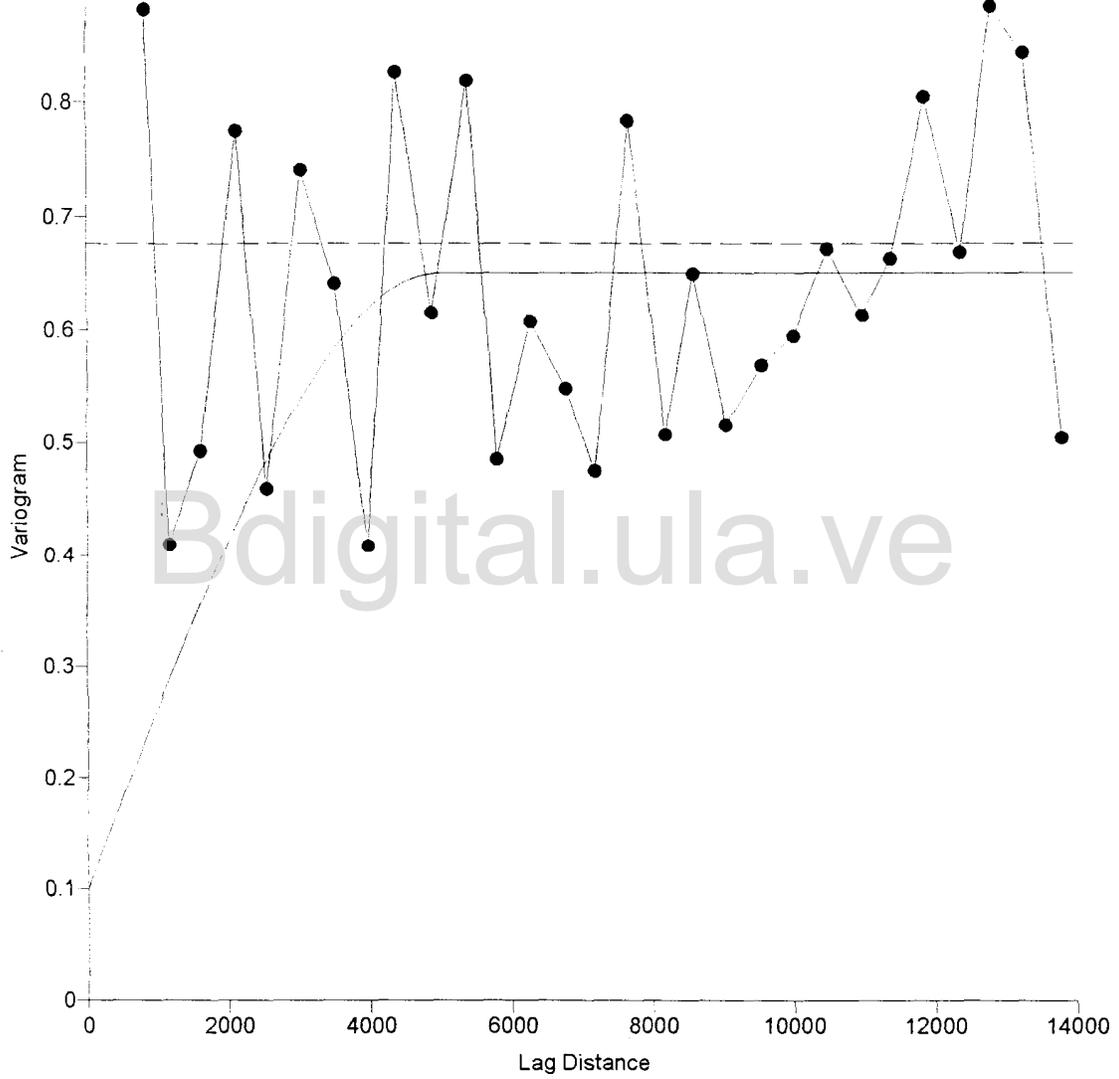
Column C: LNESPE8  
Direction: 0.0 Tolerance: 90.0



Column C: LNESPE8  
Direction: 0.0 Tolerance: 90.0



Column C: LNESPE10  
Direction: 0.0 Tolerance: 90.0



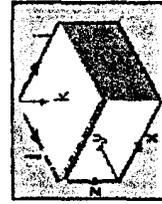
EQUIPOTENCIALES Y DIRECCION DE VELOCIDAD EN CAUIFRO PLANICIE.

CAPA 1

Visual MODFLOW - [ c:\vmodm\planicie.vmf ]

File Contours Velocities Pathlines Zbud Annotate Help

- View Column
- View Row
- View Layer
- Goto
- Options
- Time
- Inspect Cell
- Select
- Calc. vs. Obs.
- [Esc] Layer



X: Y: Z:  
Row (I):  
Column (J):  
Layer (K): 1

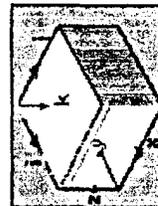
F1 Help  
F2 ...  
F3 Save  
F4 Map  
F5 Zoom in  
F6 Zoom out  
F7 Pan  
F8 Vert. Drag  
F9 Over Lay  
F10 Main Menu

Output Time : 1.00000 (day) Stress period : 1 Time step : 1

Visual MODFLOW - [c:\vmodht\planicie.vmt]

File Contours Velocities Eshlines Zbud Annotate Help

- View Column
- View Flow
- View Layer
- Goto [F5]
- Options
- Time
  - Previous
  - Next
- Inspect Cell
- Select
- Calc. vs. Obs.
- Export Layer



X: 276425.1

Y: 1070748.8

Z: -18.2

Row (I): 9

Column (J): 11

Layer (K): 2

Output Time: 1.00000 (day) Stress period: 1 Time step: 1

F1 Help F2 F3 Save F4 Map F5 Zoom in F6 Zoom out F7 Pan F8 Vert exag F9 Over Lay F10 Main Menu



Visual M... PLANICIE...



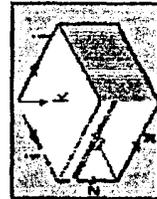
11:47

Visual MODELFLOW - [ c:\vmod\planicie.vmf ] File Contours Velocities Pathlines Zbud Annotate Help

- View Column
- View Row
- View Layer
- Goto [Navi]
- Options
- Time
- Previous
- Next
- Inspect Cell
- Select
- Calc. vs. Obs.
- Export Layer



Bdigital.ula.ve



X: 272801.9  
 Y: 1071763.3  
 Z: 40.1  
 Row (I): 7  
 Column (J): 5  
 Layer (K): 3

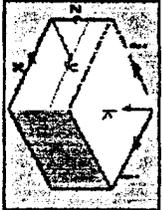
- F1 Help
- F2 [?]
- F3 Save
- F4 Map
- F5 Zoom in
- F6 Zoom out
- F7 Pan
- F8 Vert. exag.
- F9 Over Lay
- F10 Main Menu

Output Time : 1.00000 [day] Stress period : 1 Time step : 1

Visual MODFLOW - [c:\ymodfl\planicie.vmf]

File Contours Velocities Pathlines Zbud Annotate Help

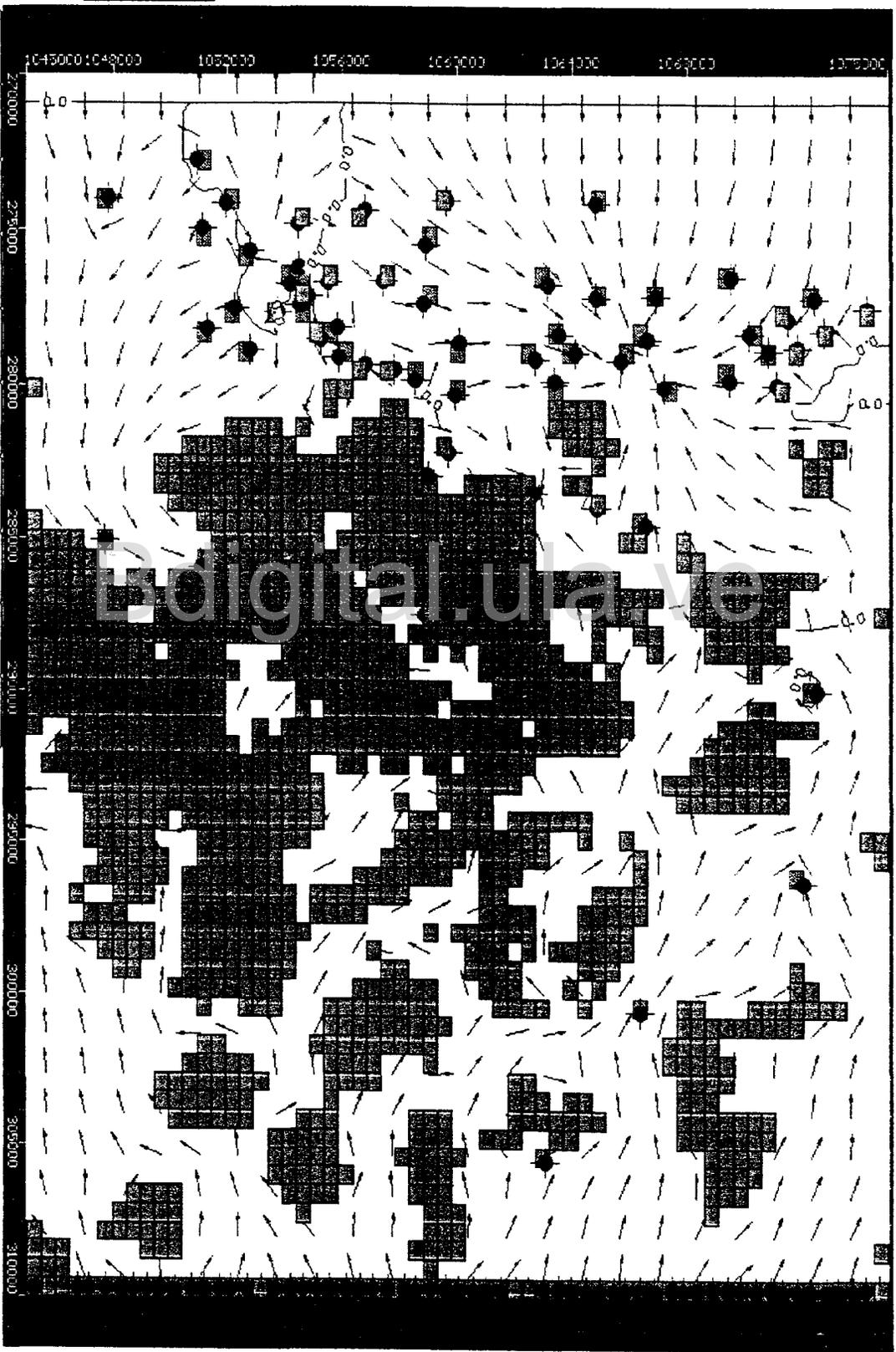
- View Column
- View Row
- View Layer
- Goto [F5]
- Options
  - Time
  - Previous
  - Next
- Inspect Cell
- Select
- Calc vs Obs
- Export Layer



X:   
 Y:   
 Z:

Row (I):   
 Column (J):   
 Layer (K): 4

View next layer/column/row



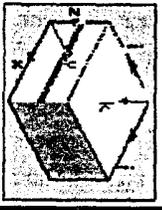
Start

Visual M... PLANICIE... 11:50

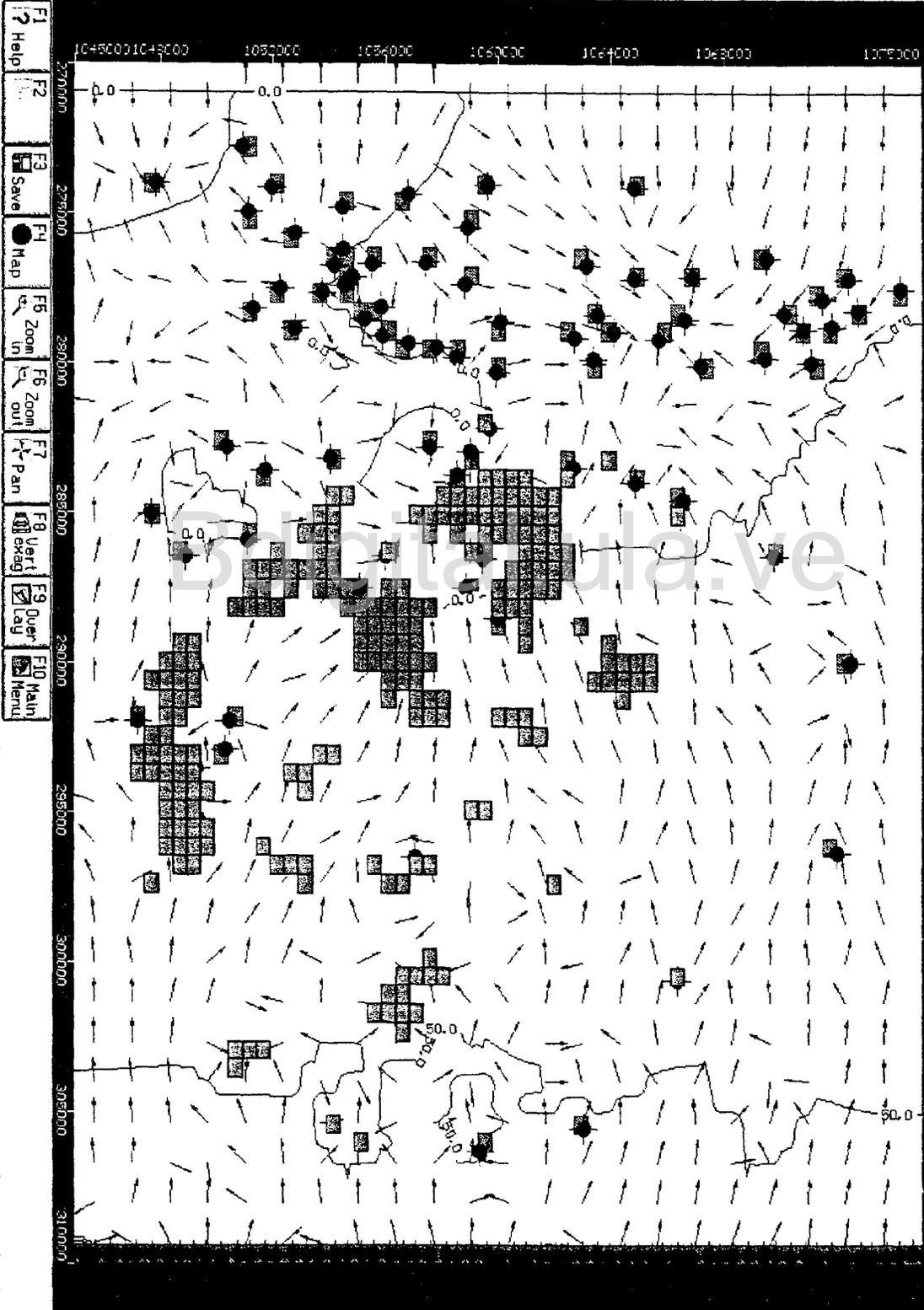
Visual MODELW - [ c:\vmod\k\planice.vmf ]

File Contours Velocities Pathlines Zbud Animate Help

- View Column
- View Row
- View Layer
- Go to (X/Y/Z)
- Options
  - Time
  - Previous
  - Next
- Inspect Cell
- Select
- Calc. vs. Obs
- Export Layer



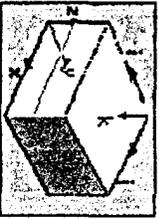
X:  
Y:  
Z:  
Row (I):  
Column (J):  
Layer (K):



Visual MODFLOW - [c:\modnl\planice.vml]

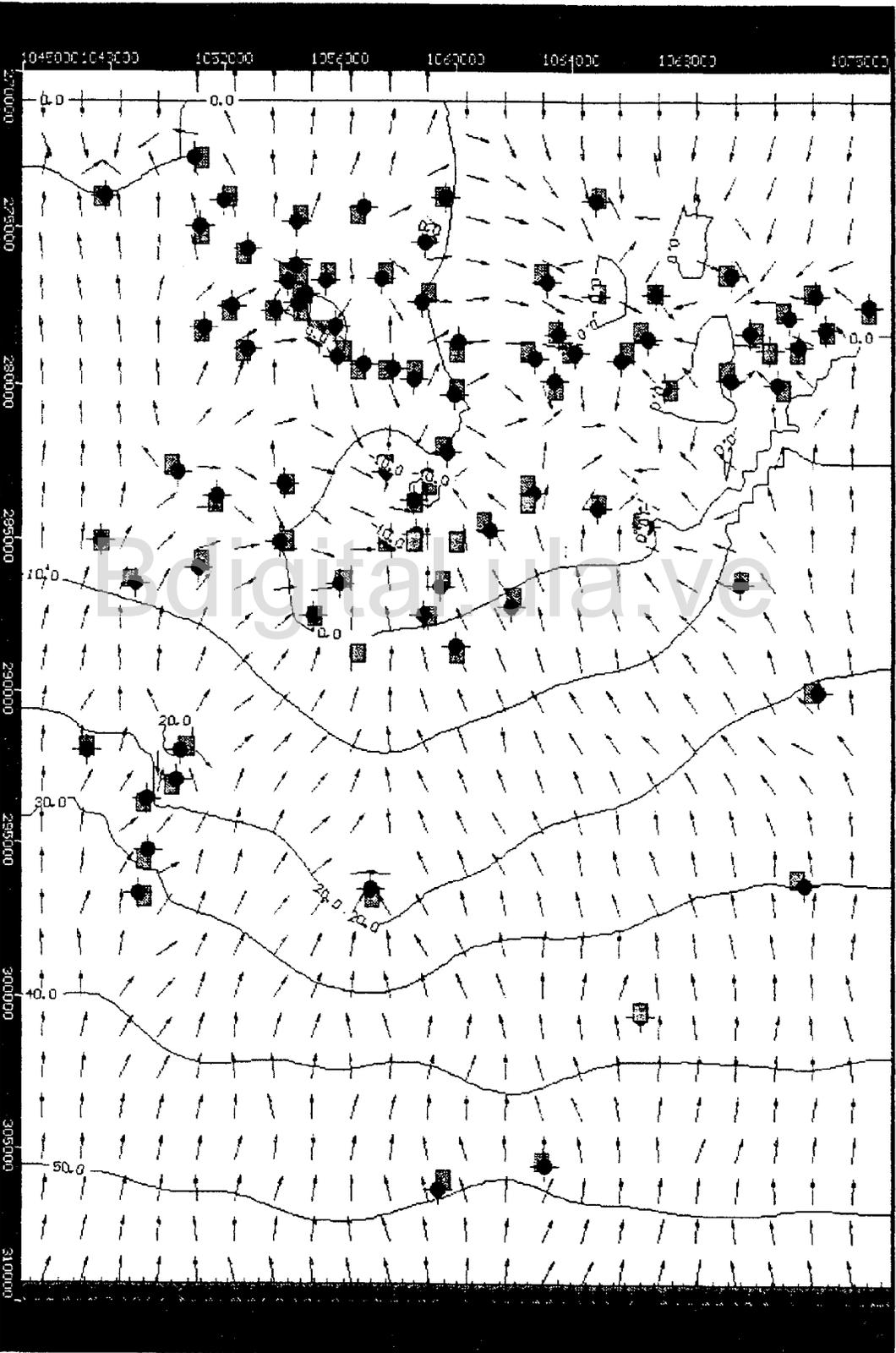
File Contours Velocities Pathlines Zbud Annotate Help

- View Column
- View Row
- View Layer
- Go to (X/Y/Z)
- Options
  - Time
  - Previous
  - Next
- Inspect Cell
- Select
- Calc. vs. Obs.
- Export Layer



X : 273623.2  
 Y : 1057560.4  
 Z : 101.0  
 Row (I) : 36  
 Column (J) : 6  
 Layer (K) : 6

Output Time : 1.00000 (day) Stress period : 1 Time step : 1



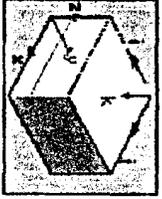
- F1 Help
- F2 [Symbol]
- F3 Save
- F4 Map
- F5 Zoom In
- F6 Zoom Out
- F7 Pan
- F8 Vert. Exag.
- F9 Over Lay
- F10 Main Menu



Visual MODFLOW - [ c:\modnt\planicie.vnl ]

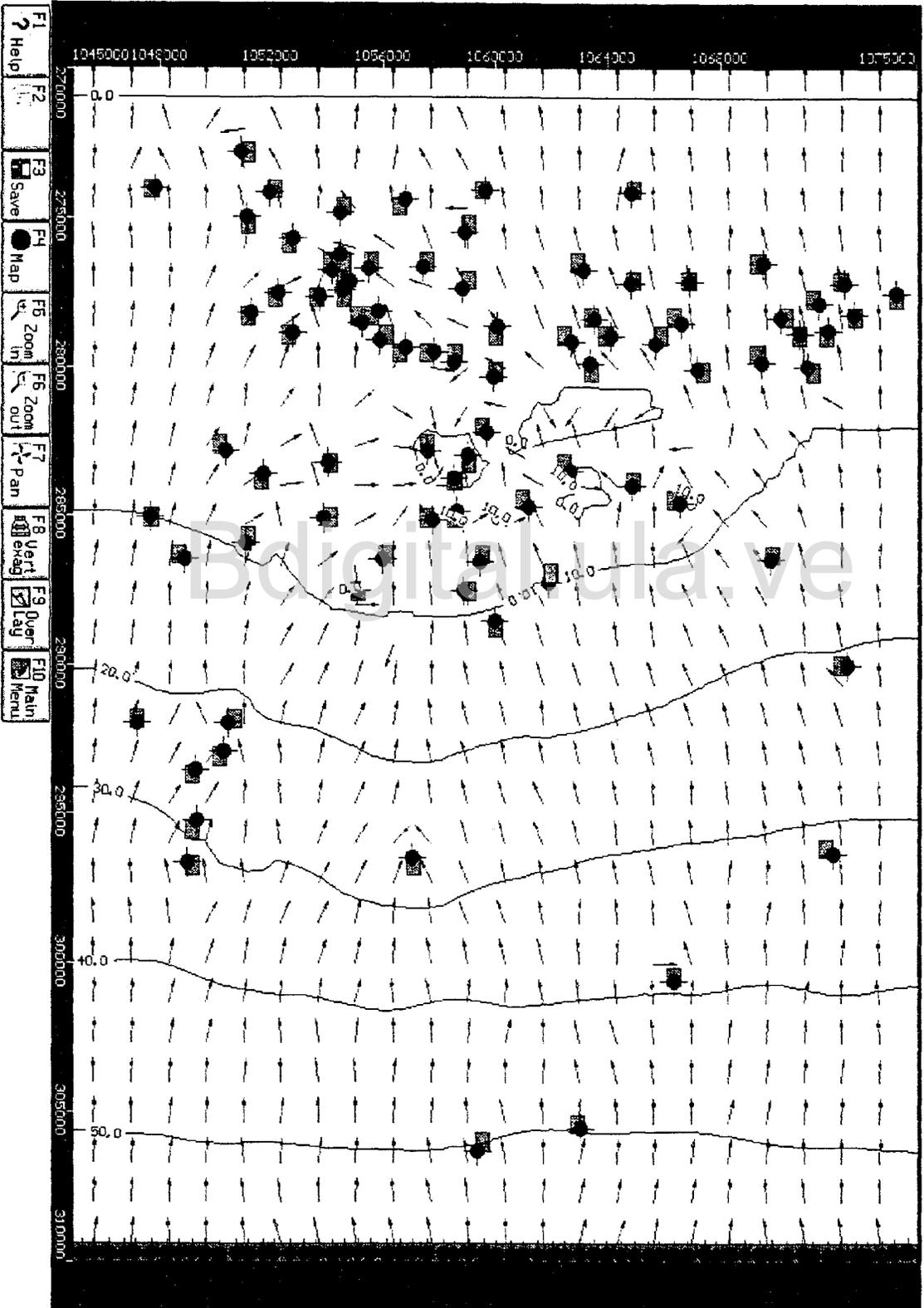
File Contours Velocities Pathlines Zbud Annotate Help

- View Column
- View Row
- View Layer
- Go to (N/F)
- Options
- Time
- Inspect Cell
- Select
- Calc. vs Obs
- Export Layer



X :  
Y :  
Z :  
Row (I):  
Column (J):  
Layer (K):

Output Time : 1.00000 (day) Stress period : 1 Time step : 1



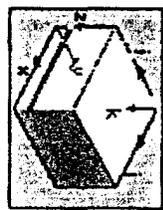
- F1 ? Help
- F2
- F3 Save
- F4 Map
- F5 Zoom in
- F6 Zoom out
- F7 Pan
- F8 Vert. Axis
- F9 Over Lay
- F10 Main Menu

Visual M... PLANICE... 11:52

Visual MODFLOW - [c:\vmod\planicis.vmf]

File Contours Velocities Pathlines Zbud Annulate Help

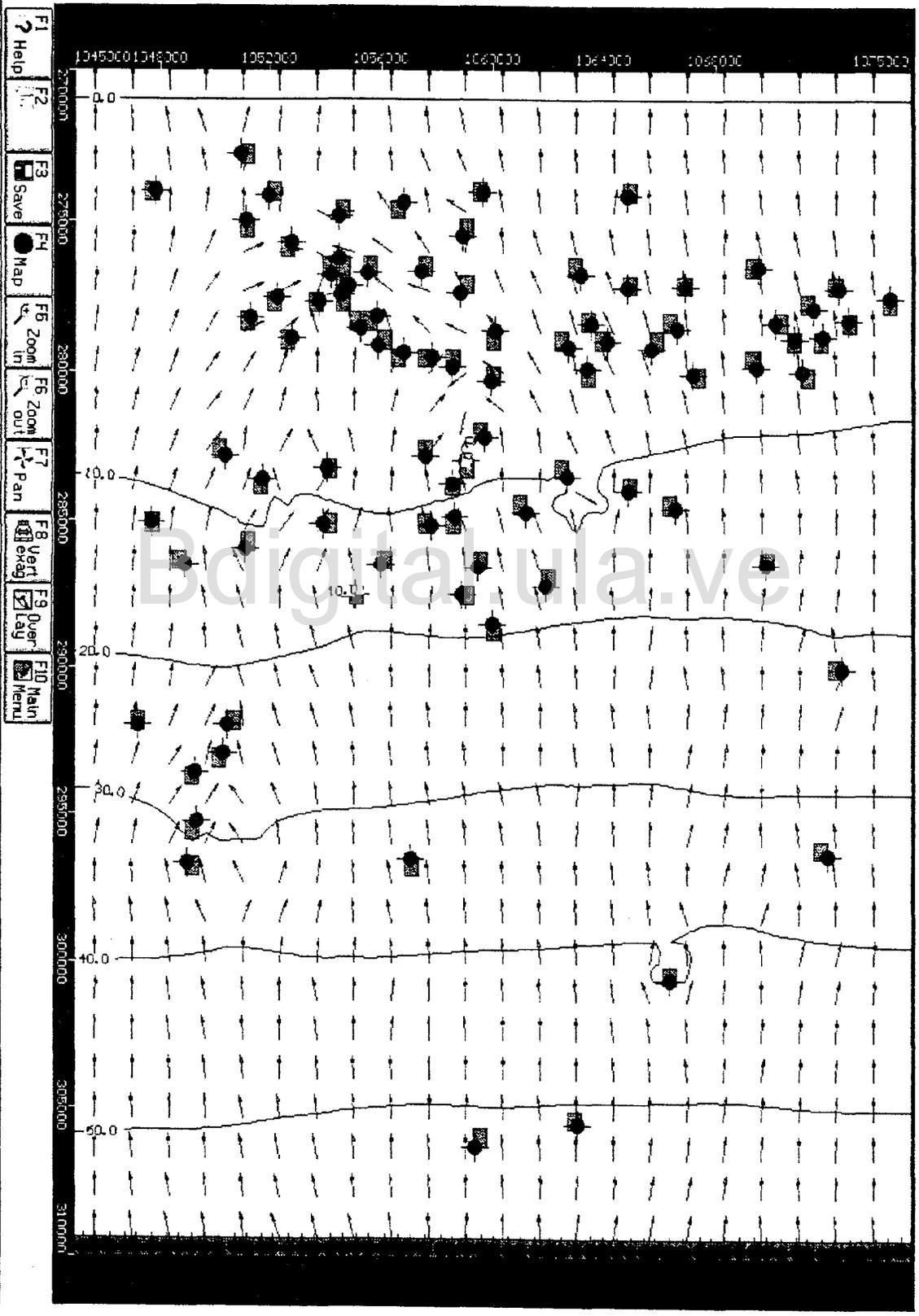
- View Column
- View Row
- View Layer
- Go to (N/E/S)
- Options
  - Time
  - Previous
  - Next
- Inspect Cell
- Select
- Display vs. Time
- Calc. vs. Obs.
- Export Layer



X:  
Y:  
Z:  
Row (I):  
Column (J):  
Layer (K):

Output Time : 1.00000 (day) Stress period : 1 Time step : 1

Start



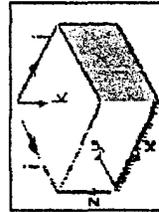
- F1 Help
- F2 [Icon]
- F3 Save
- F4 Map
- F5 Zoom In
- F6 Zoom Out
- F7 Pan
- F8 Vert. Eng.
- F9 Over Lay
- F10 Main Menu

Visual M... PLANICIS... 11:53

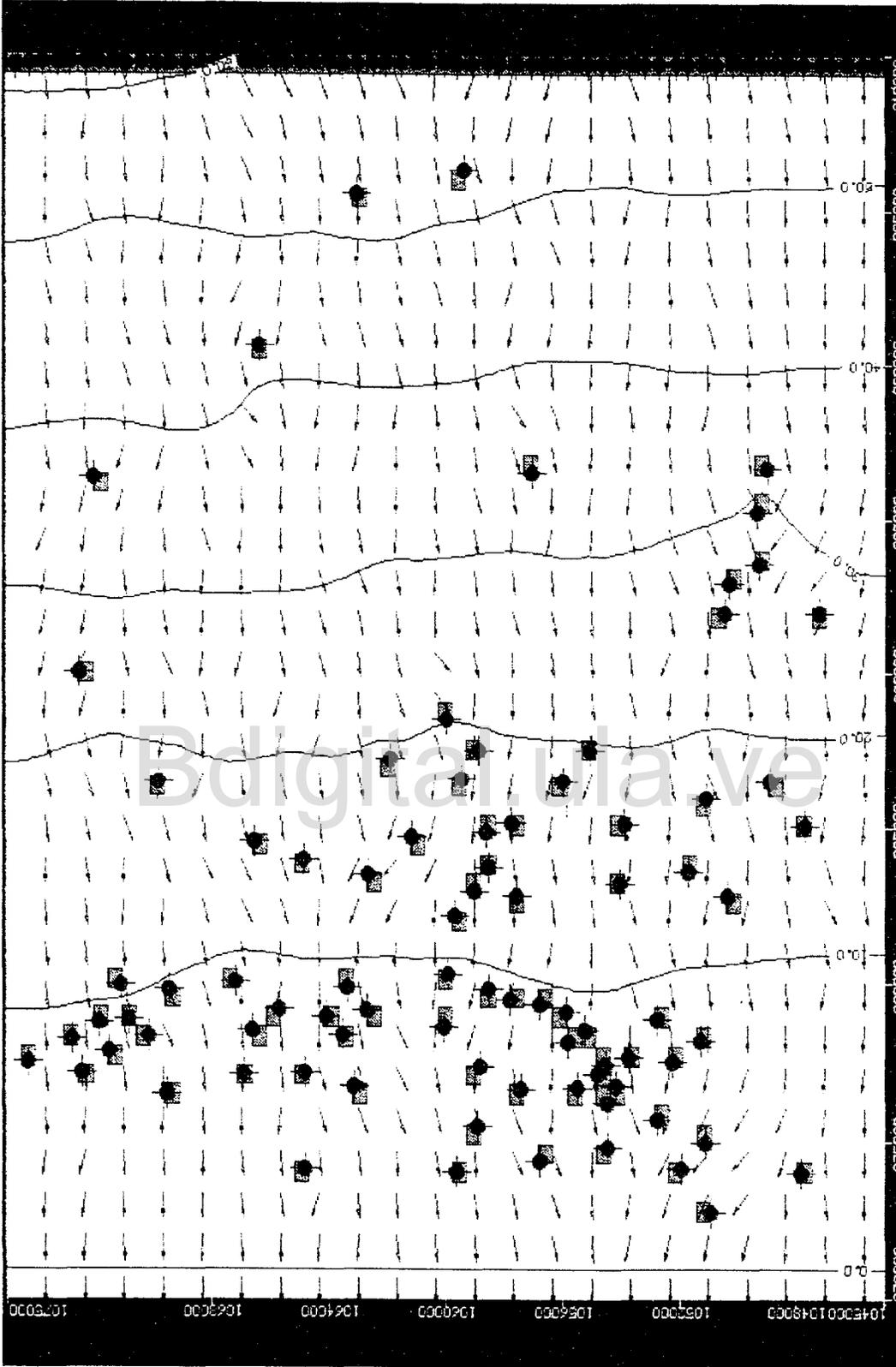


Visual MODFLOW - [c:\vmod\planicie.vml]  
File Contours Velocities Pathlines Zbud Annotate Help

- View Column
- View Row
- View Layer
- Goto [Next]
- Options
- Time Previous Next
- Inspect Cell
- Select
- Calc. vs. Obs.
- Export Layer



X:   
Y:   
Z:   
Row (I):   
Column (J):   
Layer (K): 10



- F1 ? Help
- F2
- F3 Save
- F4 Map
- F5 Zoom in
- F6 Zoom out
- F7 Pan
- F8 User Exag
- F9 Over Lay
- F10 Main Menu

View next layer/column/row



Visual M...

PLANICIE...





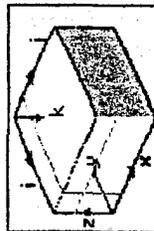
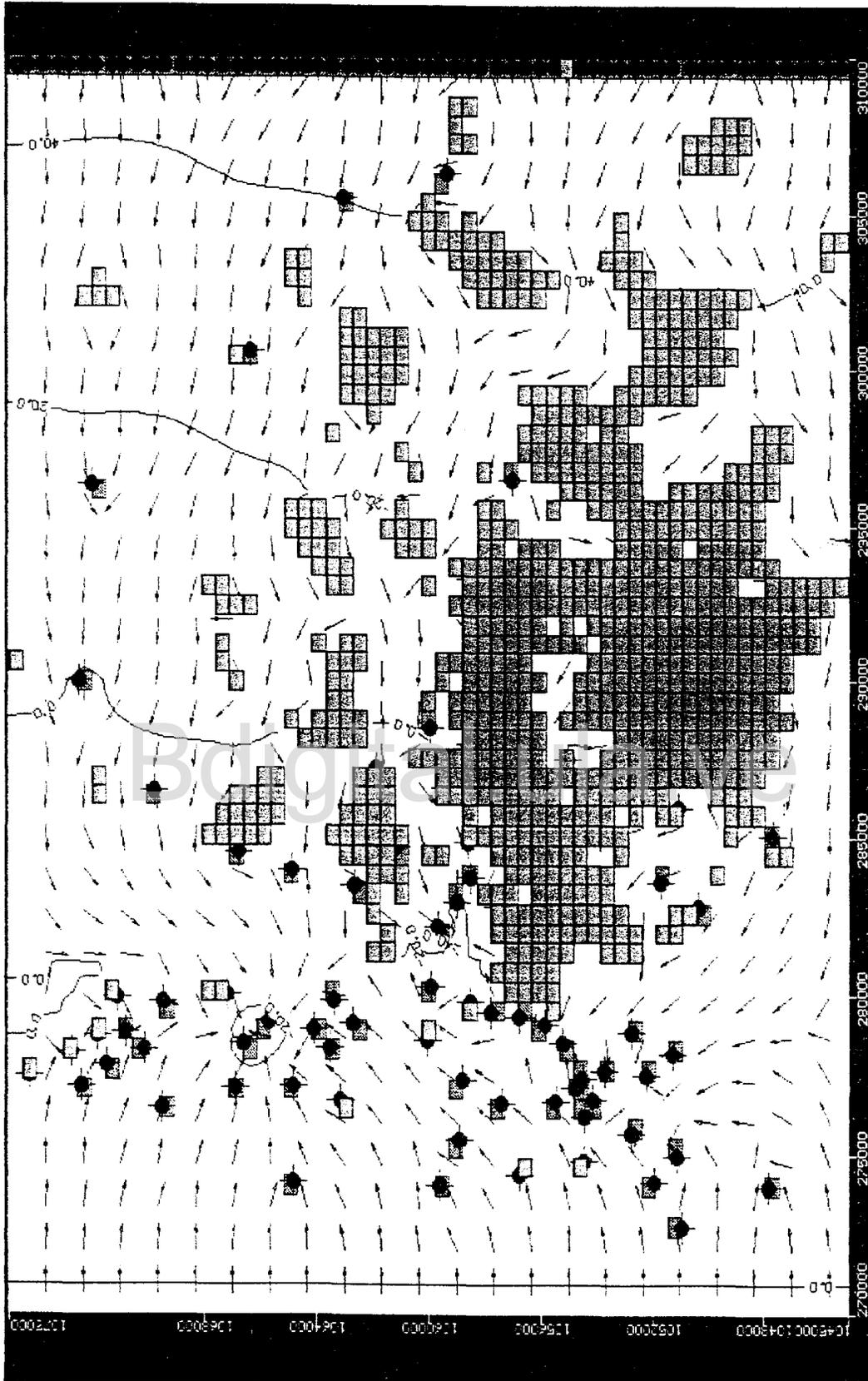


# DIRECCIÓN DE LA VELOCIDAD EN CAPA 4

-[6] X]

Visual MODFLOW - [ c:\vmodfl\modatm.vmt ]  
 File Contours Velocities Pathlines Zbud Annotate Help

- View Column
- View Row
- View Layer
- Goto
- Options
- Time
- Projection
- Direction
- Magnitude
- Inspect Cell



X : 270241.5  
 Y : 1073792.3  
 Z : -59.7

Row (I) : 3  
 Column (J) : 1  
 Layer (K) : 4

Output Time : 1.00000 (day) Stress period : 1 Time step : 1

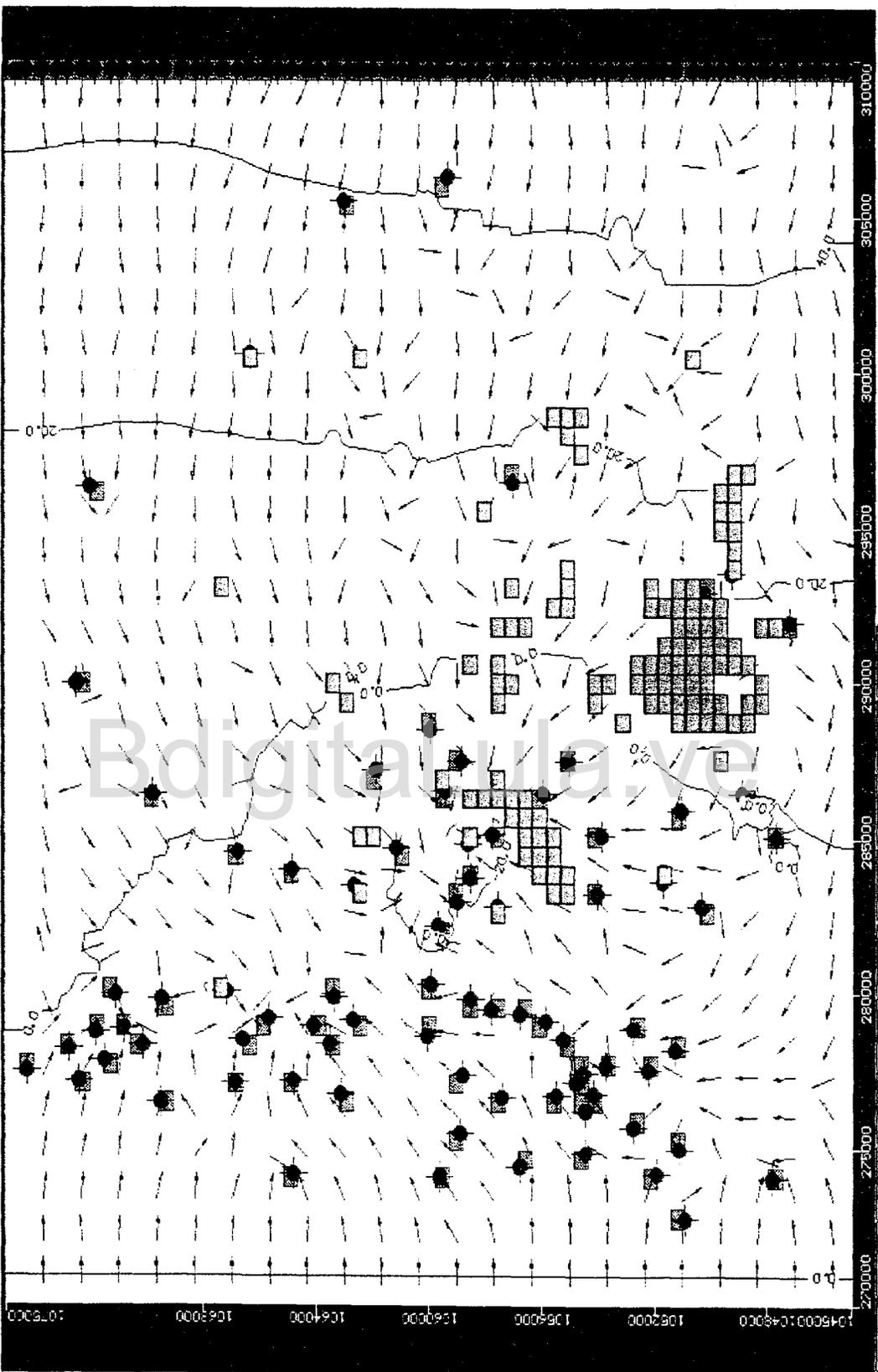
270000 275000 280000 285000 290000 295000 300000 305000 310000

F1 Help  
 F2 [ ]  
 F3 [ ] Save  
 F4 [ ] Map  
 F5 [ ] Zoom In  
 F6 [ ] Zoom Out  
 F7 [ ] Pan  
 F8 [ ] Vert Exag  
 F9 [ ] Over Lay  
 F10 [ ] Main Menu

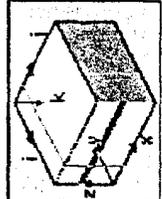
Start  
 Vis...  
 Mot...  
 Indic...  
 10:24

# DIRECCIÓN DE LA VELOCIDAD EN CAPA 5

Visual MODFLOW - [ c:\vmodnt\mofaten.vmf ] File Contours Velocities Bathlines Zbud Annotate Help



- View Column
- View Row
- View Layer
- Goto Previous [Next]
- Options
- Time Previous Next
- Protection
- Direction
- Magnitude
- Inspect Cell



X: Y: Z:  
 Row (I):  
 Column (J):  
 Layer (K): 5

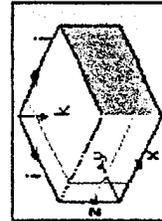
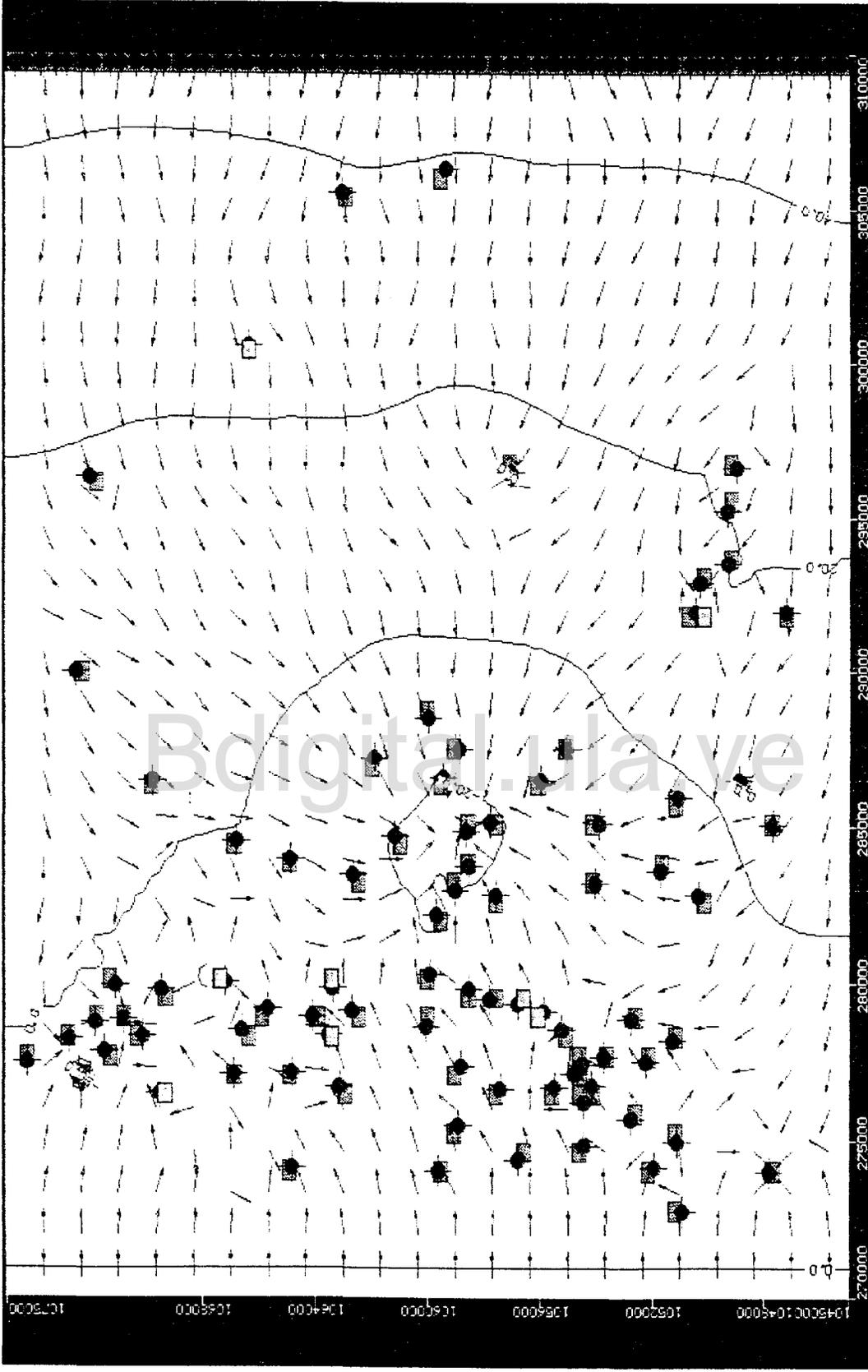
F1 Help F2 F3 Save F4 Map F5 Zoom In F6 Zoom Out F7 Pan F8 Vert Exag F9 Overlay F10 Main Menu

View next layer/column/row Start [Navigation icons] Vis... Mot... Indic... [Navigation icons] 10:25

# DIRECCIÓN DE LA VELOCIDAD EN CAPA 6

Visual MODFLOW - [ c:\modflw\modflw.vmf ] File Contours Velocities Pathlines Zbud Annotate Help

- View Column
- View Row
- View Layer
- Goto
- Options
- Time
- Projection
- Direction
- Magnitude
- Inspect Cell



X: Row (I):  
 Y: Column (J):  
 Z: Layer (K): 6

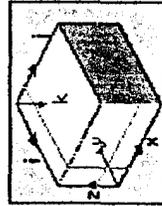
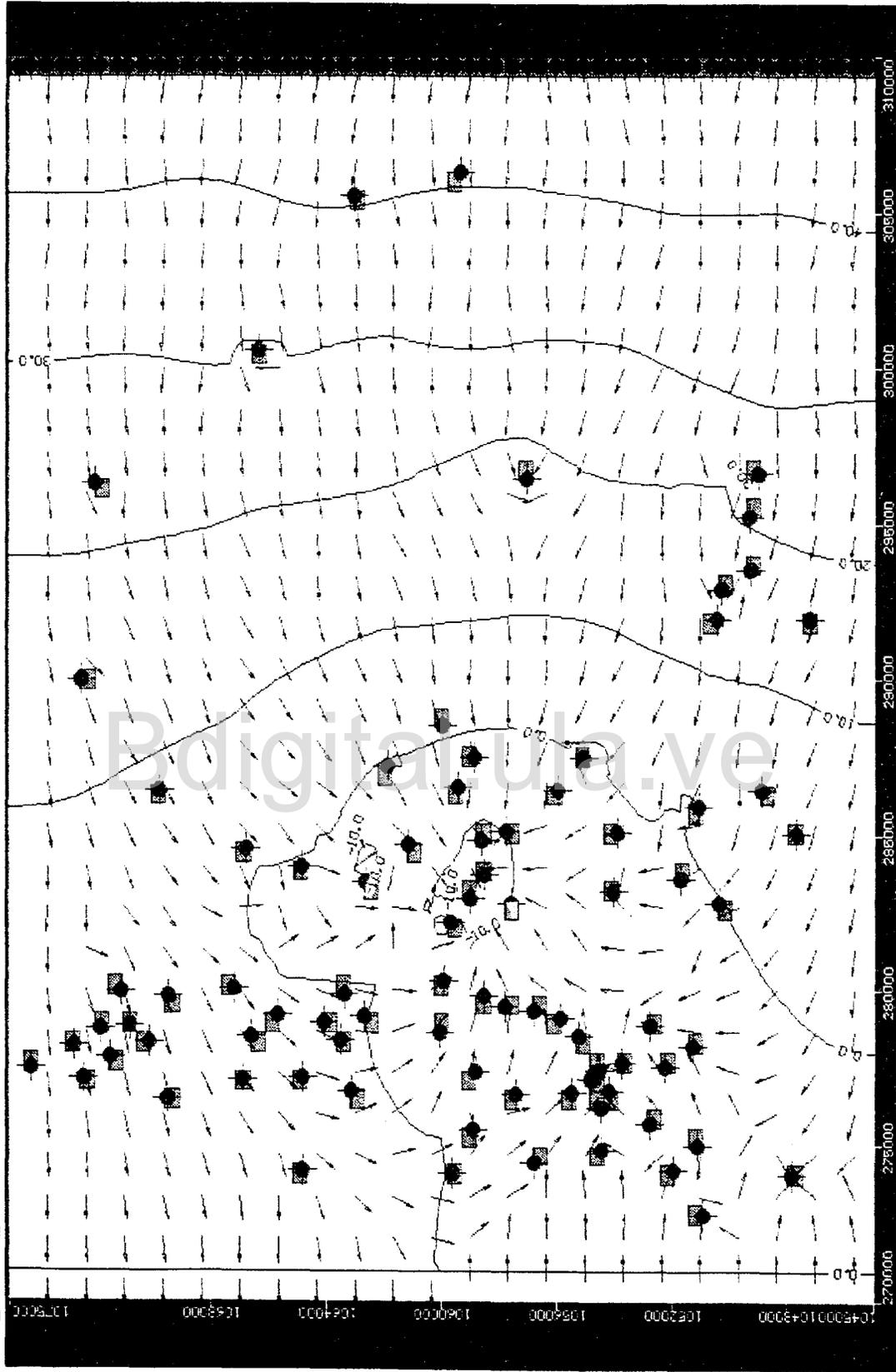
F1 Help  
 F2  
 F3 Save  
 F4 Map  
 F5 Zoom In  
 F6 Zoom Out  
 F7 Pan  
 F8 User Exag  
 F9 Over Lay  
 F10 Main Menu

View next layer/column/row

# DIRECCIÓN DE LA VELOCIDAD EN CAPA 7

Visual MODELFLOW - [ c:\vmodht\moflatm.vml ] File Contours Velocities Bathlines Zbud Annotate Help

- View Column
- View Row
- View Layer
- Goto Previous [N]
- Options Previous Next
- Time
- Projection
- Direction
- Magnitude
- Inspect Cell



X: Y: Z:  
 Row (I):  
 Column (J):  
 Layer (K): 7

F1 ? Help  
 F2  
 F3 Save  
 F4 Map  
 F5 Zoom In  
 F6 Zoom Out  
 F7 Pan  
 F8 Vert Exag  
 F9 Over Lay  
 F10 Main Menu

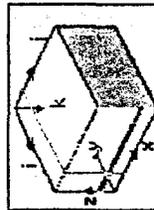
View next layer/column/row

DIRECCIÓN DE LA VELOCIDAD EN CAPA 8

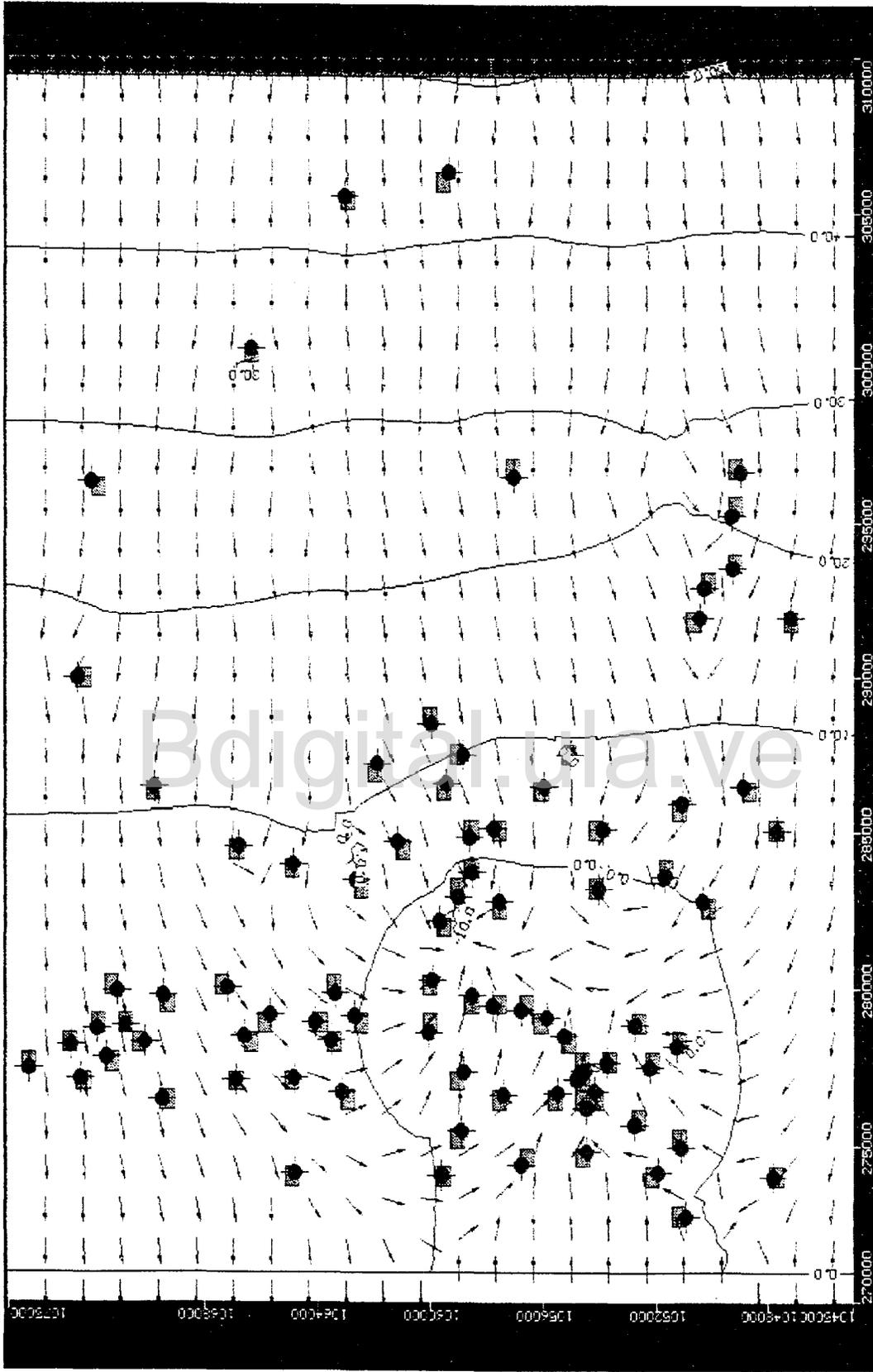
- [E] [X]

Visual MODFLOW - [ c:\vmodnt\imptatort.vmf ]  
 File Contours Velocities Pathlines Zbud Annotate Help

- View Column
- View Row
- View Layer
- Goto [G] [R]
- Options
- Time Previous Next
- Projection
- Direction
- Magnitude
- Inspect Cell



X Y Z  
 Flow (I)  
 Column (J):  
 Layer (K): 8



270000 275000 280000 285000 290000 295000 300000 305000 310000

F1 [?] Help F2 F3 Save F4 Map F5 Zoom in F6 Zoom out F7 Pan F8 Vert extag F9 Over Lay F10 Main Menu

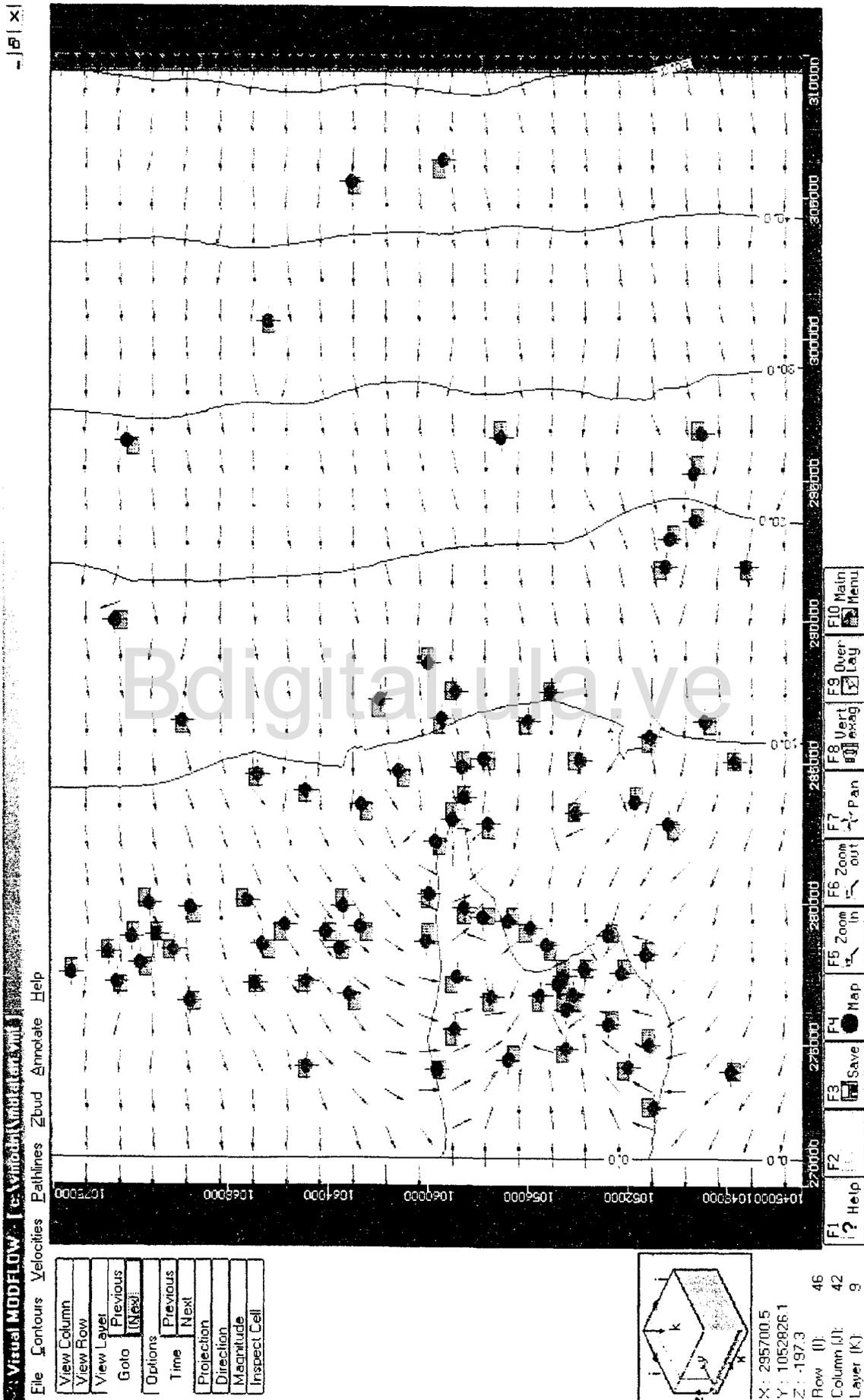
View next layer/column/row



Vis... Mot... Indic...

10:27

# DIRECCIÓN DE LA VELOCIDAD EN CAPA 9

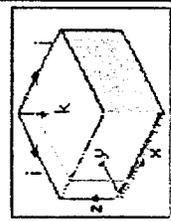
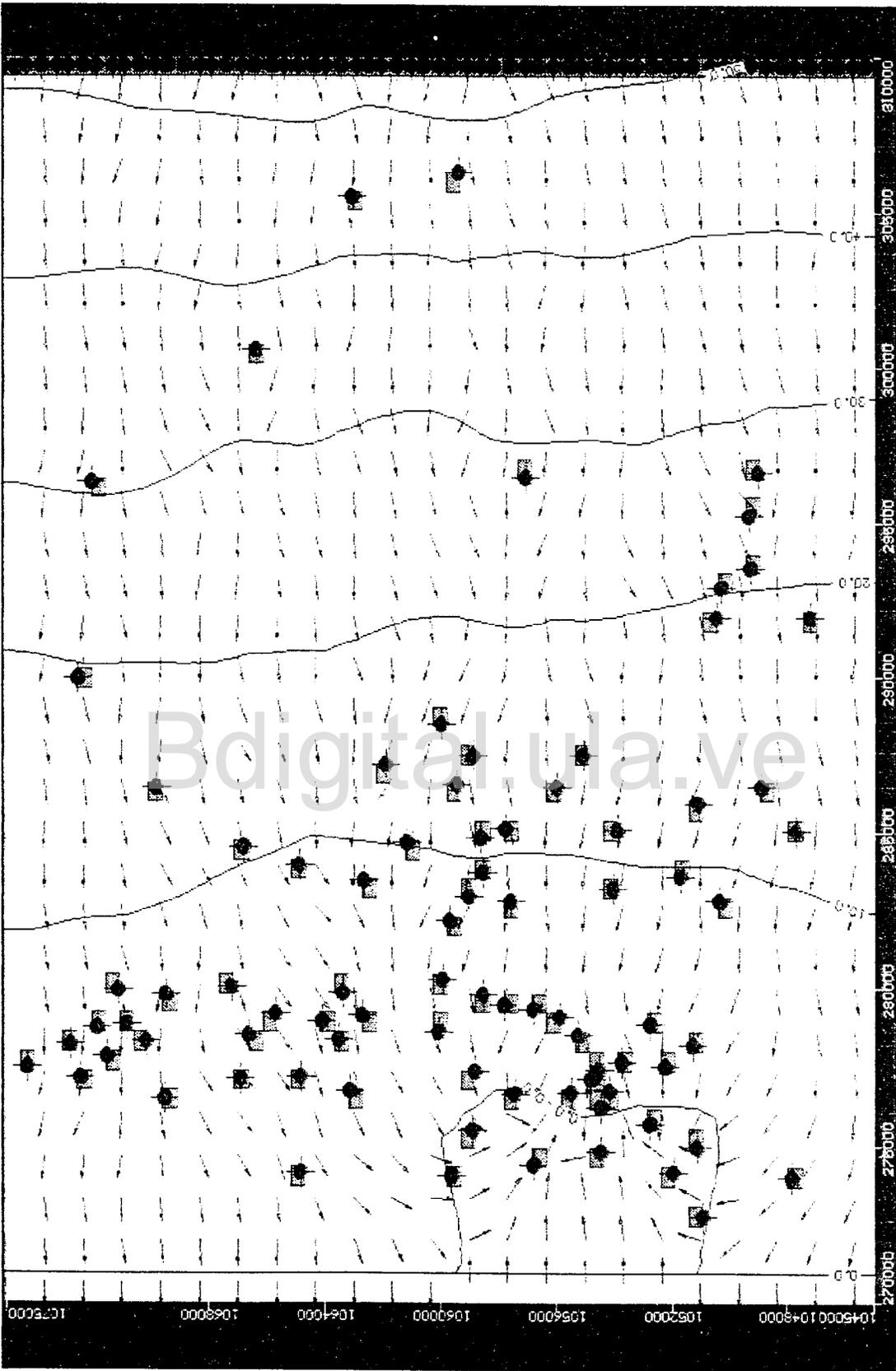


DIRECCIÓN DE LA VELOCIDAD EN CAPA 10

[-] [P] [X]

Visual MODFLOW - [c:\vmod\modflow\src\m] Pathlines Zbud Annotate Help

- View Column
- View Row
- View Layer
- Previous [New]
- Goto
- Options
- Time Previous Next
- Projection
- Direction
- Magnitude
- Inspect Cell



X: Y: Z:  
 Row (I) 10  
 Column (J):  
 Layer (K):

F1 ? Help  
 F2  
 F3 Save  
 F4 Map  
 F5 Zoom in  
 F6 Zoom out  
 F7 Pan  
 F8 Vert. exag.  
 F9 Over Lay  
 F10 Main Menu

View next layer/column/row

## APÉNDICE A

### CONCEPTOS ESTADÍSTICOS BÁSICOS

#### **Espacio Muestral.**

Es el conjunto de todos los resultados posibles de un experimento. El espacio muestral puede ser finito infinito y discreto e infinito y no discretizable.

#### **Variable Aleatoria**

Es la función real valorada definida en un espacio muestral. Los puntos de muestras son las variables independientes

En esta definición se debe observar que la variable aleatoria  $x$  es una función. En notación matemática una función se indica así:

$$Y = f(x)$$

en la que  $x$  es la variable independiente e  $Y$  el valor de la función  $f(x)$ . Por ejemplo si se tiene,  $Y = x + 1$ , se puede escribir la variable aleatoria  $x$  como:

$$x = (w)$$

En la que  $w$  es la variable independiente y  $x$  es el valor individual que toma la variable aleatoria  $x(w)$ . Entonces, según la definición  $w$  es el conjunto de puntos de la muestra del espacio muestral. Es decir que  $x(w)$  está definida para un espacio muestral.

#### **Esperanza Matemática**

La esperanza matemática de una variable  $x$  es la media aritmética ponderada presentada en término de probabilidad.

Sea  $x$  con una variable de  $n$  resultado, la esperanza matemática de la variable  $x$ , que se representa por  $E(x)$  se define como:

$$E(x) = x_1P(x = x_1) + P(x = x_2) + \dots + x_nP(x = x_n)$$

### **Varianza**

Es una medida de la dispersión de los valores con respecto a su media.

La varianza se formula como:

$$\text{Var}(x) = \sigma^2 = \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2$$

Donde  $\mu$  representa la media.

### **Desviación Típica Estándar**

Se llama desviación a la diferencia entre un valor individual y la media. En símbolos:

$$e = x_i - \mu$$

Donde  $e$  es la desviación o desvío.

La desviación típica se utiliza para obtener la información del grado en que un dato se aparta de la media y del grado en que se aparta de todos los demás datos de la misma distribución.

La desviación típica de la variable  $x$  es la raíz cuadrada de la varianza y se expresa de la manera siguiente:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N}}$$

### **Coefficiente de Variación**

Es coeficiente de variación mide la dispersión relativa de una distribución de frecuencia y se usa para comparar la dispersión de dos distribuciones de frecuencia del mismo tipo. Su expresión es: