

**CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DEL ACUÍFERO MORROA (SUCRE)  
MEDIANTE MÉTODOS GEOESTADÍSTICOS**

**LAURA CAROLINA ARÉVALO URIBE  
LEIDY CAROLINA SANTAMARÍA GARCÍA**



**UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2009**

**CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DEL ACUÍFERO MORROA (SUCRE)  
MEDIANTE MÉTODOS GEOESTADÍSTICOS**

**LAURA CAROLINA ARÉVALO URIBE  
LEIDY CAROLINA SANTAMARÍA GARCÍA**

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

MODALIDAD: PASANTÍA DE INVESTIGACIÓN  
GRUPOS GIREH-UN Y GPH-UIS

DIRECTOR

LEONARDO DAVID DONADO GARZON  
PROFESOR UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

CO-DIRECTOR

DAVID ALONSO BARAJAS SOLANO  
PROFESOR UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2009**

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION.....	17
2. GENERALIDADES ACUIFERO MORROA.....	19
2.1 UBICACIÓN GEOGRAFICA .....	19
2.2 OROGRAFIA.....	20
2.3 HIDROGRAFIA .....	21
2.4 POBLACION .....	21
2.5 ENTIDADES ENCARGADAS.....	22
2.6 IMPORTANCIA DEL AGUA SUBTERRANEA EN LA REGION .....	24
3. CARACTERIZACION ACUIFERO MORROA .....	25
3.1 GEOLOGIA ACUIFERO MORROA.....	25
3.1.1 Formación Sincelejo (Tp/Qps).....	26
3.2 CARACTERIZACIÓN DE ACUÍFEROS .....	28
3.2.1 Acuífero Confinado .....	29
3.2.2 Acuífero Semi-Confinado.....	29
3.2.3 Acuífero Libre .....	30
3.3 PRUEBAS DE BOMBEO .....	31
3.4 PRUEBA DIAGNÓSTICO .....	34
3.5 METODOS DE ANALISIS EN PRUEBAS DE BOMBEO .....	38
3.5.1 Método de Theis (1935).....	39
3.5.2 Método de Hantush (1955).....	41
3.5.3 Método de Neuman (1972).....	43
3.6 METODOS DE ANALISIS EN LA RECUPERACION DE LOS POZOS DE BOMBEO .....	44
3.6.1 Método de Cooper-Jacob (1946).....	44
3.7 ANALISIS DE PRUEBAS DE BOMBEO (SOFTWARE EPHEBO).....	46
3.8 DISTRIBUCION PUNTUAL.....	50
4. CARACTERIZACION ESPACIAL .....	51
4.1 METODOS DE INTERPOLACION ESPACIAL (SOFTWARE MATLAB)..	51
4.1.1 Método GRIDDATA .....	51

4.1.2	Método GRIDFIT .....	54
4.2	METODO GEOESTADISTICO DE KRIGEADO .....	58
4.2.1	Análisis univariado (Software GSWIN9) .....	59
4.2.2	Semivariograma.....	62
4.2.3	Estimación condicionada (Software GSWIN9-SURFER).....	67
5.	ANALISIS COMPLEMENTARIOS .....	71
6.	DISCUSION (ANALISIS, CONCLUSIONES, SUGERENCIAS).....	84
7.	BIBLIOGRAFIA.....	87

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Localización general del Acuífero Morroa. ....	1
Figura 2 Áreas con estudios hidrogeológicos realizados por INGEOMINAS (INGEOMINAS, 1998). ....	23
Figura 3 Sección geológica con sus respectivas formaciones (Robles et al., 1980). ....	26
Figura 4 Sección transversal del esquema de un acuífero confinado (Kruseman y Ridder, 1975). ....	29
Figura 5 Sección transversal del esquema de un acuífero semi-confinado (Kruseman y Ridder, 1975). ....	30
Figura 6 Sección transversal del esquema de un acuífero libre (Kruseman y Ridder, 1975). ....	31
Figura 7 Esquema representativo del bombeo de un pozo (Donado, 1998). ....	32
Figura 8 Efecto piel y almacenamiento en el pozo de bombeo (Renard, 2005). ...	35
Figura 9 Contorno, Borde de recarga (nivel fijo) (Carrera, 2005). ....	36
Figura 10 Contorno, Borde impermeable (Carrera, 2005). ....	36
Figura 11 Drenaje diferido (Carrera, 2005). ....	37
Figura 12 Curva de Theis (Batu, 1998). ....	41
Figura 13 Curva de Hantush y Jacob (Batu, 1998). ....	42
Figura 14 Función de pozo de Neuman (Batu, 1998). ....	43
Figura 15 Función de pozo de Neuman (Batu, 1998). ....	44
Figura 16 Curva de Cooper-Jacob (Trujillo, 1999). ....	46
Figura 17 Resultado prueba diagnostico del pozo 42 en el Municipio de Corozal (Software AQTESOLV). ....	47
Figura 18 Resultado de la prueba del pozo 42 en el Municipio de Corozal. ....	48
Figura 19 Distribución puntual de los pozos de bombeo. ....	50
Figura 20 Resultado de transmisividades empleando el método GRIDDATA. ....	53
Figura 21 Resultado de transmisividades empleando el método GRIDFIT-GRADIENT. ....	55

Figura 22 Resultado de transmisividades empleando el método GRIDFIT-DIFFUSION.....	56
Figura 23 Resultado de transmisividades empleando el método GRIDFIT-SPRINGS.....	57
Figura 24 Histograma de los datos no transformados, indicando su frecuencia relativa (Software GSWIN9). ....	60
Figura 25 Histograma de los datos transformados, indicando su frecuencia relativa (Software GSWIN9).....	61
Figura 26 Disposición de los datos en el campo (Software GSWIN9).....	62
Figura 27 Semivariogramas teóricos más comunes. (Samper y Carrera, 1996)...	64
Figura 28 Semivariograma muestral y teórico ajustado 0° (Software GSWIN9)....	65
Figura 29 Semivariograma muestral y teórico ajustado 45° (Software GSWIN9)..	66
Figura 30 Semivariograma muestral y teórico ajustado 90° (Software GSWIN9)..	66
Figura 31 Semivariograma muestral y teórico ajustado 135° (Software GSWIN9). .....	67
Figura 32 Campo de la varianza de estimación del Kriging en 3D (Software GSWIN9).....	68
Figura 33 Campo de la varianza de estimación del Kriging en 2D (Software GSWIN9).....	69
Figura 34 Mapa de estimación de las transmisividades con Kriging Ordinario (Software, SURFER). ....	70
Figura 35 Resultado de transmisividades empleando el método GRIDDATA.....	72
Figura 36 Resultado de transmisividades empleando el método GRIDFIT-GRADIENT.....	73
Figura 37 Resultado de transmisividades empleando el método GRIDFIT-DIFFUSION.....	74
Figura 38 Resultado de transmisividades empleando el método GRIDFIT-SPRINGS.....	75
Figura 39 Histograma de los datos no transformados, indicando su frecuencia relativa (Software GSWIN9). ....	76

Figura 40 Histograma de los datos transformados, indicando su frecuencia relativa (Software GSWIN9).....	77
Figura 41 Disposición de los datos en el campo (Software GSWIN9).....	78
Figura 42 Semivariograma muestral y teórico ajustado a 0° (Software GSWIN9).	79
Figura 43 Semivariograma muestral y teórico ajustado a 45° (Software GSWIN9). .....	79
Figura 44 Semivariograma muestral y teórico ajustado a 90° (Software GSWIN9). .....	80
Figura 45 Semivariograma muestral y teórico ajustado a 135° (Software GSWIN9). .....	80
Figura 46 Campo de la varianza de estimación del Kriging en 3D (Software GSWIN9).....	81
Figura 47 Campo de la varianza de estimación del Kriging en 2D (Software GSWIN9).....	82
Figura 48 Mapa de estimación de las transmisividades con Kriging Ordinario (Software SURFER).....	83

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Resultados Censo General en los departamentos de Sucre-Córdoba 2005 (DANE, 2005).....	22
Tabla 2 Proyección poblacional en los departamentos de Sucre y Córdoba (DANE, 2005).....	22
Tabla 3 Inventario de pruebas de bombeo en el municipio de Chinú.....	33
Tabla 4 Inventario de pruebas de bombeo en el municipio de Corozal.....	33
Tabla 5 Inventario de pruebas de bombeo en el municipio de Ovejas.....	33
Tabla 6 Inventario de pruebas de bombeo en el municipio de Pueblo Nuevo.....	33
Tabla 7 Inventario de pruebas de bombeo en el municipio de Sampués.....	34
Tabla 8 Inventario de pruebas de bombeo en el municipio de Sincé.....	34
Tabla 9 Resultados de la interpretación de pruebas de bombeo mediante software EPHEBO.....	49
Tabla 10 Transmisividades obtenidas en EPHEBO.....	59
Tabla 11 Inventario campo de pozos de Corozal (Rodríguez G., 1993).....	71

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A – Cortes hidrogeológicos tipo	89
---------------------------------------	----

## RESUMEN

**TITULO:** CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DEL ACUÍFERO MORROA (SUCRE) MEDIANTE MÉTODOS GEOESTADÍSTICOS.\*

**AUTOR:**

ARÉVALO URÍBE, Laura Carolina\*\*

SANTAMARÍA GARCÍA, Leidy Carolina\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Acuífero, Pozos, Prueba de bombeo, Prueba Diagnóstico, Método de Kriging, Método de Interpolación espacial.

**DESCRIPCIÓN:**

El Acuífero Morroa es la única fuente de agua potable del Norte del Departamento de Sucre y algunos municipios de Córdoba, abastece a más de 500 mil habitantes de centros urbanos y rurales, sufre hoy en día de una explotación desorganizada y excesiva que lo está agotando.

Es así como este proyecto tiene por finalidad realizar mapas de transmisividad en los cuales se podrán obtener información relevante de la cantidad de agua que puede ser transmitida horizontalmente a través de un espesor saturado del acuífero. De esta forma empleamos ensayos de bombeo ya que es un mecanismo útil para determinar las propiedades hidráulicas de los acuíferos, partiendo de mediciones del efecto que el bombeo tiene en el nivel potenciométrico del pozo en la etapa de bombeo como en la etapa de recuperación.

El primer análisis que conviene realizar, es la Prueba Diagnóstico (Software AQTESOLV) que sin llegar a ofrecer un valor para el parámetro (en este caso, Transmisividad), ayuda a tener una idea de cual es el modelo para interpretar cada ensayo. En el análisis de las pruebas de bombeo son aplicados diversos métodos (Theis, Hantush y Neuman) para evaluar los datos obtenidos, con el fin de llegar a estimar el valor de la Transmisividad para cada uno de los pozos, empleando software EPHEBO.

En la caracterización espacial se utilizó, el Método de Kriging (Software GSWIN9) que consiste en estimar la variable de interés como una combinación lineal de los valores medidos en los puntos de observación y Métodos de Interpolación (Software Matlab) como GRIDDATA y GRIDFIT (GRADIENT, DIFFUSION, SPRINGS) que consisten en trazar una superficie que representa de la mejor manera posible el comportamiento espacial de un conjunto de datos distribuidos de manera no uniforme.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Ing. DONADO GARZÓN, Leonardo David. Ing. BARAJAS SOLANO, David Alonso.

## ABSTRACT

**TITLE:** CHARACTERIZATION OF AQUIFER HYDRAULIC MORRA (SUCRE) USING GEOSTATISTICS METHODS

**AUTHOR:**

ARÉVALO URÍBE, Laura Carolina\*\*

SANTAMARÍA GARCÍA, Leidy Carolina\*\*

**KEY WORDS:** Aquifer, wells, pumping test, diagnostic tests, Krigeado method, Method of Spatial Interpolation.

**DESCRIPTION:**

Morroa Aquifer is the sole source of drinking water from the North of the Department of Sucre and some municipalities of Córdoba, serves more than 500 thousand inhabitants of urban and rural centers, today suffers from a disorganized and excessive exploitation is low.

This project aims to make maps of transmissivity in which they can obtain relevant information on the quantity of water that can be transmitted horizontally through an aquifer saturated thickness. In this way we used pumping tests as it is a useful mechanism for determining the hydraulic properties of aquifers, based on measurements of the effect of pumping is in the potentiometric level of the well pumping at the stage in the recovery phase.

The first analysis to be achieved, is the diagnostic test (Software AQTESOLV) that without providing a value for the parameter (in this case, transmissivity), helps to get an idea of what the model to interpret each test. In the analysis of pumping tests are applied various methods (Theis, Hantush and Neuman) to evaluate the data obtained in order to reach an estimated value of the transmissivity for each of the wells, using software EPHEBO.

In the characterization space is used, the Krigeado method (Software GSWIN9) which consists of estimating the variable of interest as a linear combination of the measured values of the observation points and interpolation method (Matlab Software) and as gridData GRIDFIT (GRADIENT, DIFFUSION, SPRINGS) consisting of a surface plot that represents the best possible spatial behavior of a data set distributed unevenly.

---

\* Project of degree

\*\* Physic Mechanical Engineering Faculty, Civil Engineering School, Ing. DONADO GARZÓN, Leonardo David. Ing. BARAJAS SOLANO, David Alonso.

**CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DEL ACUÍFERO MORROA (SUCRE)  
MEDIANTE MÉTODOS GEOESTADÍSTICOS**

---

## 1. INTRODUCCION

El agua además de representar el líquido más abundante de La Tierra es el recurso natural más importante y base de toda forma de vida. El nivel de vida, el desarrollo de una nación, las actividades industriales, agrícolas y ganaderas dependen de este recurso. El agua disponible se puede clasificar en dos categorías: aguas superficiales y aguas subterráneas, siendo esta última la que se encuentra bajo la superficie terrestre y representa el 95% del agua dulce fluida disponible en los continentes. La forma más evidente de reconocerlas son los manantiales o la extracción por medio de pozos.

El suministro de agua potable para algunas regiones de Colombia depende en su totalidad de aguas subterráneas, siendo esta la única fuente de abastecimiento para la población. En los últimos años la explotación de agua subterránea ha venido en aumento debido al déficit en la oferta de aguas superficiales y la necesidad que esta significa para los seres vivos. Este tipo de aprovechamiento es realizado con una supervisión muy limitada, generando una gran cantidad de impactos ambientales.

El Acuífero Morroa, única fuente de agua potable del Norte del Departamento de Sucre y algunos municipios de Córdoba, abastece a más de 500 mil habitantes de centros urbanos y rurales, sufre hoy en día de una explotación desorganizada y excesiva que lo está agotando.

En la actualidad la Corporación Autónoma de Sucre (CARSUCRE) se encuentra adelantando medidas de control de uso del agua en la región, pero sigue presente un desconocimiento de la hidrodinámica del sistema. CARSUCRE está llevando a cabo el "Proyecto de Protección Integrada de Aguas Subterráneas (PPIASP), en el área del Acuífero Morroa, desde 1996.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, el presente proyecto tiene como finalidad realizar la caracterización hidráulica del Acuífero Morroa (Sucre), a partir de la distribución espacial de la transmisividad.

Para alcanzar los anteriores objetivos es necesario desarrollar estudios detallados en la totalidad de los pozos que se encuentran en funcionamiento, con lo cual se pueda contar con una herramienta de control para el manejo del recurso de aguas subterráneas.

Es así como este proyecto tiene por finalidad realizar mapas de transmisividad en los cuales se podrán obtener información relevante de la cantidad de agua que puede ser transmitida horizontalmente a través de un espesor saturado del acuífero.

## 2. GENERALIDADES ACUIFERO MORROA

El Acuífero Morroa, es una formación compleja constituida por capas de areniscas y conglomerados poco consolidados, intercalados con capas de arcillolitas que son producto de la sedimentación detrítica en un ambiente típico de abanico aluvial y cauces fluviales (INSFOPAL, 1981). Por tal motivo, los niveles más permeables proceden de los canales principales y de las zonas proximales del abanico, siendo este origen deltaico la formación de abundantes cambios de facies y dando como resultado tres capas de areniscas con potencial acuífero; donde la capa central es la única explotada, con un espesor de 70 m y compuesta por granos de tamaño grueso a grava fina en matriz arenosa fina con cemento calcáreo.

El agua de este acuífero es considerada apta para el consumo humano, de acuerdo a las normas establecidas por el ministerio de salud en el decreto 1594/ 84, y se han clasificado como aguas bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas sódicas.

### 2.1 UBICACIÓN GEOGRAFICA

El Acuífero Morroa cuenta con una extensión de 102970.483 m<sup>2</sup>, está ubicado entre los Departamentos de Sucre y Córdoba, como se aprecia en la Figura 1, aflorando en la parte centro-occidental del Departamento de Sucre, formando una franja alargada de 3 km de ancho, la cual se extiende desde el nororiente del Municipio de Ovejas hasta el sur del Municipio de Sampués.



Figura 1 Localización general del Acuífero Morroa.

## 2.2 OROGRAFIA

El territorio del Departamento de Sucre es, en general, bajo y plano, anegadizo se inunda frecuentemente en el sur y seco en el norte. Se destacan la Cuchilla de Nucacal y las Lomas de Majagual. Posee una región insular conformada por las Islas de San Bernardo, ubicadas en el Golfo de Morrosquillo. El Acuífero Morroa está ubicado en plena Subregión de Sabanas, la cual es un declive de los Montes de María, hacia la cuenca de los Ríos San Jorge y Cauca. Las alturas oscilan entre 50 y 300 msnm; sus aguas superficiales no son permanentes y están constituidas por arroyos, su relieve en un 60% es más o menos plano, un 35% lo conforman tierras con pendientes suaves u onduladas, y un 5% por tierra fundamentalmente onduladas.

## 2.3 HIDROGRAFIA

El Departamento de Sucre no posee corrientes de aguas permanentes como: ríos, caños o quebradas. Este territorio es considerado como de sabana perteneciente al bosque seco tropical, que en épocas de lluvias se forman inmensas corrientes de aguas llamadas arroyos; a lo largo de los cuales y en sus riberas se encuentran escasos árboles, una fronda muy reducida con fácil penetración de los rayos solares. Entre las corrientes de aguas ocasionales superficiales se tienen: Arroyo Grande de Corozal, Cacimbas, Padilla, Tacunda, La Dorada, Tuza, Floral, Caracolí, La Puente, La Orca, Quita Calzón, Las Tinas, La Bonga, El Bálsama etc.

A Corozal se le conoce también como la "Ciudad del Agua", se encuentra ubicada sobre el acuífero de Morroa, el cual presenta diversas profundidades, existen pozos que van de los 80 a 400 m ricos en aguas considerada hasta el momento de buena calidad. Este acuífero es el resultado de la infiltración de las aguas de la superficie a través de las porosidades de las rocas permeables o a las grietas de las rocas impermeables esta agua se van almacenando y forman lagos o ríos subterráneos, éste último es el caso de Corozal.

Las precipitaciones se presentan en forma de lluvia granizo, los meses más lluviosos del año en Corozal, son: Mayo, Junio, Julio, Agosto, Septiembre y Octubre (Estadísticas INAT). Es así que Corozal presenta dos épocas climáticas al año: verano o tiempo seco empieza en Noviembre hasta Abril y el invierno o tiempo lluvioso comienza en Mayo y finaliza en Octubre.

## 2.4 POBLACION

El censo general 2005, brindó la oportunidad de revisar los cambios poblacionales experimentados por la dinámica demográfica, durante el periodo 1993-2005, presentando a continuación los resultados para los departamentos de Sucre y Córdoba.

**Tabla 1 Resultados Censo General en los departamentos de Sucre-Córdoba 2005 (DANE, 2005).**

CENSO GENERAL 2005 RESULTADOS TOTAL SUCRE		CENSO GENERAL 2005 RESULTADOS TOTAL CORDOBA	
Personas	762.263	Personas	1.462.909
Hogares	1.666.540	Hogares	315.244
Unidades Económicas	23.379	Unidades Económicas	37.583
Unidades Agropecuarias	27.598	Unidades Agropecuarias	106.194

Las proyecciones de población se constituyen en el insumo principal para la formulación de políticas públicas que propendan en el futuro una focalización adecuada de los beneficios del desarrollo, su realización conlleva un análisis detallado en todos los niveles de cada uno de los factores que inciden en el comportamiento de las componentes de la dinámica poblacional.

**Tabla 2 Proyección poblacional en los departamentos de Sucre y Córdoba (DANE, 2005).**

CODIGO DEPARTAMENTO	DEPARTAMENTO	POBLACION TOTAL				
		2005	2006	2007	2008	2009
23	CORDOBA	1.467.929	1.489.669	1.511.981	1.534.854	1.558.267
70	SUCRE	772.010	779.532	787.167	794.904	802.733
		POBLACION TOTAL				
		2005	2006	2007	2008	2009
23	CORDOBA	738.113	753.291	768.502	783.708	798.925
70	SUCRE	493.860	501.458	508.944	516.355	523.720
		POBLACION TOTAL				
		2005	2006	2007	2008	2009
23	CORDOBA	729.816	736.378	743.479	751.146	759.342
70	SUCRE	278.150	278.074	278.223	278.549	279.013

## 2.5 ENTIDADES ENCARGADAS

INGEOMINAS es la entidad que tiene como iniciativa el programa de Exploración de Aguas Subterráneas para evaluar el potencial del recurso hídrico del subsuelo colombiano que aporten a satisfacer las necesidades de la población, siendo especialmente una de estas el agua potable.

INGEOMINAS ha presentado asesoría técnica desde el año 1996 a corporaciones como CARSUCRE en el proyecto de “Protección Integral de las Aguas



## 2.6 IMPORTANCIA DEL AGUA SUBTERRANEA EN LA REGION

En el departamento del Sucre aproximadamente el 91.7% de los acueductos municipales se proveen de pozos profundos que captan el agua de los acuíferos Betulia, Morrosquillo, la Mojana y Morroa, siendo este último el principal del departamento; ya que constituye la única fuente de agua potable que abastece a más de quinientos mil habitantes de las zonas urbanas y rurales de los municipios de Sincelejo, Corozal Ovejas, Morroa, Los Palmitos, San Juan de Betulia y Sampués.

Los acuíferos confinados tienen la ventaja de que su agua no se evapora por ser subterránea y además de esto su contaminación es más difícil por estar parcialmente protegidos por el suelo y rocas (Biodiversity reporting award, 2001).

Por esta razón el agua subterránea es un recurso estratégico para la región ya que es el medio por el cual se satisface la demanda de agua potable para el desarrollo socioeconómico del departamento.

### 3. CARACTERIZACION ACUIFERO MORROA

Las pruebas de bombeo ofrecen valores para determinar las características hidráulicas en los acuíferos, modelados por medio de métodos de análisis, sin embargo, la exactitud de los resultados dependen de variables como la precisión de los valores de entrada y la proximidad con respecto a las condiciones establecidas por cada metodología, ya que cada solución es válida, cuando se dan determinadas circunstancias.

Obteniendo como resultado del análisis de las pruebas, un valor puntual de la transmisividad. Este parámetro determina el caudal que circula a través de una sección transversal de anchura unitaria, de profundidad todo el espesor del acuífero, y bajo un gradiente hidráulico unitario.

#### 3.1 GEOLOGIA ACUIFERO MORROA

Las unidades litoestratigráficas presentes en el Departamento de Sucre, en la región noroccidental de Colombia, forman parte del Cinturón de San Jacinto, el cual contiene el Miembro Morroa de la Formación Sincelejo. A continuación se presenta un corte estratigráfico, el cual muestra las formaciones presentes siendo las de interés la Formación Morroa (Tpm), Formación Sincelejo Superior (Tpss) y Formación Sincelejo Inferior (Tpsi) (Buitrago y Donado, 2000).

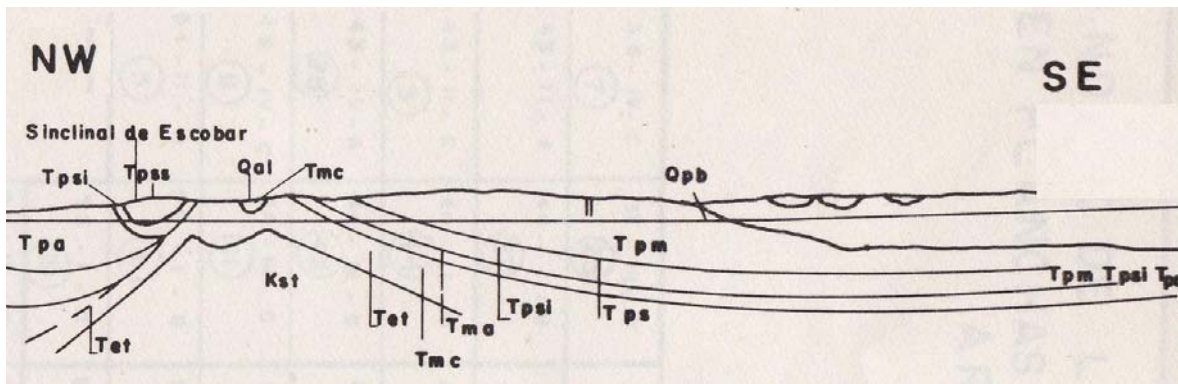


Figura 3 Sección geológica con sus respectivas formaciones (Robles et al., 1980).

### 3.1.1 Formación Sincelejo (Tp/Qps)

La Formación Sincelejo es una serie típicamente continental de esta región. Usando criterios geomorfológicos complementados con la predominancia de areniscas o arcillolitas, la formación se divide en un conjunto inferior predominantemente arcilloso y uno superior más arenoso, denominados respectivamente como Miembro Sincelejo Inferior y Miembro Sincelejo Superior o Miembro Morroa. El Miembro Sincelejo Inferior es una secuencia de areniscas finas y arcillolitas que tienen un espesor promedio de 200 m (Rodríguez G., 1993). El Miembro Sincelejo Superior o Miembro Morroa es una secuencia continental predominantemente arenosa con intercalaciones de areniscas medias a gruesas, conglomerados y arcillolitas. En algunos sitios la diferenciación entre los dos miembros es difícil. Al miembro Sincelejo Superior se le ha asignado el nombre de Miembro Morroa, por la amplia aceptación e importancia que tiene el término Morroa, en los estudios hidrogeológicos de esta parte de la región Caribe. Las principales características geológicas de la Formación Sincelejo son:

- ✓ Edad: Plioceno
- ✓ Distribución y afloramientos: se extiende como una franja continua de más de 5 km de ancho y 60 km de largo con dirección N10E, que atraviesa prácticamente todo el departamento de Sucre, desde Ovejas en el norte hasta

Sampués en el sur, prolongándose aún más en el Departamento de Córdoba, hasta cercanías del municipio de Sahagún.

- ✓ Descripción litológica: A diferencia de las descripciones litológicas generalizadas dadas en las unidades precedentes, se ha considerado conveniente describir con mayor detalle la Formación Sincelejo, en razón a la importancia hidrogeológica de algunos niveles de esta unidad. En términos generales se trata de una potente unidad constituida por areniscas de grano variable con intercalaciones de arcillolitas y limolitas. Hacia la parte superior las areniscas son muy friables con intercalaciones de conglomerados y arcillolitas, localmente presenta numerosos nódulos de areniscas calcáreas y restos de troncos silicificados (Rodríguez G., 1993).

#### **3.1.1.1 Miembro Sincelejo Inferior (Tpsi)**

El Miembro Sincelejo Inferior está compuesto por una secuencia de areniscas de grano fino a medio de color gris, algunos lentes conglomeráticos e intercalaciones gruesas de arcillolitas. Hacia la ciudad de Sincelejo se inicia el cambio morfológico que diferencia los escarpes altos de la ciudad de Sincelejo y las tierras más bajas al occidente. En la sección de Ovejas es muy difícil precisar el límite entre el Miembro Inferior y el Miembro Morroa o Superior de la Formación Sincelejo. Probablemente debido a que la unidad tiene un menor desarrollo hacia el sur, no obstante lo anterior, la sección aflorante en este sector, aparentemente involucra en su mayor parte al Miembro Inferior. Hacia la base de la sección se presenta una secuencia de areniscas de grano fino a medio ligeramente conglomerática. Presenta nódulos de areniscas calcáreas más compactas que las rocas que las contienen, es frecuente la estratificación cruzada. Aunque es variable de sur a norte, se estima que el Miembro Sincelejo inferior, tiene un espesor entre 350 y 400 metros. El Miembro Inferior de la Formación Sincelejo descansa discordantemente sobre arcillas intercaladas con arenas que probablemente pueden pertenecer a la parte alta de la Formación San Jacinto (Buitrago y Donado, 2000).

### 3.1.1.2 Miembro Sincelejo Superior o Miembro Morroa (Tpm)

El Miembro Morroa se describe como una sucesión de areniscas que alternan con capas conglomeráticas y niveles de arcillas de color marrón a veces moteadas de gris. Entre las areniscas son muy frecuentes los nódulos de areniscas con la misma composición de las areniscas que las contienen.

No obstante lo anterior, la imprecisión en los límites superior e inferior, la divergencia de espesores, y la similitud litológica con el miembro infrayacente en algunos sectores, se considera conveniente proponer el rango de Miembro Superior o Morroa para la parte superior de la secuencia de rocas continentales que afloran en los alrededores de Sincelejo, Morroa, Corozal y Ovejas principalmente, por su importancia hidrogeológica.

Este Miembro Morroa, conforma las colinas más orientales de la zona montañosa o Montes de María y se extiende ampliamente como una franja con un rumbo general N20-25E hasta un poco al norte de Ovejas donde tiene una dirección E-W. en general tiene una moderada a leve inclinación hacia el oriente, con buzamientos variables entre 20° y 5° siendo más suaves hacia el techo. El miembro Morroa puede alcanzar un espesor de 1000 m, en el área comprendida entre Sincelejo y Corozal. El contacto inferior del Miembro Morroa es la parte alta del Miembro Sincelejo Inferior. Con respecto al contacto superior parece estar infrayaciendo conformemente la Formación Betulia (Rodríguez G., 1993).

## 3.2 CARACTERIZACIÓN DE ACUÍFEROS

Según la estructura geológica de los materiales que conforman los acuíferos y las condiciones hidráulicas del agua, se pueden categorizar en Acuíferos Confinados, Acuíferos Semi-Confinados y Acuíferos Libres, a continuación se describen sus propiedades.

### 3.2.1 Acuífero Confinado

Es aquel que se encuentra totalmente saturado y cuyas capas, superior e inferior son formaciones rocosas impermeables, donde el agua presente es denominada confinada o artesiana. El flujo es primordialmente horizontal ya que el agua se encuentra almacenada bajo una presión mayor a la presión atmosférica. Se ilustra en la Figura 4:

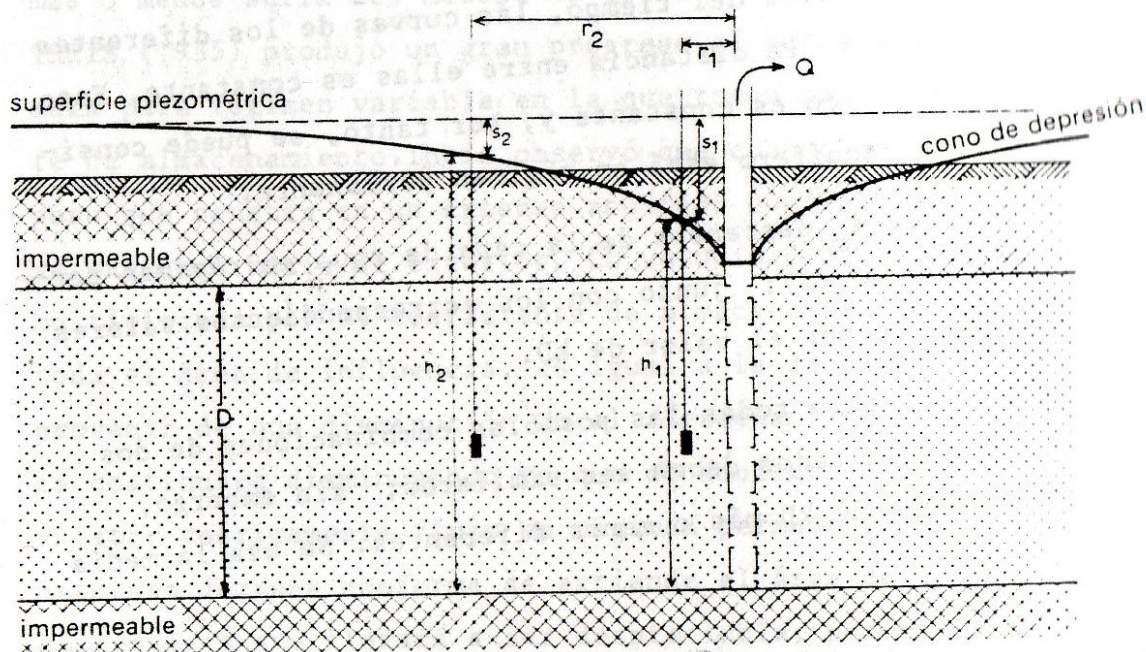


Figura 4 Sección transversal del esquema de un acuífero confinado (Kruseman y Ridder, 1975).

### 3.2.2 Acuífero Semi-Confinado

Es aquel que se encuentra totalmente saturado, se encuentra limitado por una capa superior semi-permeable (acuitardo) y una inferior impermeable o semi-permeable, permitiendo la filtración de agua entre las capas, así mismo la disminución de la carga piezométrica originada por el bombeo, induce el flujo de agua en un sentido vertical, que recarga el acuífero saturado. Se ilustra en la Figura 5:

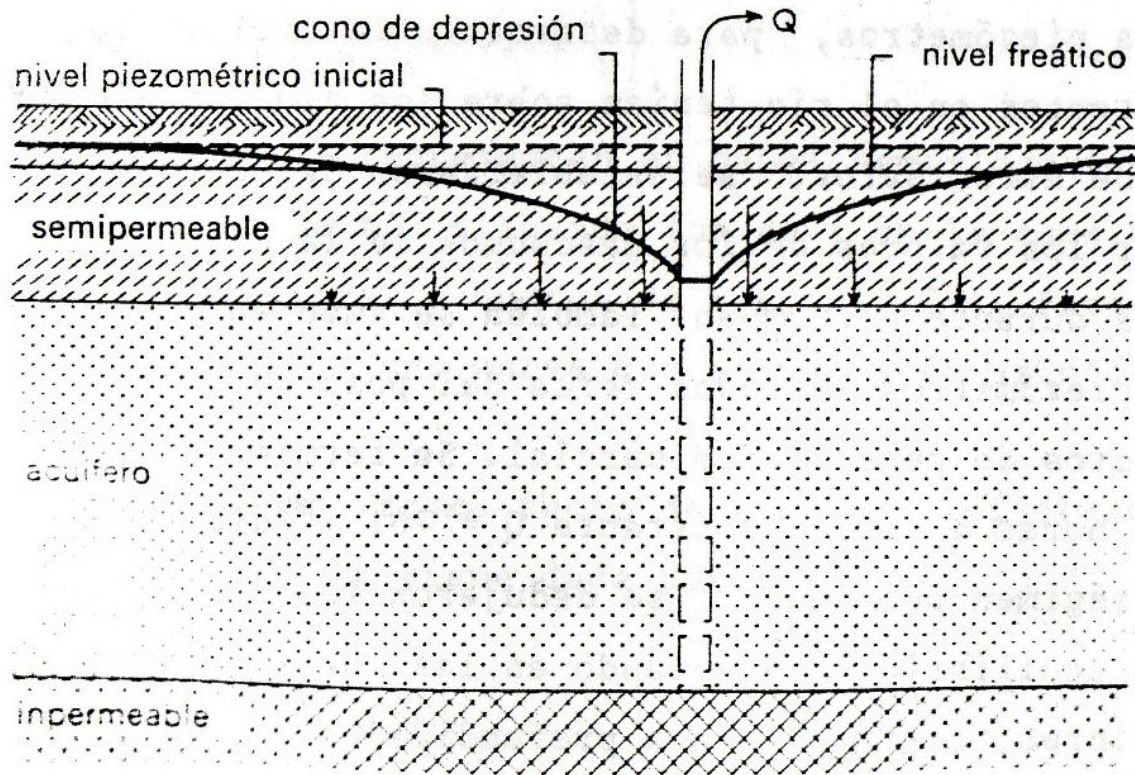


Figura 5 Sección transversal del esquema de un acuífero semi-confinado (Kruseman y Ridder, 1975).

### 3.2.3 Acuífero Libre

Es aquel que se encuentra saturado hasta el nivel freático, y está formado por una capa permeable parcialmente saturado de agua sobre otra capa impermeable, en que el agua subterránea presenta una superficie libre, sujeta a la presión atmosférica, referenciando así el nivel freático. Se ilustra en la Figura 6:

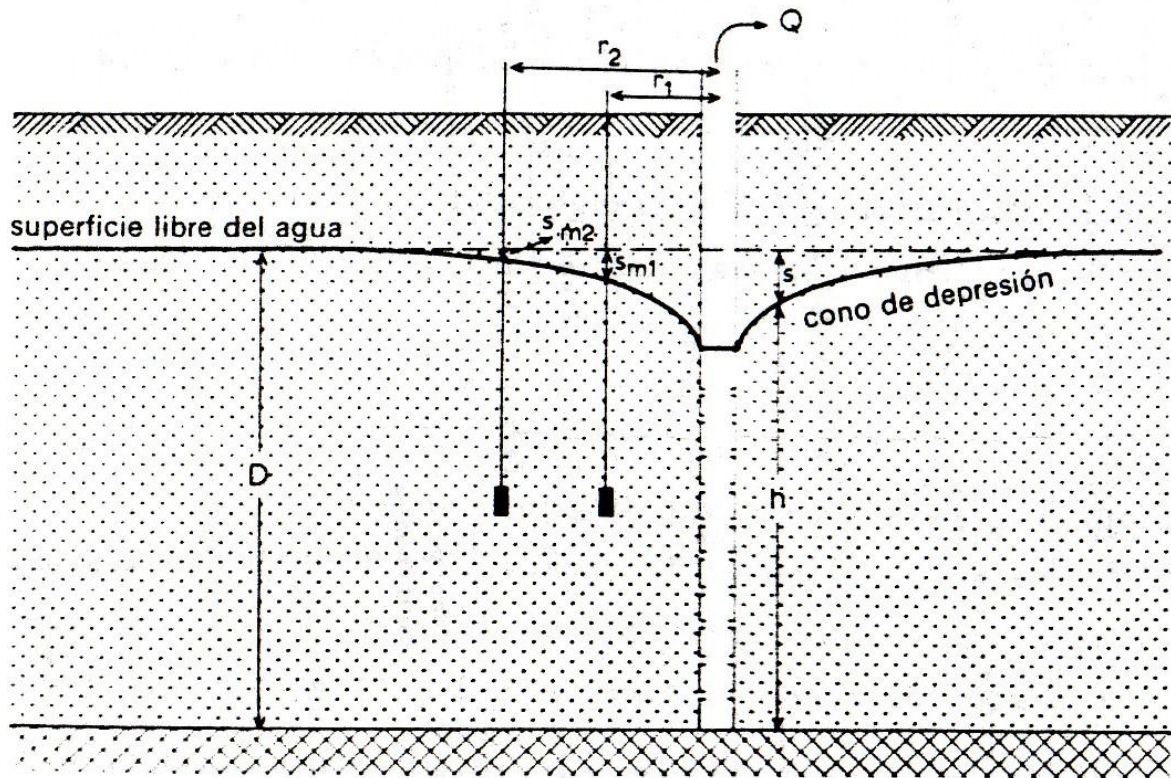


Figura 6 Sección transversal del esquema de un acuífero libre (Kruseman y Ridder, 1975).

### 3.3 PRUEBAS DE BOMBEO

Un pozo es una estructura hidráulica que debidamente diseñada y construida permite efectuar la extracción del agua de una formación acuífera. El ensayo de bombeo es un mecanismo útil para determinar las propiedades hidráulicas de los acuíferos, partiendo de información primaria obtenida en campo, donde se toman datos de niveles y tiempos tanto en la etapa de bombeo como en la etapa de recuperación, posterior al bombeo.

El principio de una prueba de bombeo, es que se bombea un pozo y se mide el efecto que este bombeo tiene en el nivel potenciométrico del acuífero; con esta finalidad se debe disponer de un cierto número de piezómetros en las cercanías, que traen como consecuencia la carencia de información necesaria para el cálculo del coeficiente de almacenamiento.

El coeficiente de almacenamiento  $S$  indica el volumen de agua que se puede extraer de un área de acuífero al descender una unidad del nivel potenciométrico. Las 30 pruebas de bombeo recopiladas en este estudio no cuentan con pozos de observación, lo que cataloga las pruebas como ensayos de pozo, de las cuales 17 cuentan con datos de recuperación. En la Figura 7 se presenta un esquema representativo del bombeo de un pozo.

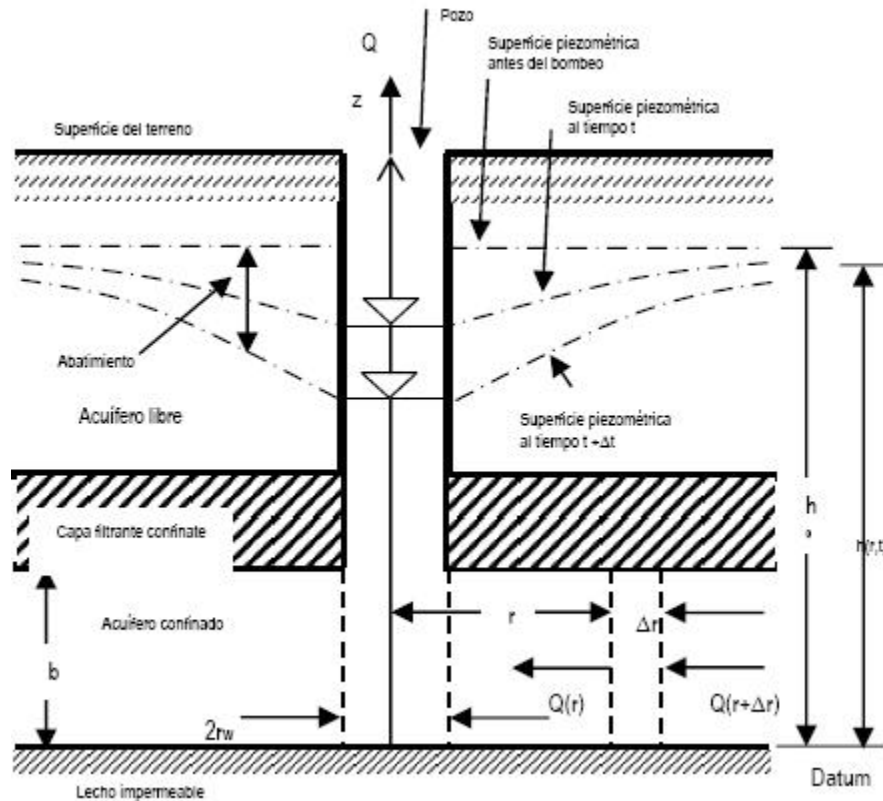


Figura 7 Esquema representativo del bombeo de un pozo (Donado, 1998).

Se muestran a continuación 30 de los 171 pozos registrados por INGEOMINAS y complementados con información adicional (Buitrago y Donado, 2000. UNISUCRE, Comunicación electrónica. Trabajo de grado UNISUCRE, Pacheco y Villegas, 2003), correspondientes a los seleccionados para la realización de la caracterización hidráulica. de los cuales 5 se encuentran en el municipio de Chinú, 3 en Corozal, 14 en Ovejas, 2 en Pueblo Nuevo, 3 en Sampués y 3 en Sincé. Las siguientes Tablas resumen el inventario.

**Tabla 3 Inventario de pruebas de bombeo en el municipio de Chinú.**

IDENTIFICACION	FECHA PRUEBA	MUNICIPIO	COORDENADAS		CAUDAL (L/S)
			NORTE	ESTE	
52-II-C-046	28/07/1991	Chinú	1501775	850075	2.74
52-IV-A-006A	00/04/1991	Chinú	1495225	854150	5.1
52-IV-A-012	00/04/1991	Chinú	1497200	855100	10
52-IV-A-003	00/04/1991	Chinú	1496850	854700	2
52-4-A	00/04/1991	Chinú	1496075	854600	15

**Tabla 4 Inventario de pruebas de bombeo en el municipio de Corozal.**

IDENTIFICACION	FECHA PRUEBA	MUNICIPIO	COORDENADAS		CAUDAL (L/S)
			NORTE	ESTE	
44-IV-D-02	25/01/1997	Corozal	1523050	866330	50.15
44-IV-D-024	17/02/1977	Corozal	1522400	876560	100
44-IV-C-042	26/09/1998	Corozal	1522980	868107	40

**Tabla 5 Inventario de pruebas de bombeo en el municipio de Ovejas.**

IDENTIFICACION	FECHA PRUEBA	MUNICIPIO	COORDENADAS		CAUDAL (L/S)
			NORTE	ESTE	
44-II-D-004	28/10/1992	Ovejas	1547140	876480	5
44-II-D-005	22/05/1993	Ovejas	1547180	875600	2
44-II-D-007	26/09/1992	Ovejas	1546900	876730	6.13
44-II-D-008A	26/08/1996	Ovejas	1546940.25	876541.9	9
44-II-D-009	28/08/1993	Ovejas	1546580	874600	12
44-II-D-009A	18/08/1996	Ovejas	1541419.49	869647.27	9
44-II-D-010	03/12/1992	Ovejas	1546100	874530	18
-	31/05/1996	Ovejas	-	-	11
-	06/08/1996	Ovejas	-	-	11
45-I-C-001	14/09/1989	Ovejas	1542150.26	883106.85	15.00
-	05/02/2008	Ovejas	1546720	876678	10
-	30/11/2007	Ovejas	1547175	876524	10
-	10/12/2007	Ovejas	1546129	874589	6.5

**Tabla 6 Inventario de pruebas de bombeo en el municipio de Pueblo Nuevo.**

IDENTIFICACION	FECHA PRUEBA	MUNICIPIO	COORDENADAS		CAUDAL (L/S)
			NORTE	ESTE	
-	18/07/1992	Pueblo Nuevo	-	-	10.45
-	27/07/1992	Pueblo Nuevo	-	-	11

**Tabla 7 Inventario de pruebas de bombeo en el municipio de Sampués.**

IDENTIFICACION	FECHA PRUEBA	MUNICIPIO	COORDENADAS		CAUDAL (L/S)
			NORTE	ESTE	
52-II-C-019	05/12/1993	Sampués	1509220	858210	5
52-II-A-029	24/11/1997	Sampués	1510130	859680	18
52-II-A-030	17/08/1999	Sampués	1510600	859950	7

**Tabla 8 Inventario de pruebas de bombeo en el municipio de Sincé.**

IDENTIFICACION	FECHA PRUEBA	MUNICIPIO	COORDENADAS		CAUDAL (L/S)
			NORTE	ESTE	
-	20/03/1991	Sincé	-	-	16.2
-	18/03/1991	Sincé	-	-	10.5
-	22/03/1991	Sincé	-	-	11.6

Como se aprecia en las anteriores Tablas, no se posee la ubicación de todos los pozos, lo cual dificulta el análisis del mismo.

### 3.4 PRUEBA DIAGNÓSTICO

Previo a la realización de la prueba diagnóstico se revisa la información geológica, de esta forma se construye una descripción conceptual del comportamiento del acuífero. La geología del Acuífero Morroa aflora en las estribaciones orientales de la zona montañosa del departamento, se muestra de esta forma su estado libre, tornándose confinado en la prolongación en el Departamento de Córdoba, hasta cercanías del Municipio de Sahagún.

El primer análisis que conviene realizar, es el diagnóstico que sin llegar a ofrecer un valor para los estimadores de los parámetros (en este caso, Transmisividad), si provee una visión más particular del tipo de eventos que están afectando a la interpretación del ensayo, es decir, ayuda a tener una idea de cual es el modelo para interpretar cada ensayo.

Seguidamente se preparan y se analizan gráficas ( $s$  vs  $t$ ,  $\log s$  vs  $\log t$ ,  $s$  vs  $\log t$ ,  $ds/d\log t$  vs  $\log t$ ,  $\log (ds/d\log t)$  vs  $\log t$ ) de manera conjunta para determinar factores tales como efecto piel, almacenamiento en el pozo, efectos de contorno

borde de recarga y borde impermeable) y drenaje diferido, mostrados a continuación en las Figuras 8, 9, 10 y 11 respectivamente.

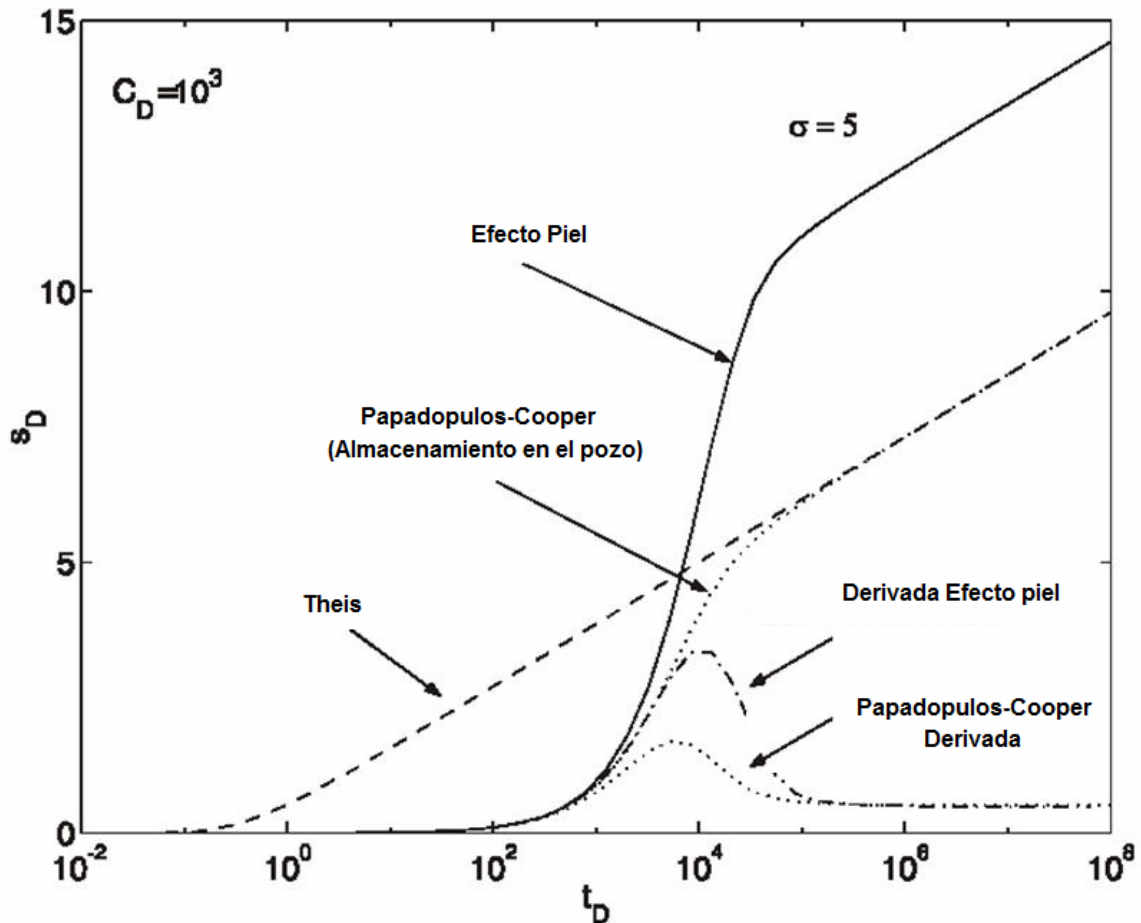


Figura 8 Efecto piel y almacenamiento en el pozo de bombeo (Renard, 2005).

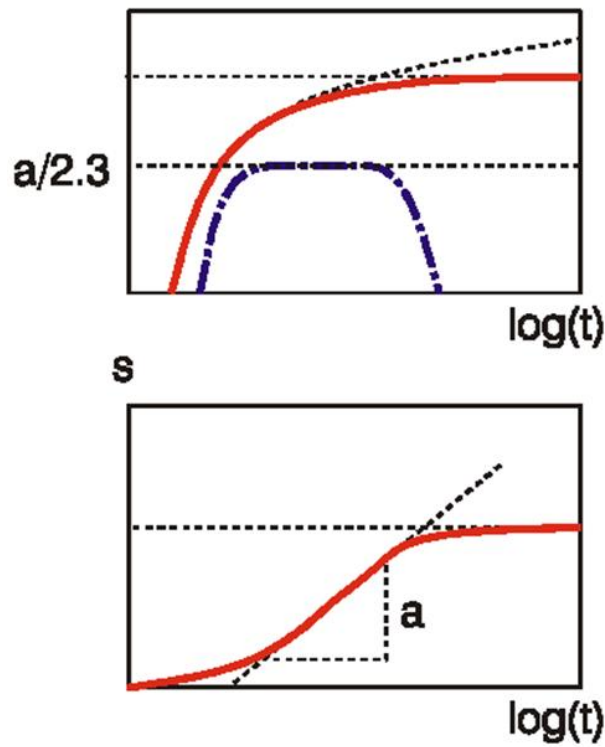


Figura 9 Contorno, Borde de recarga (nivel fijo) (Carrera, 2005).

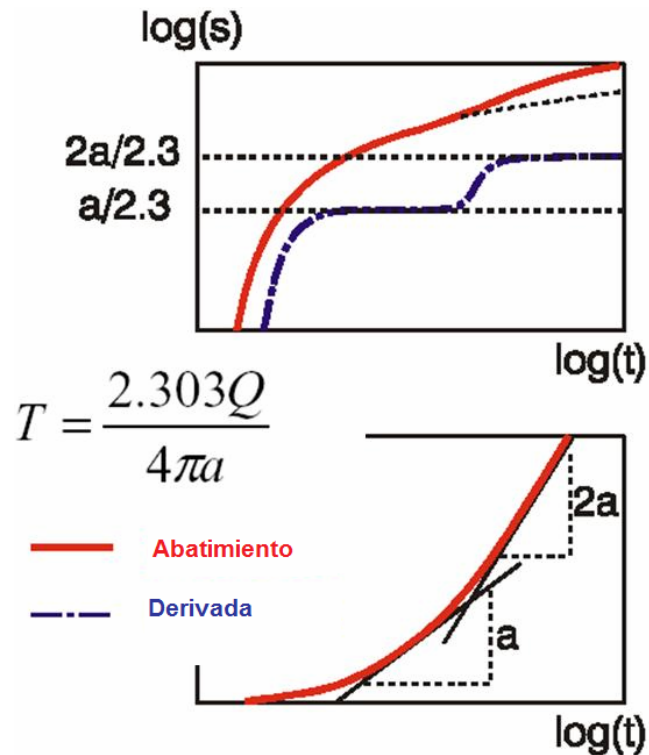


Figura 10 Contorno, Borde impermeable (Carrera, 2005).

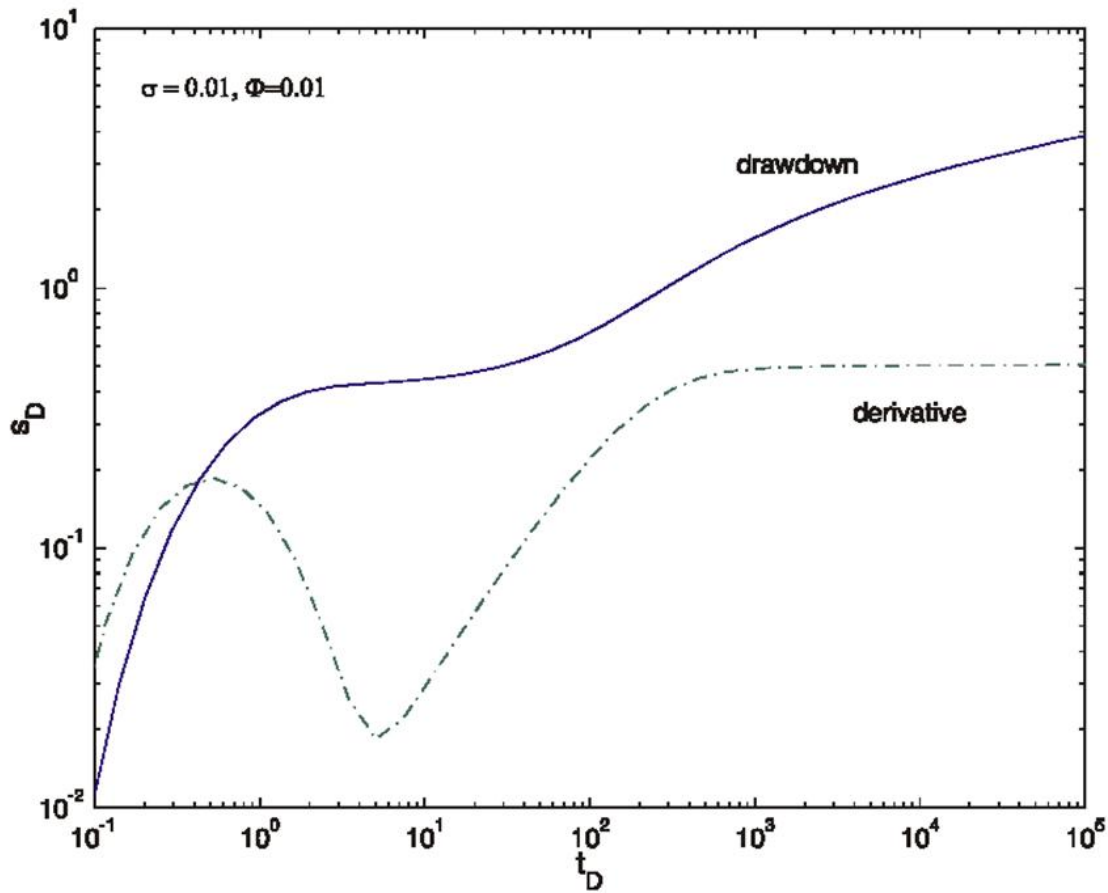


Figura 11 Drenaje diferido (Carrera, 2005).

La elaboración de las graficas diagnóstico para cada prueba de bombeo, ofrecen mayor precisión ya que se tienen en cuenta factores que afectan el comportamiento del pozo, de esta forma al realizar el diagnóstico se describe un comportamiento que complementa el estudio previo de la geología. El Anexo A muestra el tipo de cortes hidrogeológicos, utilizados en el análisis de la geología de la región.

Concluyendo de esta forma, la influencia de las capas estratigráficas (sucesiones de areniscas alternadas con capas de conglomerados y niveles de arcillas) contenidas en el Acuífero Morroa, ofrecen un comportamiento confinado en la región noroccidental tornándose semi-confinado hacia la parte baja del

afloramiento, sin presentar condiciones de acuífero libre. Los métodos empleados para el análisis de las pruebas de bombeo fueron superposición de Theis (1935) y superposición de Hantush (1955) (Kruseman y Ridder, 1975) empleando diversos factores de goteo. Para el análisis gráfico y la representación de las pruebas diagnóstico se utilizaron los programas AQTESOLV (Versión DEMO) y EPHEBO (Versión académica).

### 3.5 METODOS DE ANALISIS EN PRUEBAS DE BOMBEO

Bajo condiciones de régimen de flujo variable, son aplicados diversos métodos para evaluar los datos obtenidos en los ensayos de bombeo; todos los métodos se basan en los siguientes supuestos generales (Kruseman y Ridder, 1975):

- ✓ Aparentemente, el acuífero tiene una extensión superficial infinita.
- ✓ El acuífero, en el área influenciada por el ensayo, es homogéneo, isótropo y de espesor uniforme.
- ✓ Antes de bombear, la superficie piezométrica y/o superficie freática son (casi) horizontales en el área influenciada por el ensayo de bombeo.
- ✓ Se bombea el acuífero a caudal de descarga constante.
- ✓ El pozo de bombeo penetra totalmente en el acuífero y por ello recibe agua de todo el espesor del acuífero siendo el flujo horizontal.

La mayoría de los modelos matemáticos usados en hidrogeología subterránea se basan en la Ecuación de Flujo Saturado, la cual se describe en coordenadas cilíndricas (con simetría radial) para medios isótropos con la siguiente expresión matemática:

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{T}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial h}{\partial r} \right)$$

Ec. 1

Donde  $h$  es la carga hidráulica,  $r$  es la distancia radial desde el pozo,  $S$  es el coeficiente de almacenamiento y  $T$  la Transmisividad. Estos son parámetros constantes.

A continuación, se presentan los métodos de análisis empleados en la caracterización hidráulica, en los diferentes tipos de acuíferos:

### 3.5.1 Método de Theis (1935)

Este método está sujeto a las siguientes condiciones (Kruseman y Ridder, 1975):

- ✓ El acuífero es confinado.
- ✓ El flujo de agua hacia el pozo es en régimen variable.
- ✓ La extracción de agua del almacenamiento produce inmediatamente descenso en la carga hidráulica.
- ✓ El diámetro del pozo de bombeo es muy pequeño, para poder despreciar el almacenamiento en el pozo.

Theis fue el primero en desarrollar en 1935, una fórmula en función del tiempo  $t$  y el coeficiente de almacenamiento  $S$ , la ecuación fue deducida por analogía entre el flujo de agua en el suelo y la conducción de calor, se puede expresar de la siguiente forma (Kruseman y Ridder, 1975):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad \text{Ec. 2}$$

Donde  $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$  Ec. 3

Por lo tanto  $S = \frac{4Ttu}{r^2}$  Ec. 4

Donde  $s$  es el descenso del nivel piezométrico en un piezómetro situado a una distancia  $r$  del pozo de bombeo,  $Q$  el caudal constante de descarga medido en  $m^3/día$ ,  $S$  el coeficiente de almacenamiento este es un termino adimensional,  $T$  es la transmisividad del acuífero en  $m^2/día$  y  $t$  es el tiempo desde que comenzó el bombeo en días.

$$W(u) = -0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 * 2!} + \frac{u^3}{3 * 3!} - \frac{u^4}{4 * 4!} + \dots \quad \text{Ec. 5}$$

Este método sugiere el siguiente procedimiento (Kruseman y Ridder, 1975):

- ✓ Representar la curva tipo de la función del pozo de Theis en escala logarítmica, mostrada en la Figura 12.
- ✓ Utilizando los datos del ensayo por bombeo se representan los valores de  $s$  en función de  $t/r^2$  en escala logarítmica.
- ✓ Superponiendo las dos graficas, teniendo los ejes de coordenadas paralelos, encontrar la posición en la que mejor se ajustan una a la otra.
- ✓ Elegir un punto arbitrario A, y determinar así sus coordenadas  $W(u)$ ,  $1/u$  dadas por la curva tipo y las coordenadas  $s$  y  $t/r^2$  dadas por la curva de los datos por bombeo
- ✓ Sustituyendo estos valores en las ecuaciones Ec. 2, obtenemos la transmisividad y en la Ec. 4, obtenemos el coeficiente de almacenamiento.

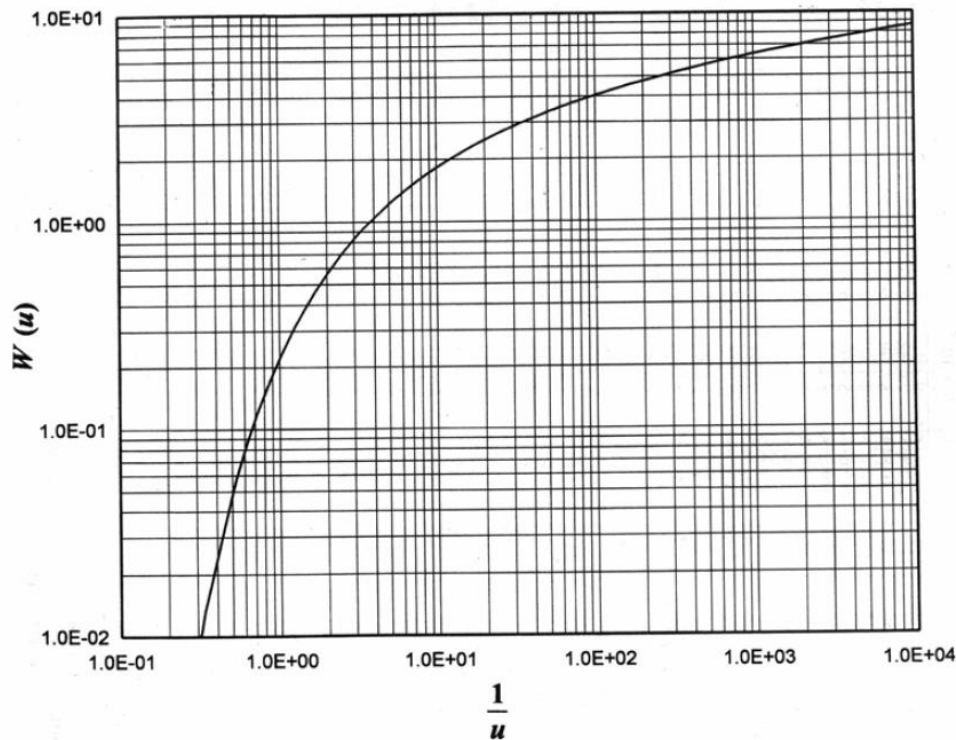


Figura 12 Curva de Theis (Batu, 1998).

### 3.5.2 Método de Hantush (1955)

Este método está sujeto a las siguientes condiciones (Kruseman y Ridder, 1975):

- ✓ El acuífero es semi-confinado.
- ✓ El flujo de agua hacia el pozo es en régimen variable.
- ✓ El agua extraída del almacenamiento se descarga en el mismo momento que se produce el descenso de la carga hidráulica del acuífero.
- ✓ El diámetro del pozo de bombeo es muy pequeño, para poder despreciar el almacenamiento en el pozo.
- ✓ Se debe conocer, aproximadamente, el descenso del nivel de agua en régimen permanente.
- ✓ El flujo en el acuífero es horizontal y el goteo es vertical.

De acuerdo con Hantush y Jacob (1955), se puede describir el descenso de la capa de agua en un acuífero semi-confinado de la siguiente forma y mediante la superposición de la curva tipo de la función del pozo de Hantush y Jacob (Kruseman y Ridder, 1975) mostrada en la Figura 13.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/B) \quad \text{Ec. 6}$$

Donde  $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$  Ec. 7

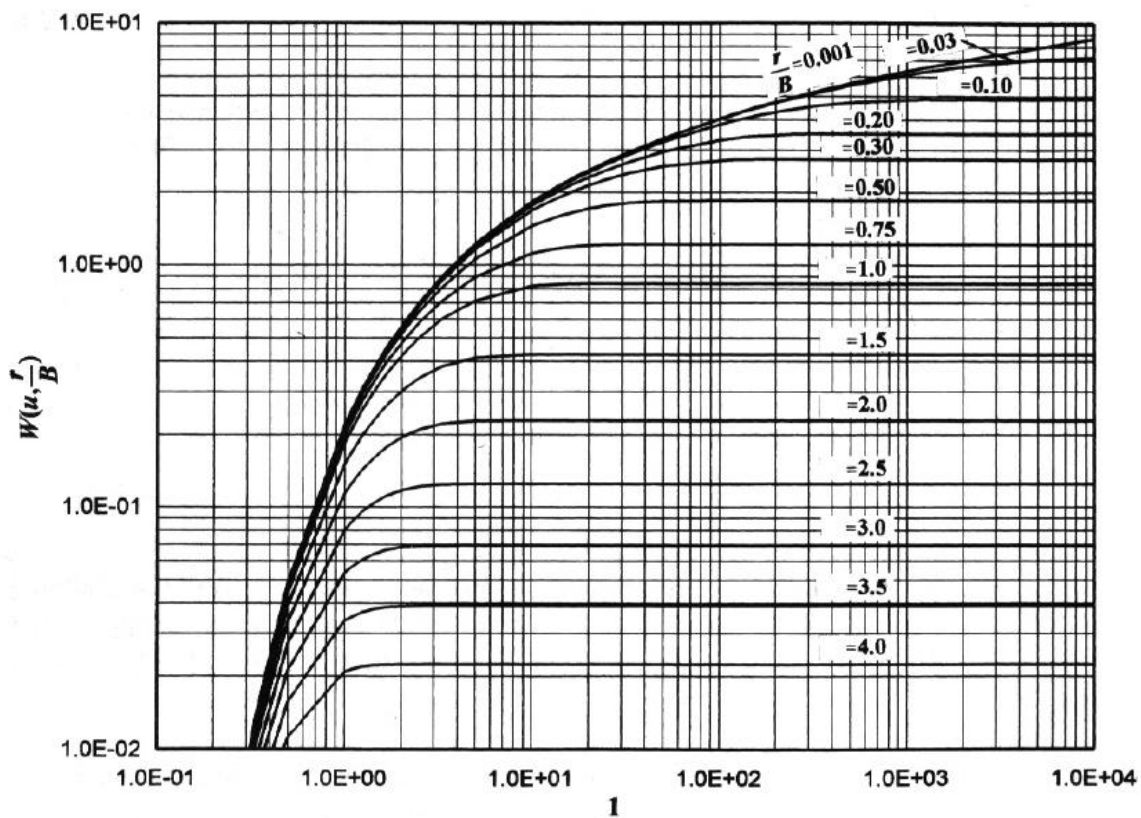


Figura 13 Curva de Hantush y Jacob (Batu, 1998).

### 3.5.3 Método de Neuman (1972)

Este método está sujeto a las siguientes condiciones (Kruseman y Ridder, 1975):

- ✓ El acuífero es libre.
- ✓ El material del acuífero es homogéneo pero anisotrópico, y su principal conductividad hidráulica está orientada paralela a los ejes coordenados.
- ✓ El agua es bombeada por compactación del acuífero, expansión del agua y drena por gravedad de la superficie libre.
- ✓ El abatimiento de la tabla de agua es pequeño comparado con el espesor de la zona saturada.
- ✓ Los efectos de la capilaridad son despreciables.

Neuman en 1972, simplificó la ecuación de movimiento en acuíferos libres, aprovechando los desarrollos de Boulton en 1954, donde la solución encontrada para el abatimiento es la Ec. 8 (Kruseman y Ridder, 1975), representada mediante la función de pozo mostrada en las Figuras 14 y 15:

$$s(r,z,t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_0^{\infty} x J_0 [x(K_D)^{1/2}] \left[ w_0(x) + \sum_{n=1}^{\infty} w_n(x) \right] dx \quad \text{Ec. 8}$$

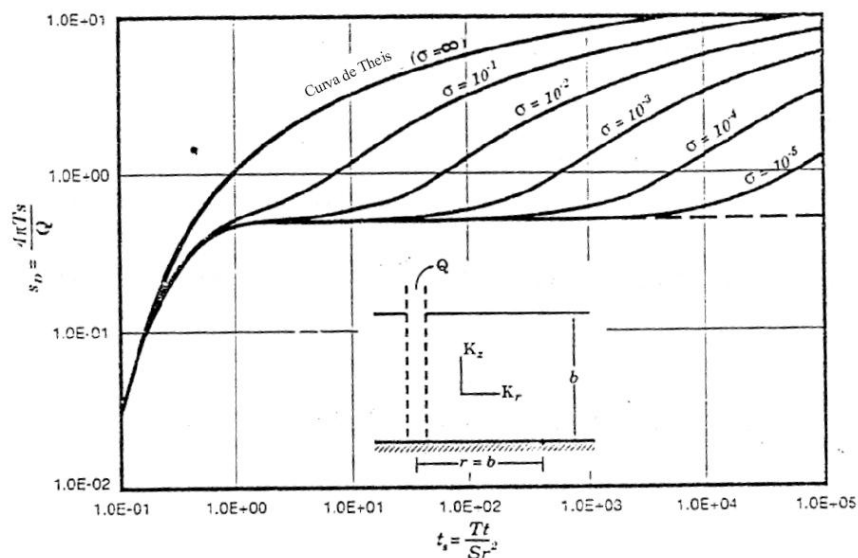


Figura 14 Función de pozo de Neuman (Batu, 1998).

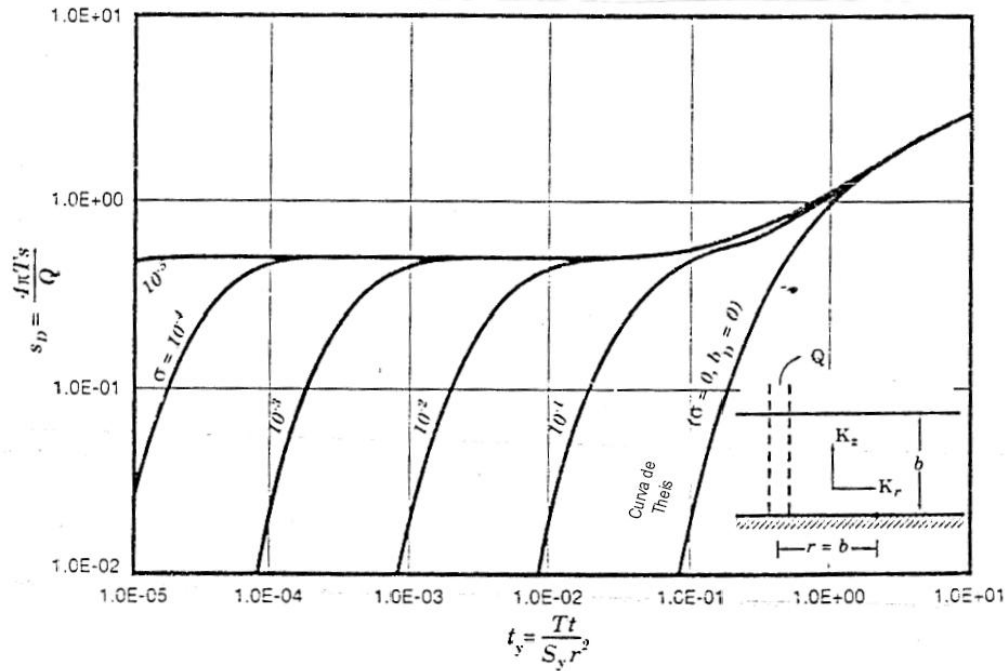


Figura 15 Función de pozo de Neuman (Batu, 1998).

### 3.6 METODOS DE ANALISIS EN LA RECUPERACION DE LOS POZOS DE BOMBEO

Una vez terminado el bombeo, el nivel de agua dejara de descender y comenzará a subir hasta su posición inicial, este periodo de ascenso es denominado de recuperación del pozo, de esta forma la información obtenida durante este periodo, sirve para realizar la comprobación de los resultados dados con los datos durante el periodo de bombeo.

#### 3.6.1 Método de Cooper-Jacob (1946)

Cooper y Jacob en 1946, (Donado, 1999) partieron del supuesto en que a grandes tiempos,  $u$  es muy pequeño ( $u < 0.01$ ), por lo tanto la serie representada por  $W(u)$  puede ser aproximada y la ecuación de Theis puede reescribirse de la siguiente forma:

$$s = \frac{2.30 * Q}{\pi T} \log \frac{2.25Tt_0}{r^2 S} \quad \text{Ec. 9}$$

Ya que  $\frac{2.30 * Q}{\pi T} \neq 0$ , se debe cumplir que  $\frac{2.25Tt_0}{r^2 S} = 1$ , entonces

$$S = \frac{2.25Tt_0}{r^2} \quad \text{Ec. 10}$$

Este método sugiere el siguiente procedimiento:

- ✓ Representar la curva tipo de la Cooper-Jacob, mostrada en la Figura 16.
- ✓ Utilizando los datos de la recuperación se representan los valores de  $s(t)$  en función de  $t/(t-t_s)$  en escala semilogarítmica
- ✓ Trazar una línea recta que ajuste los puntos, preferiblemente los últimos datos ya que son mas próximos al origen.
- ✓ Determinar la pendiente de dicha recta.
- ✓ Determinar la transmisividad dada por la siguiente ecuación

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi a} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde,  $a$  = pendiente de la recta.

- ✓ Verificar que se cumpla

$$\frac{T(t-t_s)}{r^2 S} > 10 \quad \text{Ec. 12}$$

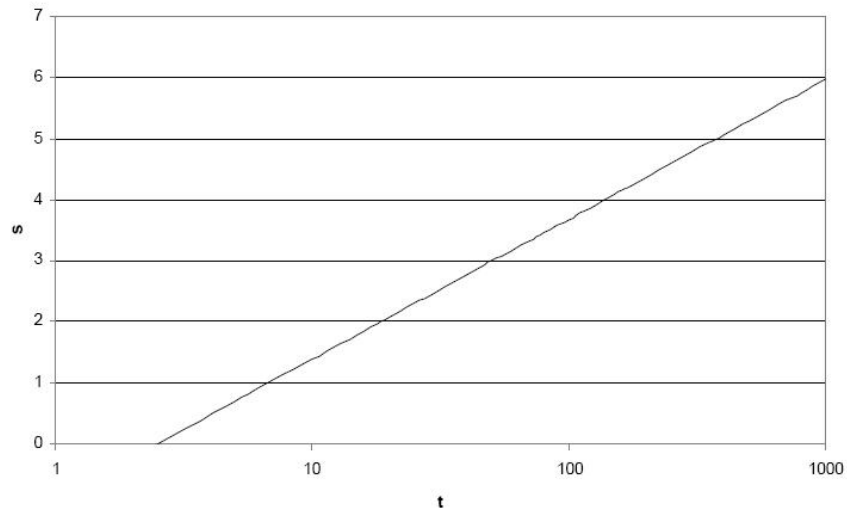


Figura 16 Curva de Cooper-Jacob (Trujillo, 1999).

### 3.7 ANALISIS DE PRUEBAS DE BOMBEO (SOFTWARE EPHEBO)

EPHEBO es principalmente un interfaz para María J, desarrollado por el *Grupo de Hidrogeología de la UPC* (España) por Carbonell et al, cuyo objetivo es la estimación de parámetros hidráulicos, mediante la calibración automática de las pruebas de bombeo por métodos gráficos (Gráfica diagnóstico, Superposición Theis, Superposición Hantush, Cooper-Jacob, Neuman) y otras funcionalidades como: generación de gráficas y documentación con los resultados obtenidos (Alcolea, 2002).

La metodología que abarca esta herramienta está compuesta por la *Edición*, permite introducir los datos de entrada del ensayo en cuanto a medidas y puntos de observación; *Tratamiento*, permite definir los datos necesarios para realizar los distintos análisis, así como realizar todos los cálculos necesarios y *Resultados*, permite analizar los resultados obtenidos.

Aplicando la metodología anterior, se interpretan las 30 pruebas de bombeo de los pozos presentes en el Acuífero de Morroa, teniendo en cuenta las conclusiones generadas con el análisis conjunto de la geología y de la prueba diagnóstico,

obteniendo de esta forma los valores correspondientes a la Transmisividad, que serán verificadas con el resultado obtenido de la prueba de recuperación de cada pozo, el cual se realiza empleando la misma metodología, utilizando el método de análisis de Cooper-Jacob (1946).

A continuación se presentan los resultados de la prueba diagnostico Figura 17, para la prueba de bombeo en la Figura 18, realizada en el Pozo 42, identificado como 44-IV-C-042, ubicado en el municipio de Corozal, ésta prueba se realizó con un caudal constante de 40 L/s y de acuerdo con el análisis geológico y prueba diagnostico la zona de influencia se comporta como un acuífero semiconfinado.

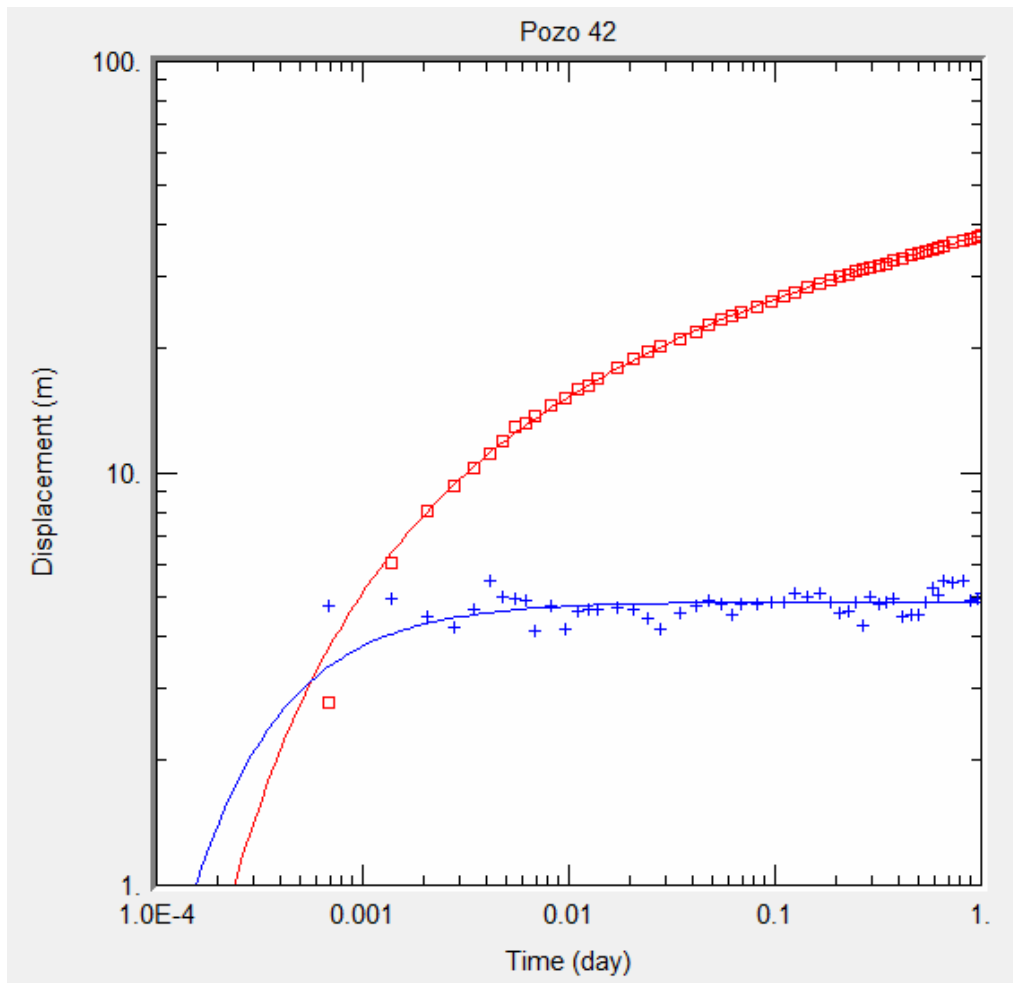
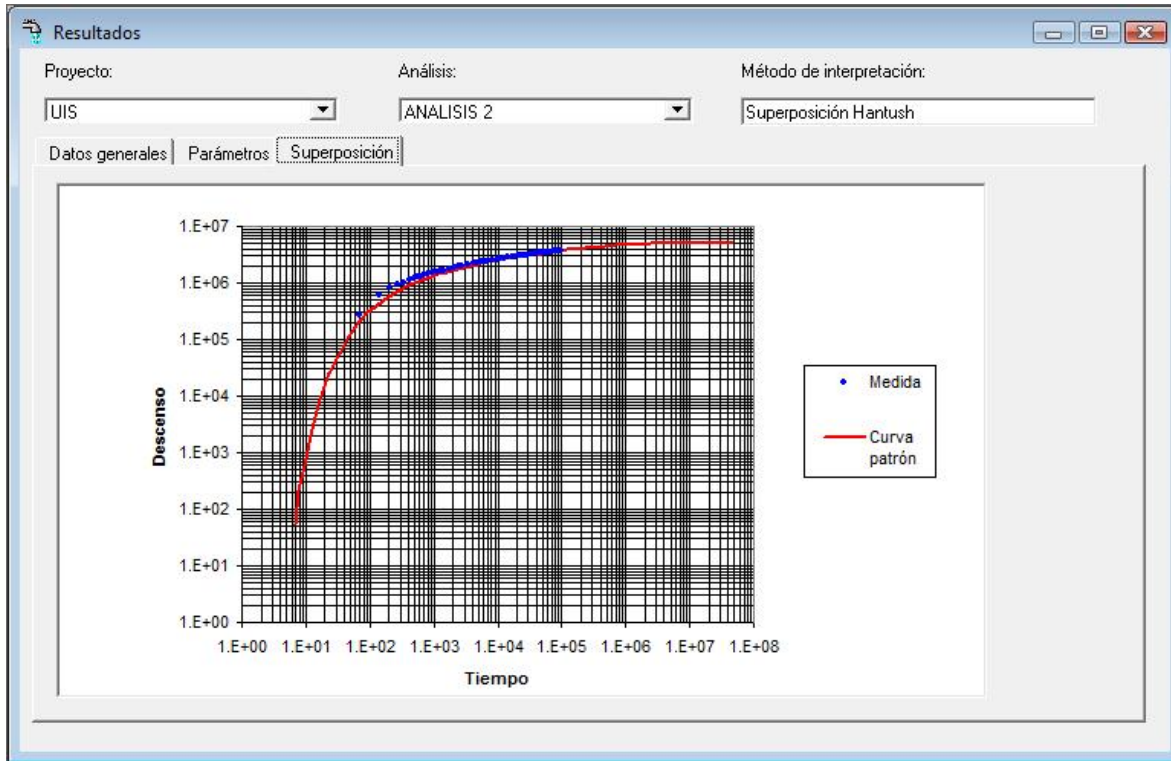


Figura 17 Resultado prueba diagnostico del pozo 42 en el Municipio de Corozal (Software AQTESOLV).



**Figura 18** Resultado de la prueba del pozo 42 en el Municipio de Corozal.

Los resultados generados por el software EPHEBO, muestra los parámetros hidráulicos calculados mediante el ajuste de curvas, entre los datos de entrada (tiempo vs descenso) y el método utilizado para el análisis de cada prueba.

Con el análisis del ajuste de curvas, se determina el valor del parámetro hidráulico de Transmisividad para cada una de las pruebas de bombeo, generando así la Tabla 9 de resultados:

**Tabla 9 Resultados de la interpretación de pruebas de bombeo mediante software EPHEBO.**

IDENTIFICACION	MUNICIPIO	TIPO ACUÍFERO	MÉTODO	TRANSMISIVIDAD
52-II-C-046	Chinú	SEMICONFINADO	SUPERPOSICION HANTUSH (0.01)	5.96386
			COOPER-JACOB	3.1928
52-IV-A-006A	Chinú	SEMICONFINADO	SUPERPOSICION HANTUSH (0.03)	4.58419
			COOPER-JACOB	5.67314
52-IV-A-012	Chinú	SEMICONFINADO	SUPERPOSICION HANTUSH (0.5)	6.79755
			COOPER-JACOB	1.9994
52-IV-A-003	Chinú	SEMICONFINADO	SUPERPOSICION HANTUSH (0.1)	3.22
			COOPER-JACOB	2.188
52-4-A	Chinú	SEMICONFINADO	SUPERPOSICION HANTUSH (0.05)	20.56
			COOPER-JACOB	21.98
44-IV-D-02	Corozal	SEMICONFINADO	SUPERPOSICION HANTUSH (0.05)	145.306
			COOPER-JACOB	381.543
44-IV-D-024	Corozal	SEMICONFINADO	SUPERPOSICION HANTUSH (0.01)	181.72
			COOPER-JACOB	261.296
44-IV-C-042	Corozal	SEMICONFINADO	SUPERPOSICION HANTUSH (0.01)	51.7045
44-II-D-004	Ovejas	CONFINADO	SUPERPOSICION THEIS	17.1912
44-II-D-005	Ovejas	CONFINADO	SUPERPOSICION THEIS	7.95677
44-II-D-007	Ovejas	CONFINADO	SUPERPOSICION THEIS	20.51
			COOPER-JACOB	13.63
44-II-D-008	Ovejas	CONFINADO	SUPERPOSICION THEIS	88.64
44-II-D-008A	Ovejas	CONFINADO	SUPERPOSICION THEIS	12.81
			COOPER-JACOB	9.70
44-II-D-009	Ovejas	CONFINADO	SUPERPOSICION THEIS	29.14
44-II-D-009A	Ovejas	CONFINADO	SUPERPOSICION THEIS	20.71
44-II-D-010	Ovejas	CONFINADO	SUPERPOSICION THEIS	25.62
-	Ovejas	CONFINADO	SUPERPOSICION THEIS	35.73
			COOPER-JACOB	39.68
-	Ovejas	CONFINADO	SUPERPOSICION THEIS	27.64
			COOPER-JACOB	40.71
45-I-C-001	Ovejas	CONFINADO	SUPERPOSICION THEIS	92.39
			COOPER-JACOB	91.59
-	Ovejas	CONFINADO	SUPERPOSICION THEIS	21.24
-	Ovejas	CONFINADO	SUPERPOSICION THEIS	15.19
-	Ovejas	CONFINADO	SUPERPOSICION THEIS	12.77
-	Pueblo Nuevo	SEMICONFINADO	SUPERPOSICION HANTUSH (0.01)	14.75
			COOPER-JACOB	10.73
-	Pueblo Nuevo	SEMICONFINADO	SUPERPOSICION HANTUSH (0.05)	10.12
			COOPER-JACOB	11.38
52-II-C-019	Sampués	SEMICONFINADO	SUPERPOSICION HANTUSH (0.01)	11.98
			COOPER-JACOB	7.06
52-II-A-029	Sampués	SEMICONFINADO	SUPERPOSICION HANTUSH (0.05)	26.88
52-II-A-030	Sampués	SEMICONFINADO	SUPERPOSICION HANTUSH (0.01)	47.04
-	Sincé	SEMICONFINADO	SUPERPOSICION HANTUSH (0.01)	31.78
-	Sincé	SEMICONFINADO	SUPERPOSICION HANTUSH (0.1)	47.38
			COOPER-JACOB	25.59
-	Sincé	SEMICONFINADO	SUPERPOSICION HANTUSH (0.05)	30.41
			COOPER-JACOB	30.44

### 3.8 DISTRIBUCION PUNTUAL

Producto de los análisis previos para cada prueba de bombeo, la genera la distribución puntual de los pozos presentado en la Figura 19 con sus respectivos valores de Transmisividad en el área del Acuífero Morroa, sin embargo debido a la falta de coordenadas de 8 pozos se pierde información de sus respectivos parámetros, por lo tanto no pueden ser ubicados y la distribución queda conformada por 22 pozos, con detalle en el Anexo B (Plano de la distribución puntual de los pozos de bombeo).

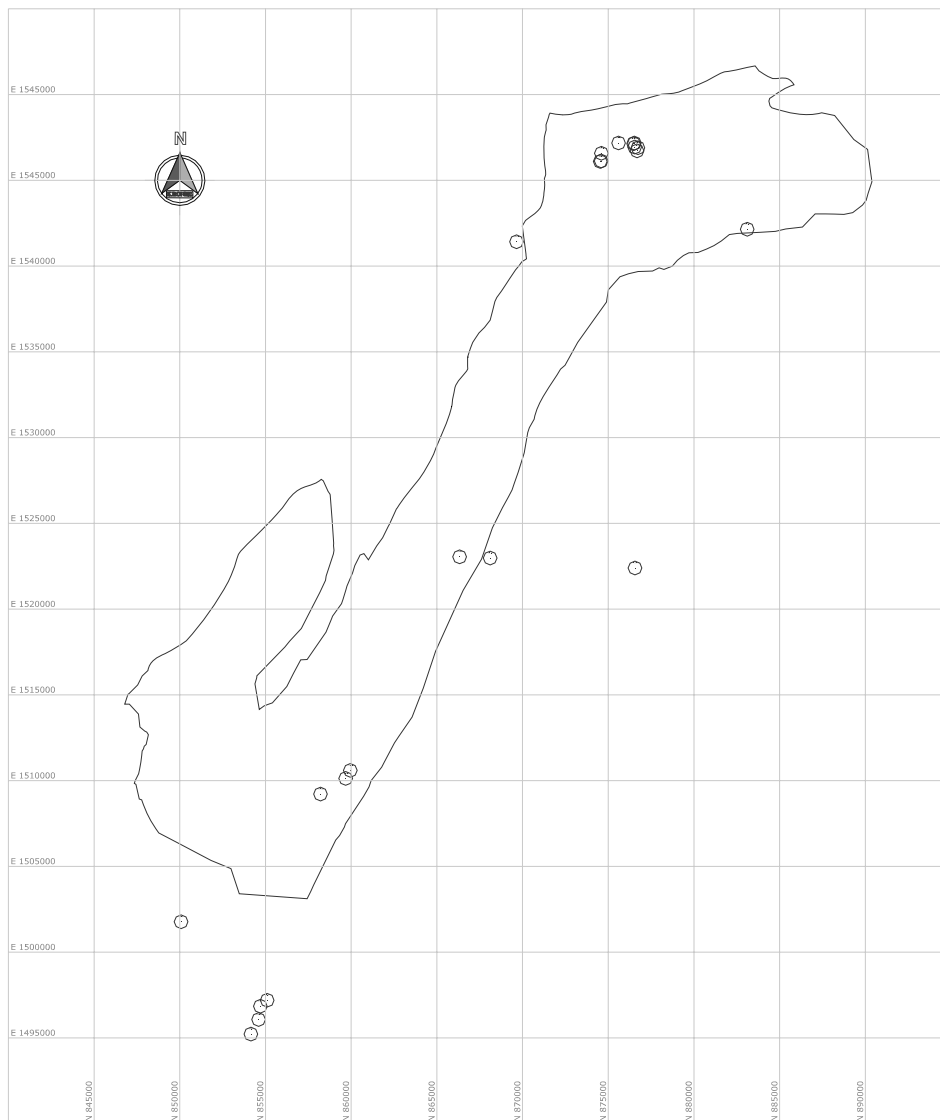


Figura 19 Distribución puntual de los pozos de bombeo.

## 4. CARACTERIZACION ESPACIAL

Los fenómenos hidrológicos y los parámetros hidráulicos son de gran variabilidad y aleatoriedad, hecho que impide la predicción con exactitud los valores de las propiedades y parámetros en toda la zona de estudio. Existen diversas técnicas para regionalizar las variables medidas puntualmente, dentro de ellos se destaca la Geoestadística. Esta última proporciona una serie de herramientas para evaluar con rigor los efectos de la heterogeneidad natural. Uno de los propósitos de la geoestadística es la caracterización del fenómeno natural, aplicando la estimación de métodos de cartografía, cálculo de valores promedios y ubicación de puntos de muestreo, entre otros, a partir de un conjunto de medidas, se obtiene no sólo la estimación de la variable sino también una medida de incertidumbre, asociada igualmente a la insuficiente información acerca de su distribución espacial.

### 4.1 METODOS DE INTERPOLACION ESPACIAL (SOFTWARE MATLAB)

Matlab ® es una herramienta de programación que a partir del uso de códigos crea sesiones gráficas para realizar todo tipo de distribuciones; por medio de un aporte matemático y de datos de precisión simple y aritmética, que ofrece ahorros significativos tanto de rendimiento como almacenamiento, permitiendo una precisión de alta calidad. En este caso se percibe la necesidad de disponer de elementos flexibles, rápidos y de fácil manejo para la visualización, exploración y clasificación de datos geoespaciales que permitan obtener todo tipo de información.

#### 4.1.1 Método GRIDDATA

Es un método de interpolación por splines (es una curva definida a trozos mediante polinomios) biarmónicos, una ecuación para interpolar modelos de terreno donde la altura es conocida, salvo en una región  $\Omega$  del plano; es decir

ajusta una superficie a un conjunto de datos distribuidos de manera no uniforme. La interpolación se refiere a un código que está diseñado para predecir siempre con exactitud todos los datos suministrados. La superficie resultado siempre pasa por los puntos suministrados (Barajas, 2009).

A continuación la Figura 20 muestra el resultado de transmisividades, empleando el método GRIDDATA.

El método GRIDDATA es una función que se adapta más a los datos inicialmente suministrados, es decir partiendo de que los mayores valores de transmisividad se encuentran concentrados en el medio de la cuenca inicia su proceso de suavizar las curvas logrando disminuir sus valores y ajustándolos cada vez más a los datos dispersos.

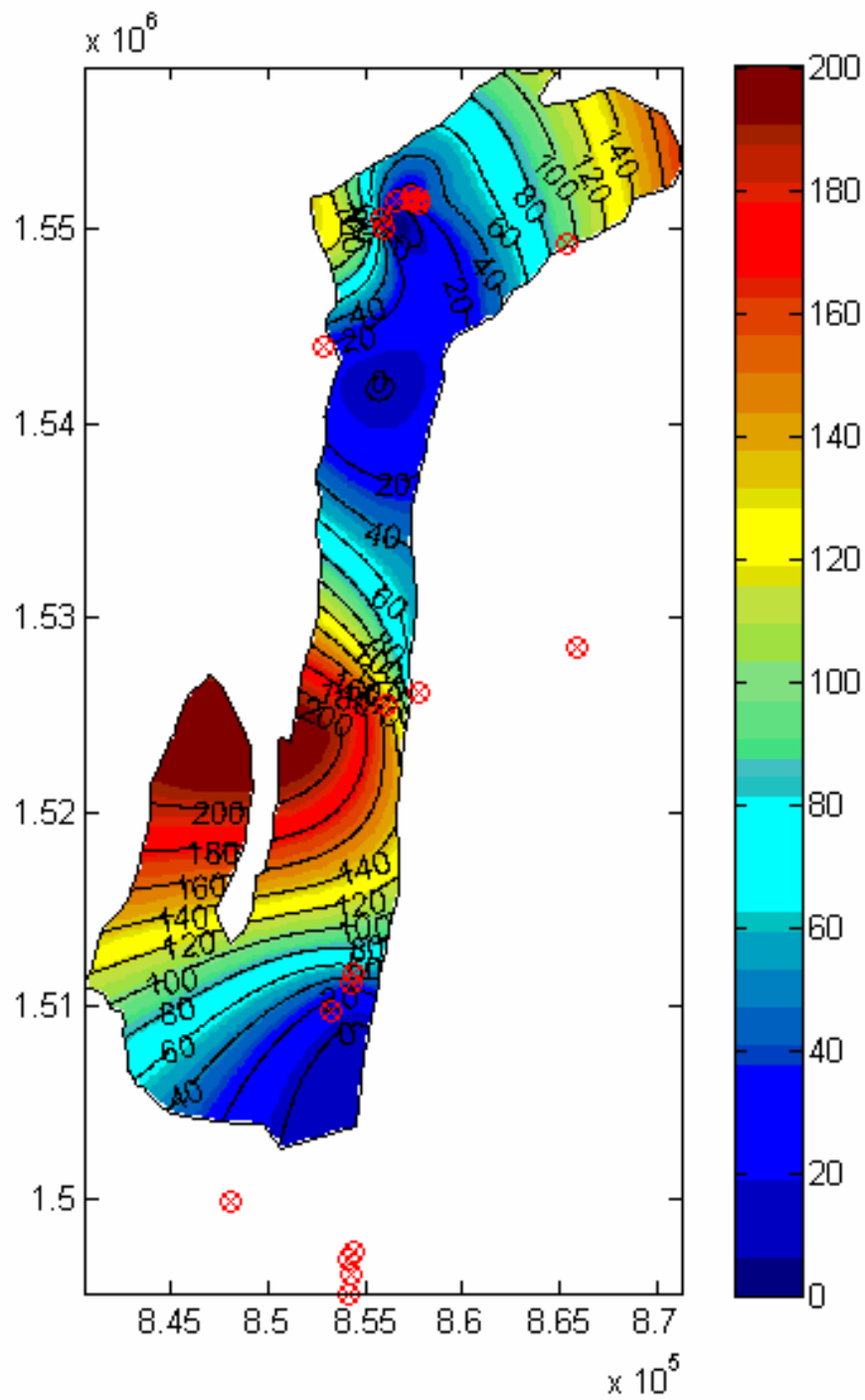


Figura 20 Resultado de transmisividades empleando el método GRIDDATA.

#### 4.1.2 Método GRIDFIT

El método traza una superficie que representa de la mejor manera posible el comportamiento espacial de un conjunto de datos distribuidos de manera no uniforme. Este método permite usar tres paradigmas diferentes de regularización de la superficie:

- ✓ Gradient: Se intenta que el gradiente de la superficie sea tan suave como sea posible en todas las direcciones.
- ✓ Diffusion: Se modela la superficie usando una aproximación en diferencias finitas del operador Laplaciano.
- ✓ Springs: Se usa un modelo de resortes que conectan los nodos de la grilla unos con otros y con los datos suministrados. Este paradigma tiende a arrastrar la superficie hacia la media de los datos suministrados.

A continuación las Figuras 21, 22 y 23 muestran el resultado de transmisividades, empleando el método GRIDFIT con sus tres respectivos paradigmas:

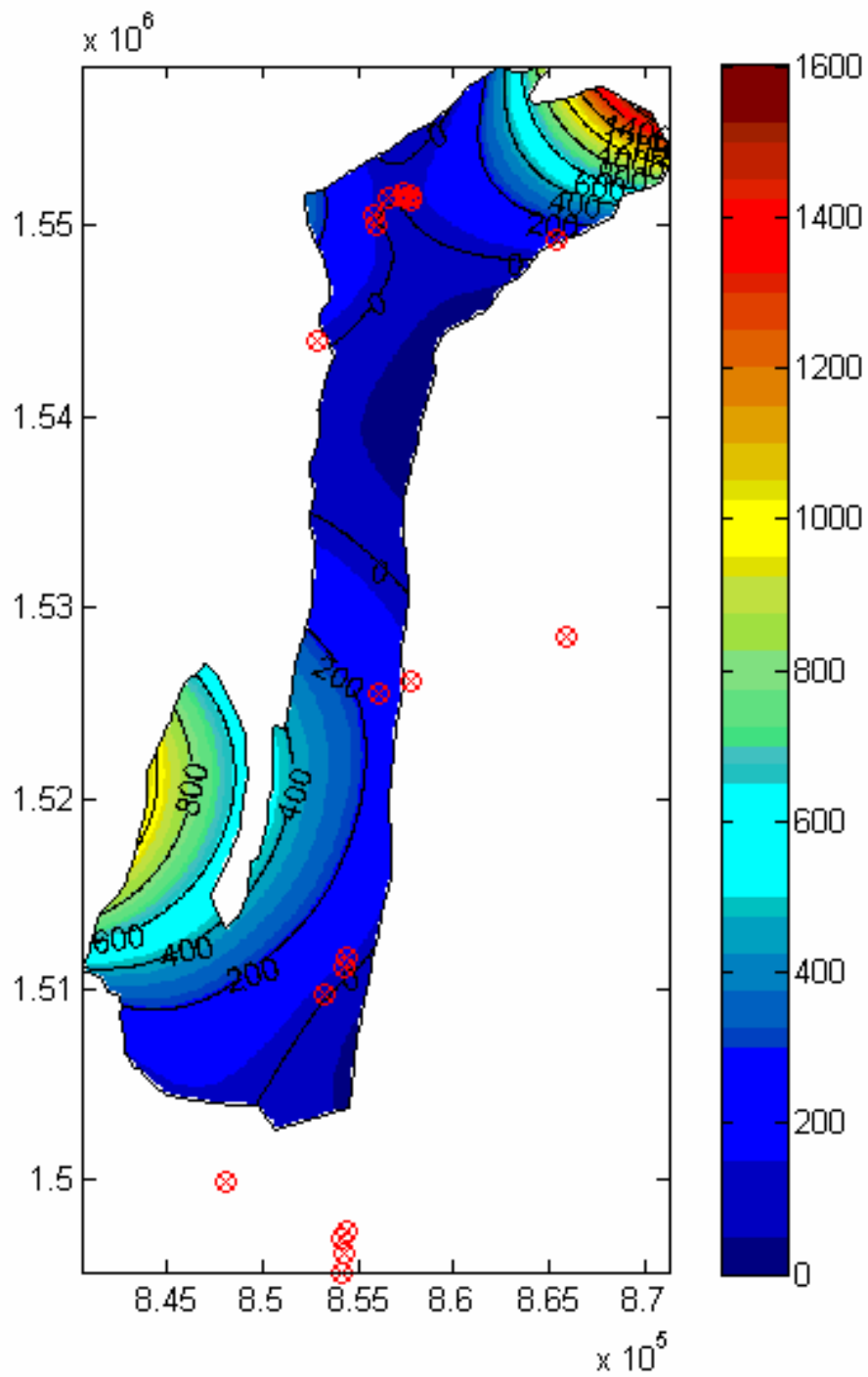


Figura 21 Resultado de transmisividades empleando el método GRIDFIT-GRADIENT.

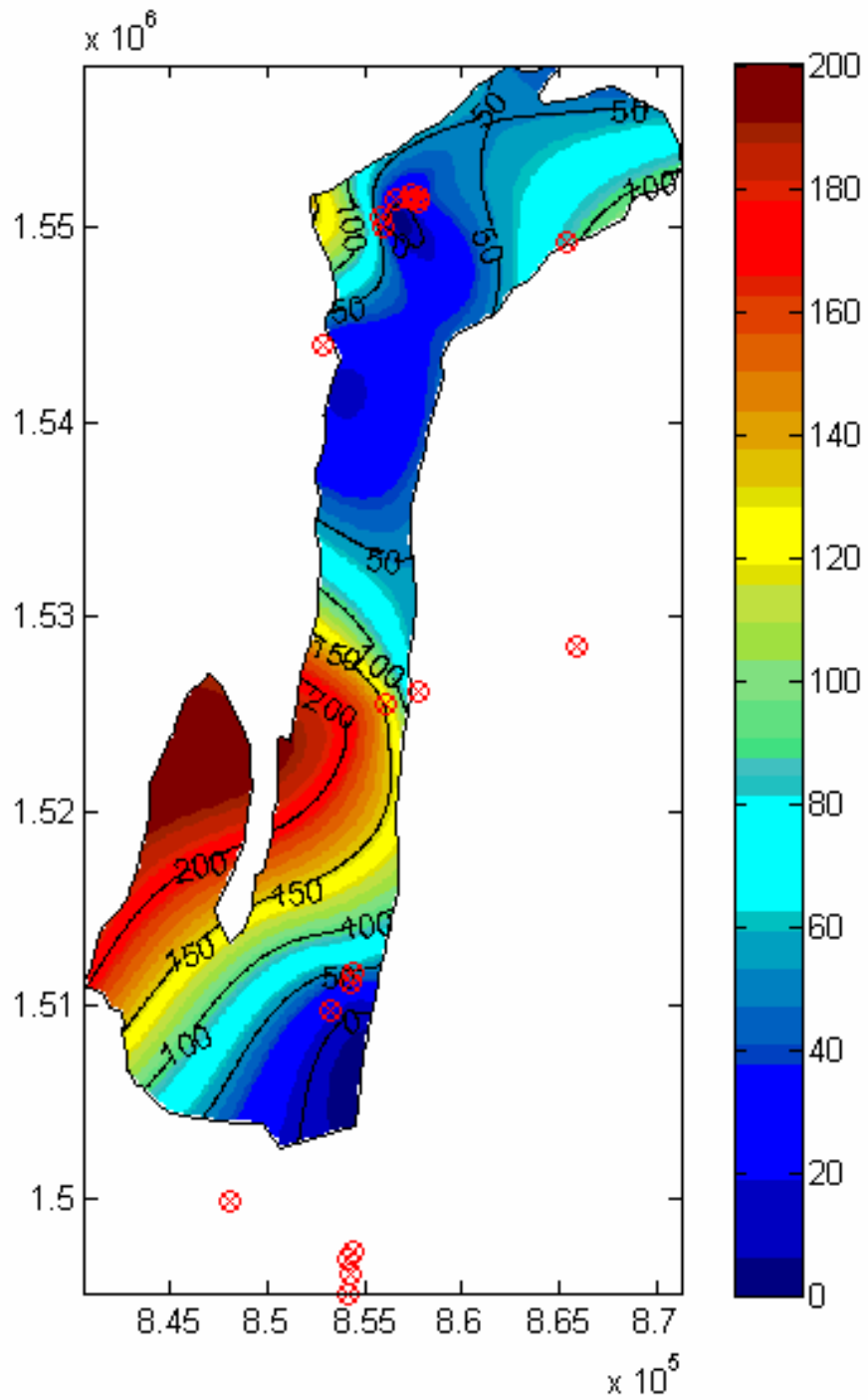


Figura 22 Resultado de transmisividades empleando el método GRIDFIT-DIFFUSION.

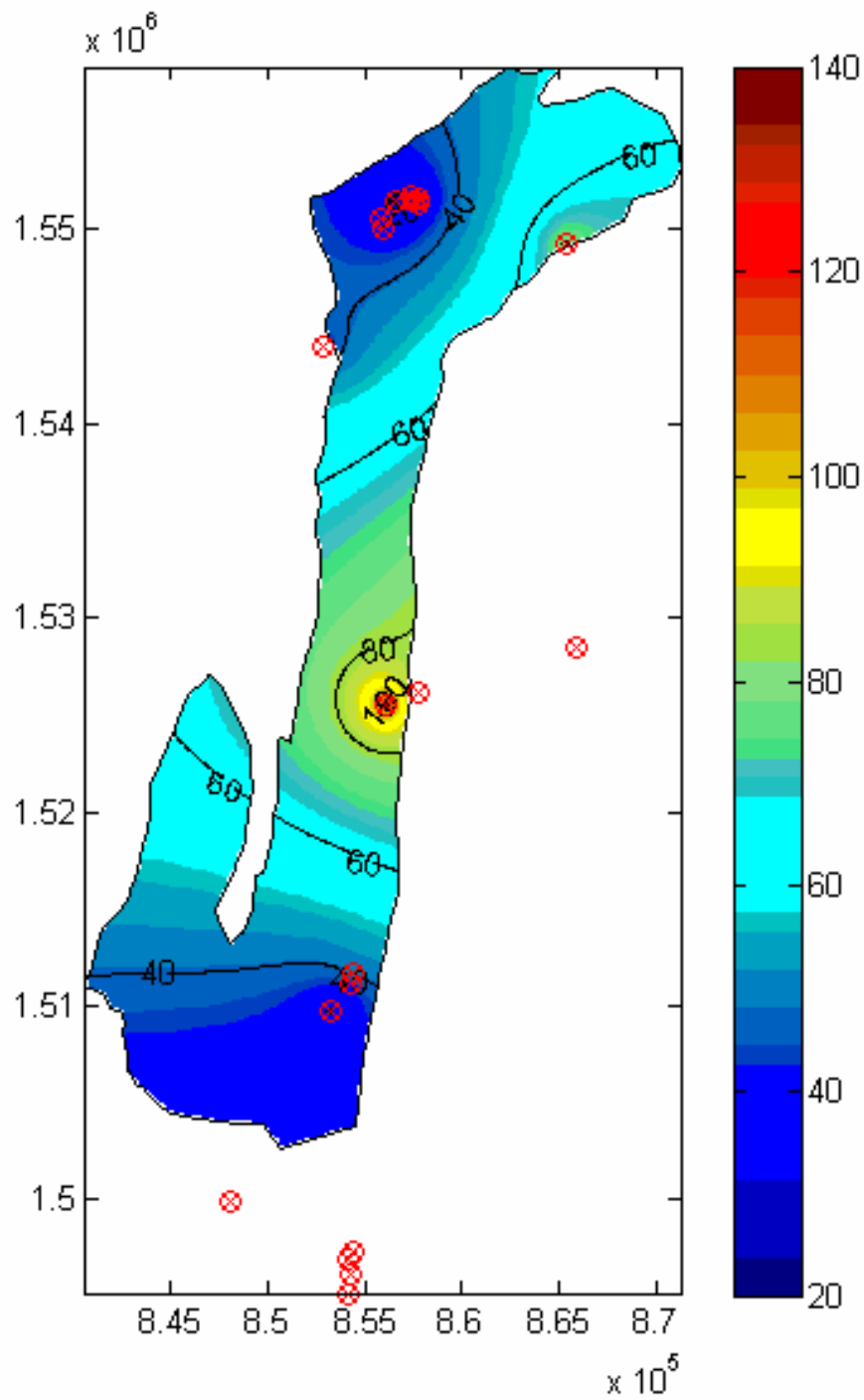


Figura 23 Resultado de transmisividades empleando el método GRIDFIT-SPRINGS.

## 4.2 METODO GEOESTADISTICO DE KRIGEADO

El objetivo básico del método es estimar la variable de interés  $Z^*(x)$ , de  $Z(x)$ , como una combinación lineal de los valores medidos  $Z_i$  en los puntos de observación  $x_i$ . También se busca obtener la varianza del error de estimación. Por ser lineal, el estimador tiene la siguiente forma (Samper y Carrera, 1996).

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i \quad \text{Ec. 13}$$

Los parámetros  $\lambda_i$  se denominan coeficientes de ponderación o coeficientes de kriging.  $Z^*$  debe ser insesgado, es decir,  $E(Z^* - Z) = 0$ , por lo que suponiendo que  $Z$  es estacionaria la varianza del error de estimación es:

$$\begin{aligned} \text{Var} = (Z^* - Z) &= E[(Z^* - Z)^2] = & \text{Ec. 14} \\ &= E\left[\left(\sum_i \lambda_i Z_i\right)\left(\sum_j \lambda_j Z_j\right)\right] - 2E\left[\sum_i \lambda_i Z_i Z\right] + E[Z^2] = \\ &= \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j E(Z_i Z_j) - 2\sum_i \lambda_i E(Z_i Z) + E(Z^2) \end{aligned}$$

Si se conocen  $E(Z_i Z_j)$ ,  $E(Z_i Z)$  y  $E(Z^2)$ , lo cual es posible si se conoce el semivariograma o bien la función de covarianza, entonces basta obtener  $\lambda_i$  ( $i=1 \dots n$ , número de puntos de observación), para que  $Z_i^*$  y su varianza queden perfectamente determinados. Los coeficientes  $\lambda_i$  se obtienen imponiendo que la varianza de estimación sea mínima. Esto da lugar a un sistema lineal de ecuaciones que se conoce con el nombre de ecuaciones de kriging.

Los software empleados para los posteriores análisis son GSWIN9 y SURFER estos programas de análisis geoestadístico permiten medir fácilmente e ilustrar las relaciones espaciales de los datos geo-referenciados, analizando los datos de autocorrelación.

#### 4.2.1 Análisis univariado (Software GSWIN9)

El tratamiento de los datos consiste en encontrar los valores de los principales estadísticos, por medio del software GSWIN9, para posteriormente realizar el análisis estadístico, de la información contenida en la Tabla 10, que presenta los valores de las transmisividades con su respectiva ubicación. A continuación, utilizan esta información para optimizar, estadísticamente rigurosos mapas de la zona de muestreo.

**Tabla 10 Transmisividades obtenidas en EPHEBO.**

COORDENADAS		TRANSMISIVIDAD
NORTE	ESTE	
1501775	850075	5.96
1495225	854150	4.58
1497200	855100	6.79
1496850	854700	3.22
1496075	854600	20.56
1523050	866330	145.30
1522400	876560	181.72
1522980	868107	51.70
1547140	876480	17.19
1547180	875600	7.95
1546900	876730	20.51
1546940.25	876541.9	12.81
1546580	874600	29.14
1541419.49	869647.27	20.71
1546100	874530	25.62
1542150.26	883106.85	92.39
1546720	876678	21.24
1547175	876524	15.19
1546129	874589	12.77
1509220	858210	11.98
1510130	859680	26.88
1510600	859950	47.04

En las Figuras 24 y 25 se presenta el histograma de frecuencia de datos, indicando su frecuencia relativa. Con el fin de normalizar las distribuciones y de ampliar los datos a un intervalo de 0 a 1, se aplica una transformación en la variable Z, debido a que los valores son extremadamente grandes.

Los datos se acomodan entorno a valores muy bajos, con una desviación bastante alta debido a la variabilidad de la Transmisividad, esto muestra que el campo no es muy uniforme, como se puede observar en la grafica del campo mostrado en la Figura 26.

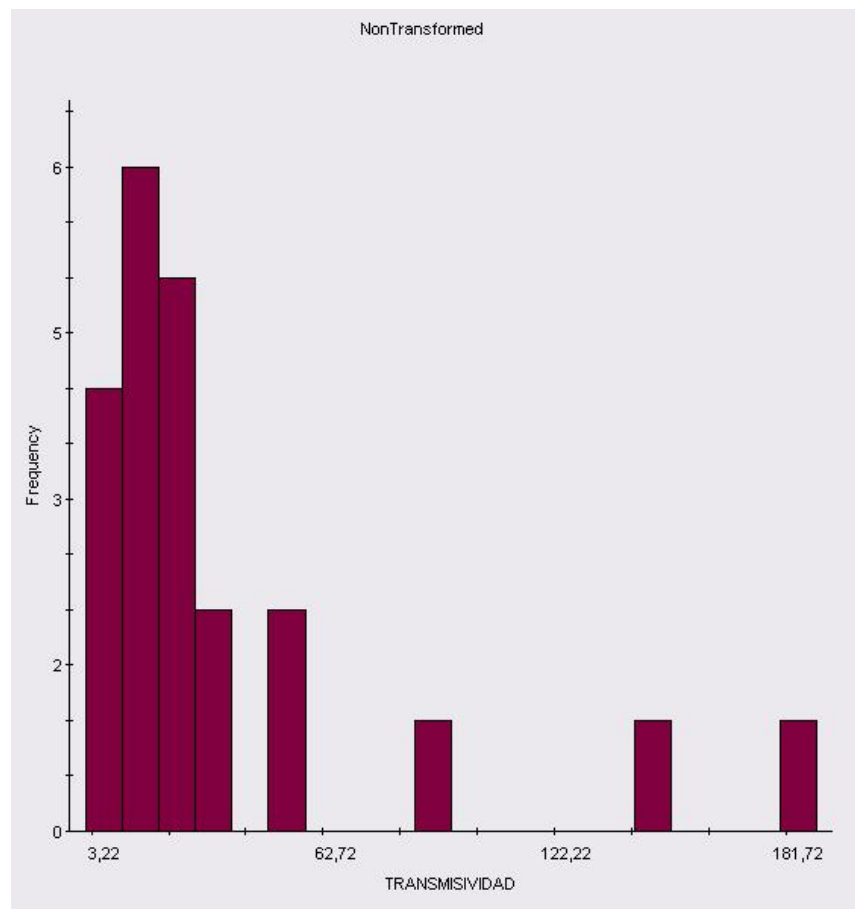


Figura 24 Histograma de los datos no transformados, indicando su frecuencia relativa (Software GSWIN9).

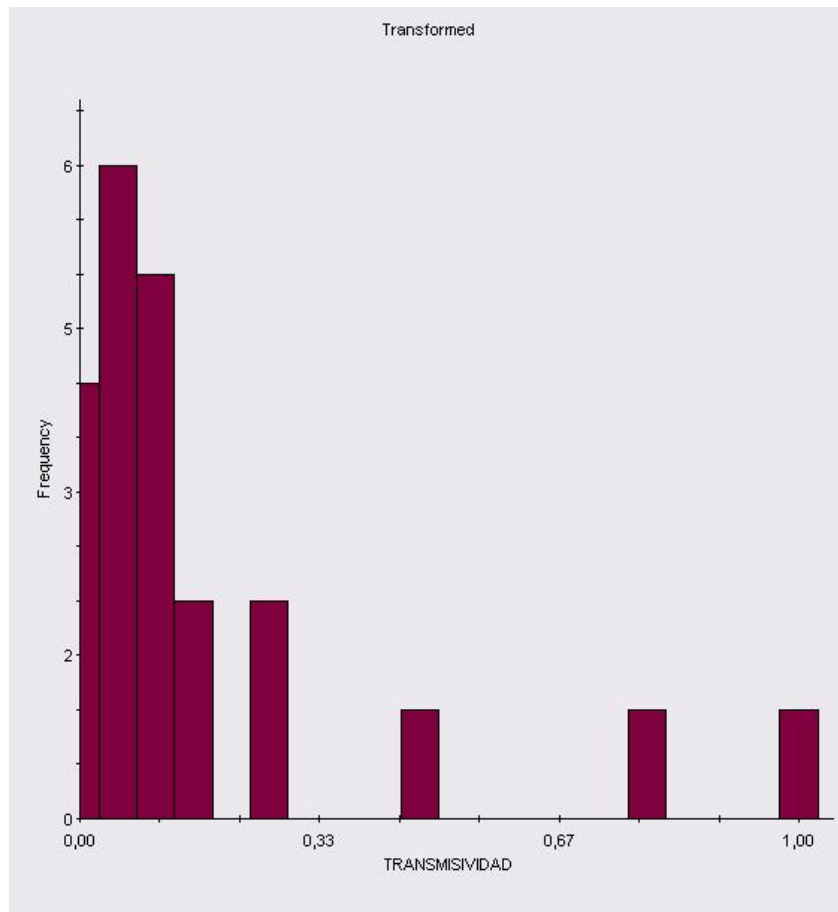


Figura 25 Histograma de los datos transformados, indicando su frecuencia relativa (Software GSWIN9).

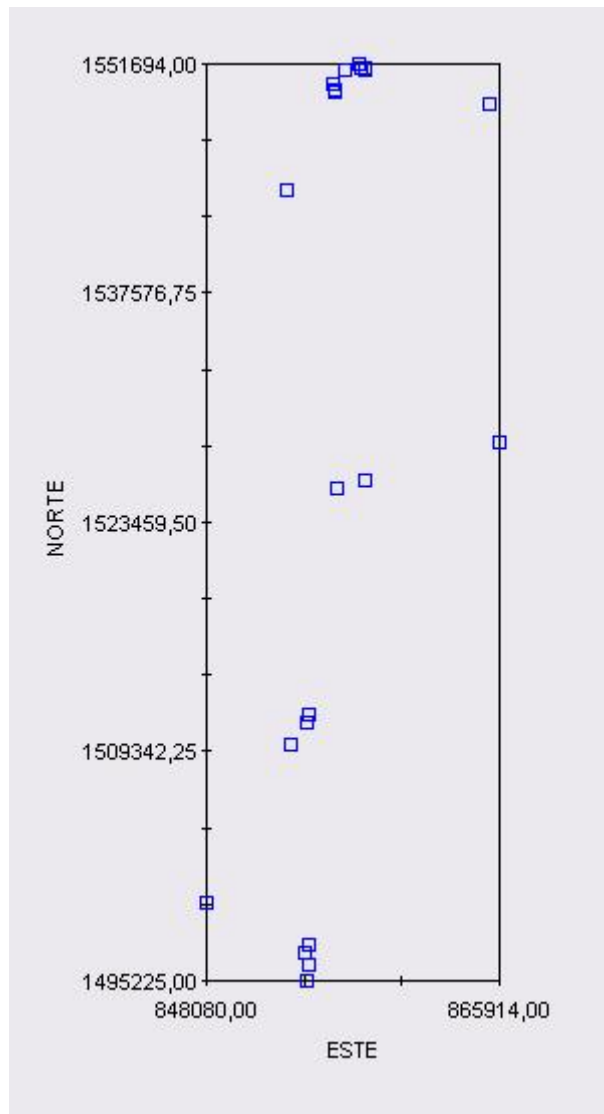


Figura 26 Disposición de los datos en el campo (Software GSWIN9).

#### 4.2.2 Semivariograma

Es una medida general de la variabilidad espacial, y define las diferencias entre un punto no muestreado y un con medida que le sea cercano. De una forma más matemática, mide la variabilidad de una variable aleatoria en dos posiciones distintas (de la varianza del cambio a una distancia  $h$ ).

Consideremos dos valores numéricos  $Z(x)$  y  $Z(x+h)$ , en dos puntos  $x$  y  $x+h$  separados por el vector  $h$ . La variabilidad de estas dos cantidades está caracterizada por la función variograma  $\gamma(h)$ , que está definida como la mitad de la esperanza de la variable aleatoria  $[Z(x) - Z(x+h)]^2$ , es decir:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad \text{Ec. 15}$$

Considerando el caso general, el Variograma es una función tanto del punto como de la distancia de separación entre los puntos  $\gamma(h) = \gamma(x, h)$  (Ortiz, 2005).

Un estimador del Variograma se obtiene a través de un promedio aritmético de las diferencias al cuadrado de los valores de pares de puntos aproximadamente separados por el vector  $h$ .

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad \text{Ec. 16}$$

Donde  $N(h)$  corresponde al número de pares encontrados a una distancia de separación de aproximadamente  $h$  y  $\gamma^*(h)$  corresponde al semivariograma experimental. En la práctica, lo que se hace es calcular el semivariograma experimental y ajustarlo a algún semivariograma teórico; Los semivariogramas teóricos no son más que funciones con una expresión analítica sencilla y que, por ello, se emplean frecuentemente para representar semivariogramas reales. Los más comunes se muestran a continuación en la Figura 27.

Se calculan los semivariogramas para cuatro direcciones diferentes. Una primera con un azimut de  $0^\circ$ , otra con azimut de  $45^\circ$ , otra con azimut de  $90^\circ$  y otra con azimut de  $135^\circ$ .

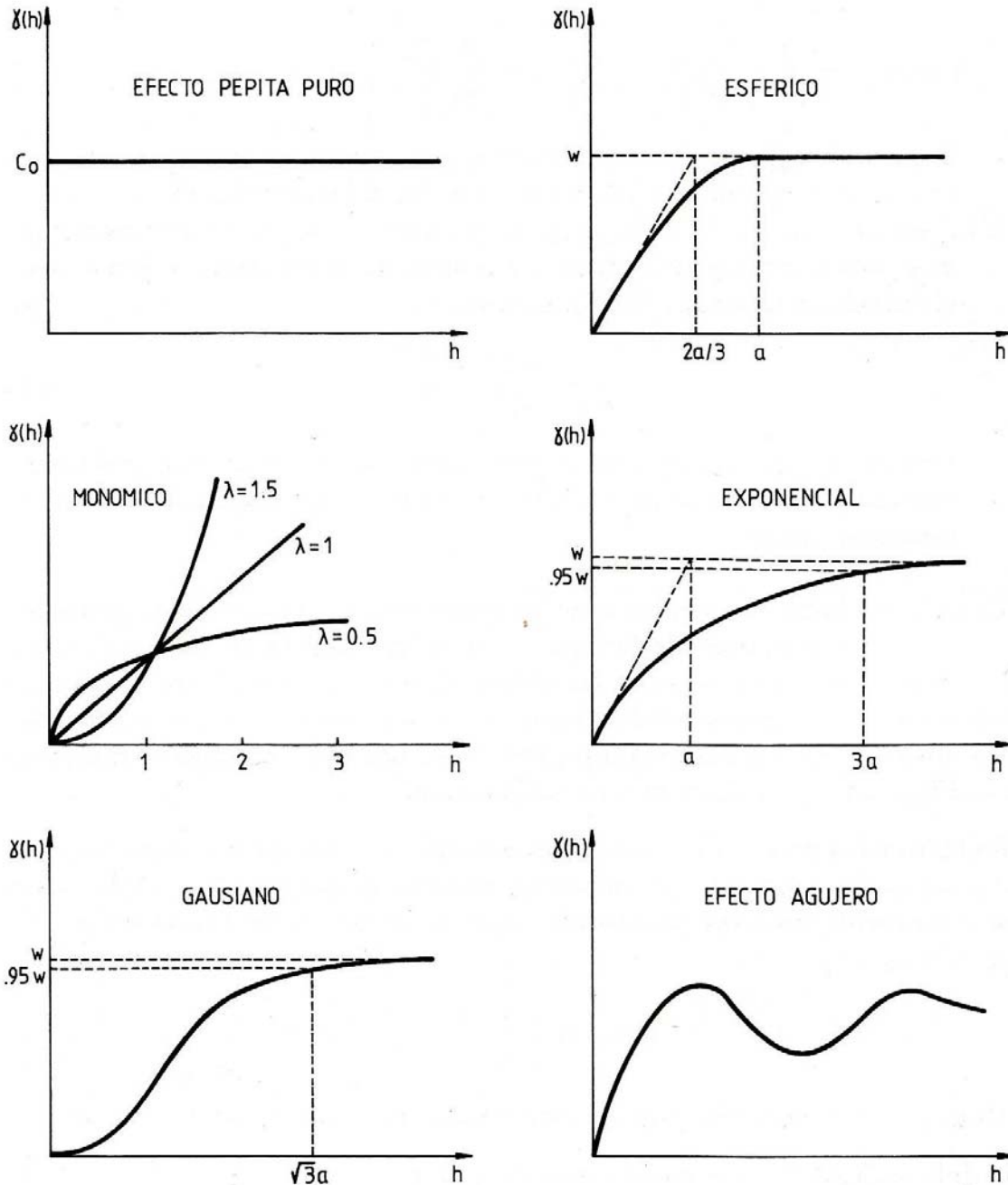


Figura 27 Semivariogramas teóricos más comunes. (Samper y Carrera, 1996)

En los cuatro casos se analizaron intervalos de 1885 metros de separación, en las Figuras 28, 29, 30 y 31 se presentan los semivariogramas con su respectivo teórico y parámetros, donde  $C_0$  es el valor del efecto pepita,  $C_0+C$  es el umbral, A

es la distancia de separación en la que la dependencia espacial es evidente, a esto se le llama alcance efectivo,  $r^2$  proporciona una indicación de lo bien que el modelo se inscribe en el Variograma de datos y RSS la suma residual de los cuadrados proporciona una medida exacta de cuán bien el modelo inscribe en el Variograma de datos .

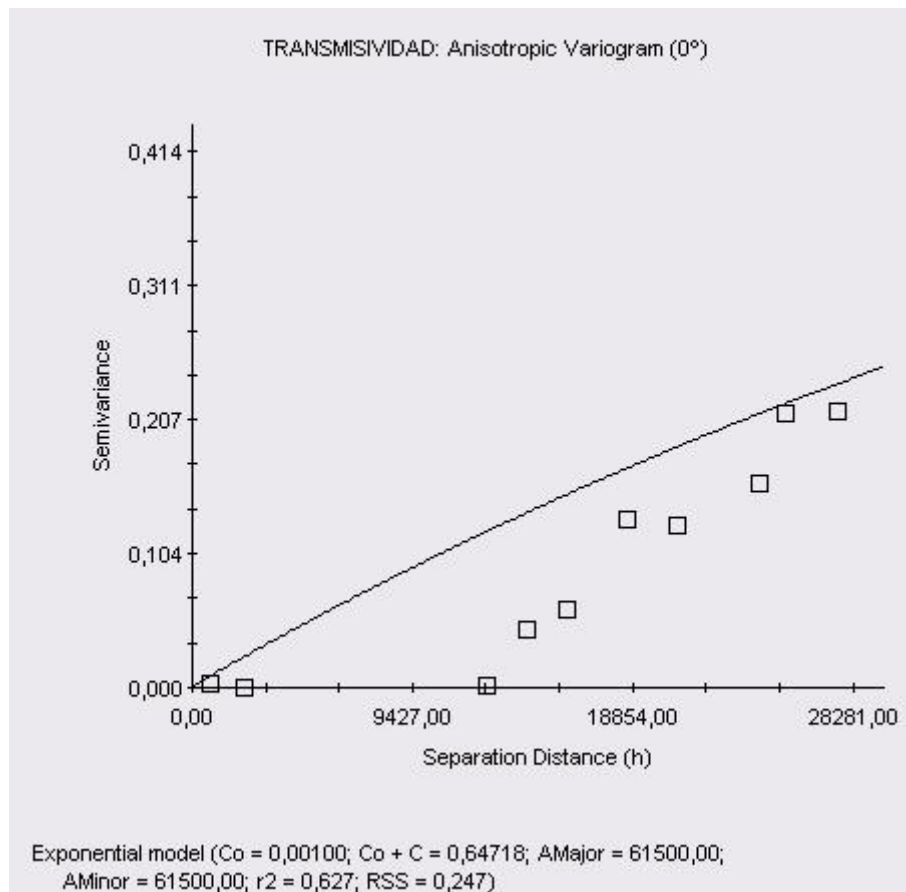


Figura 28 Semivariograma muestral y teórico ajustado 0° (Software GSWIN9).

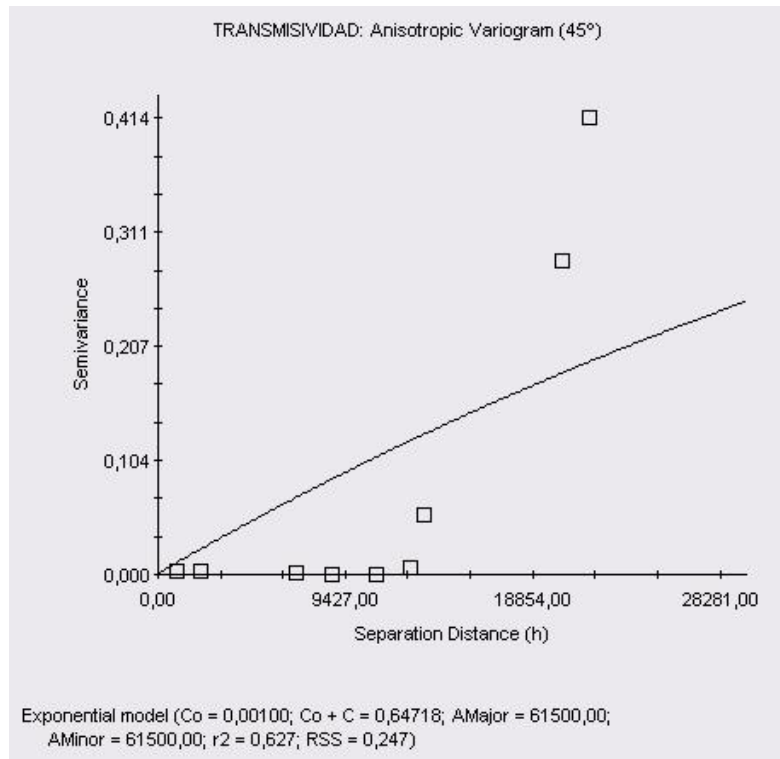


Figura 29 Semivariograma muestral y teórico ajustado 45° (Software GSWIN9).

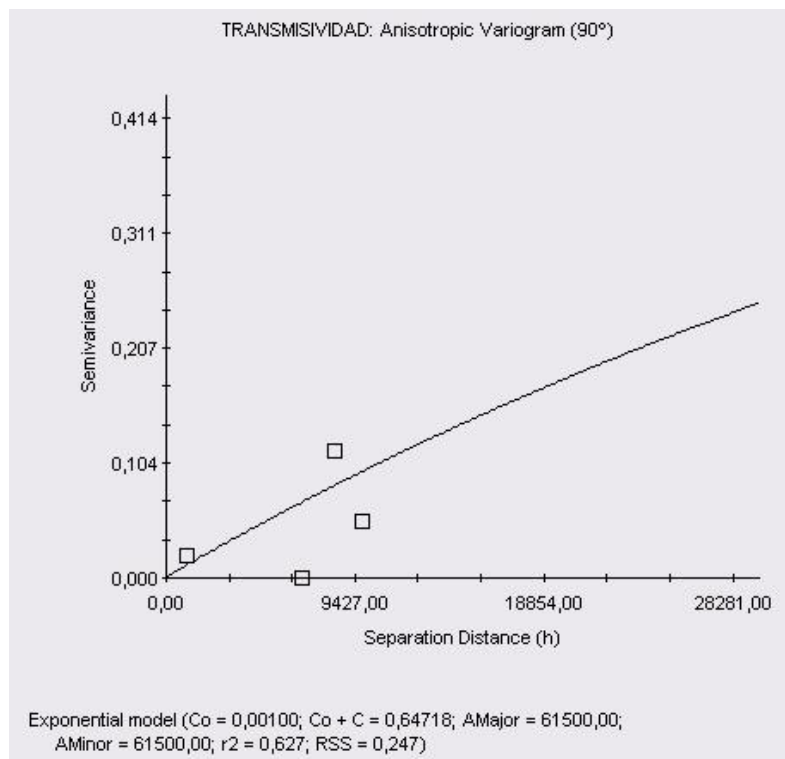


Figura 30 Semivariograma muestral y teórico ajustado 90° (Software GSWIN9).

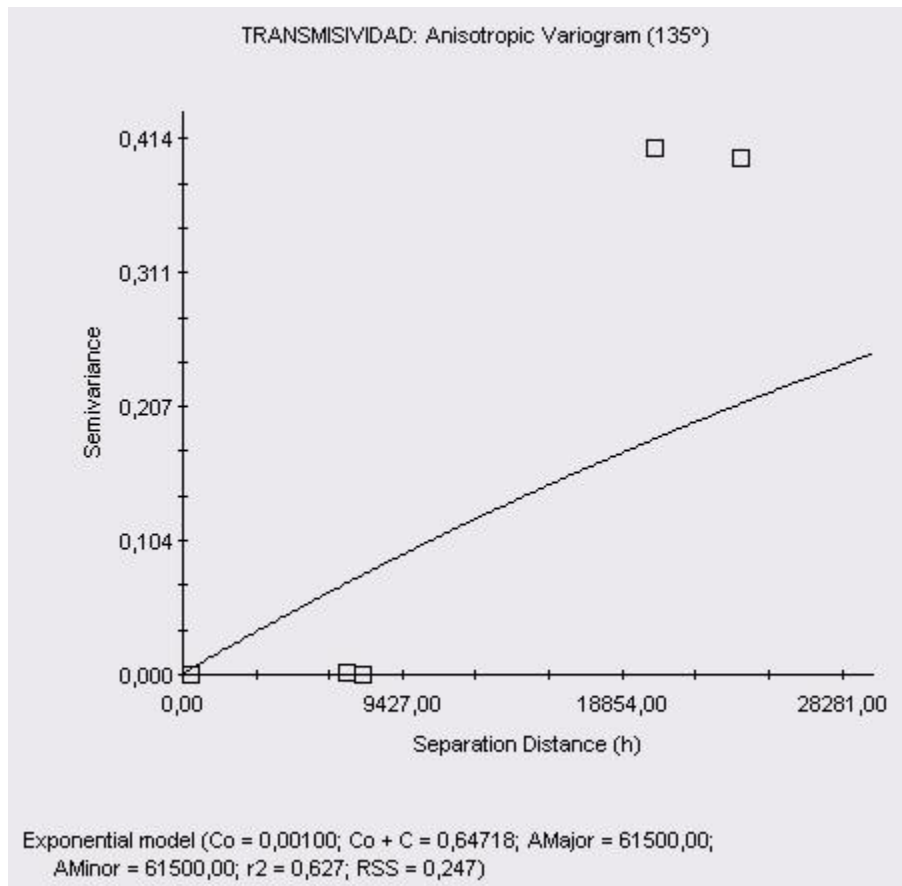


Figura 31 Semivariograma muestral y teórico ajustado 135° (Software GSWIN9).

#### 4.2.3 Estimación condicionada (Software GSWIN9-SURFER)

Una vez se tiene la descripción del semivariograma (modelo, alcance, anisotropía y pepita), puede llevarse a cabo una “interpolación” en los puntos no muestreados, en base al semivariograma y a las medidas disponibles, obteniendo como resultado la distribución de la variabilidad de la transmisividad en la Figura 32 en 3D y en la Figura 33 en 2D.

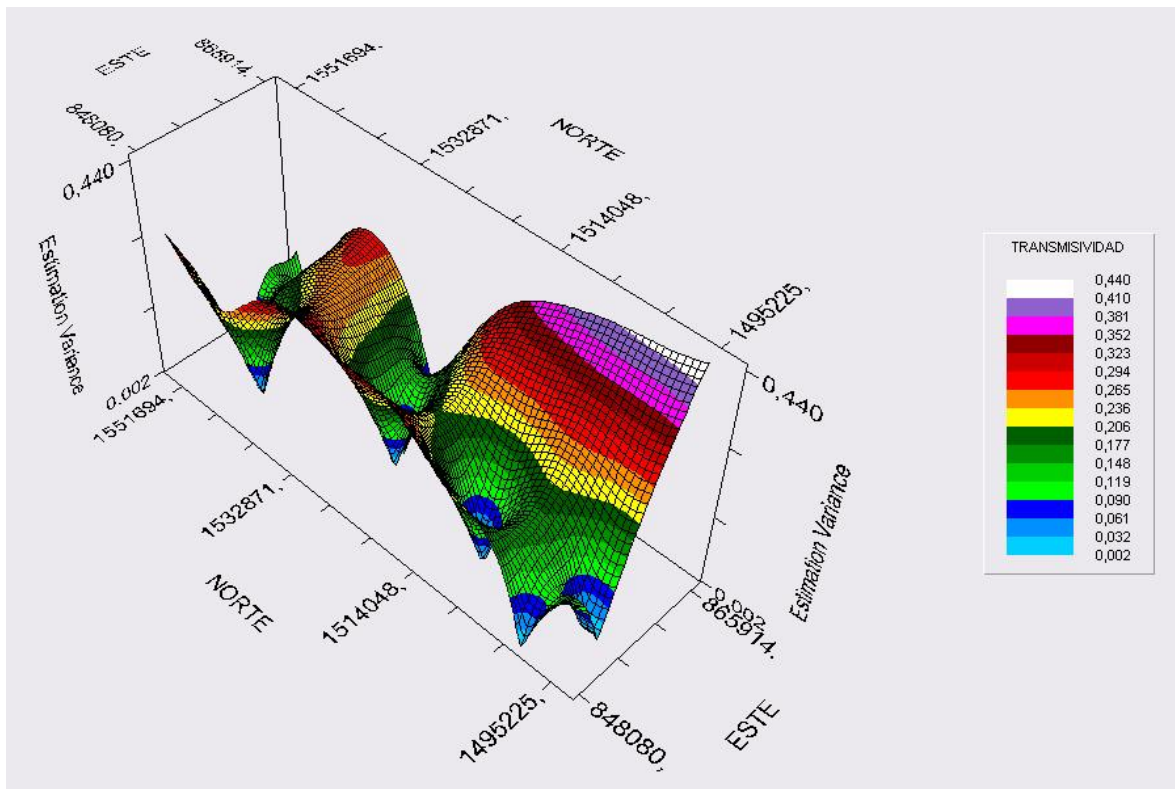


Figura 32 Campo de la varianza de estimación del Kriging en 3D (Software GSWIN9).

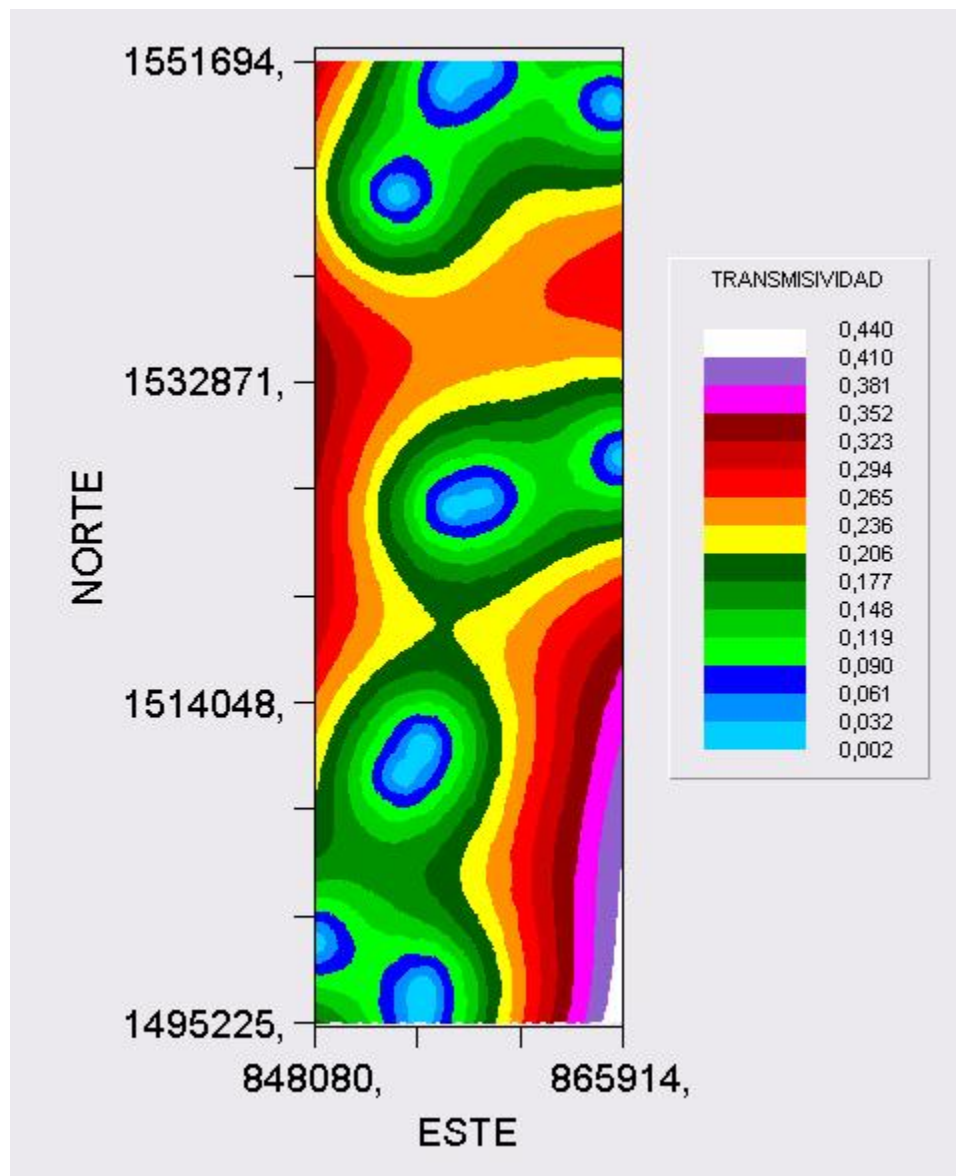


Figura 33 Campo de la varianza de estimación del Kriging en 2D (Software GSWIN9).

Con el semivariograma teórico definido anteriormente (modelo exponencial), se realiza la estimación condicionada de las transmisividades utilizando el software SURFER, presentando en la Figura 34 el mapa de estimación de las transmisividades.

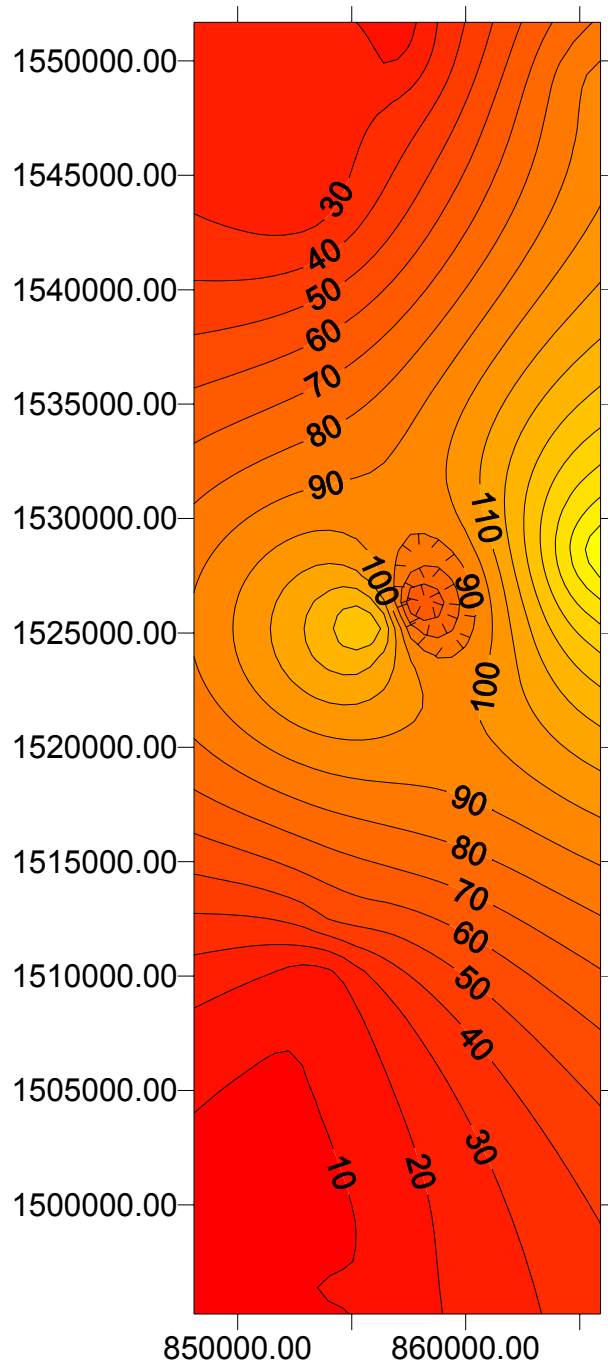


Figura 34 Mapa de estimación de las transmisividades con Kriging Ordinario (Software, SURFER).

## 5. ANALISIS COMPLEMENTARIOS

La distribución de los pozos de bombeo obtenidos, se encuentran concentradas en los extremos norte y sur del acuífero como se puede observar en la Figura 26. Con base en información secundaria se cuenta con un inventario de campo de pozos del Municipio de Corozal, mostrado a continuación en la Tabla 11, obtenido del proyecto “Estudio Hidrogeológico del Acuífero de Morroa” (Rodríguez, 1993), para complementar la información y lograr que la distribución de los pozos sea uniforme.

Debido a que para estos pozos no se obtuvieron pruebas de bombeo para ser analizadas y el inventario cuenta con el valor de las transmisividades, estas no se tomaron en cuenta en el análisis realizado anteriormente ya que no se conocen los datos de pruebas ni los y métodos utilizados para calcular el valor del parámetro hidráulico.

**Tabla 11 Inventario campo de pozos de Corozal (Rodríguez G., 1993).**

IDENTIFICACION	MUNICIPIO	COORDENADAS		TRANSMISIVIDAD
		NORTE	ESTE	
POZO 1	Corozal	1522857.14	866428.57	68.22
POZO 3	Corozal	1523171.42	866571.42	83.38
POZO 5	Corozal	1523857.14	866571.42	94.67
POZO 6	Corozal	1524057.14	866485.71	65.36
POZO 7	Corozal	1523171.42	865285.71	47.34
POZO 11	Corozal	1523942.85	865228.57	33.46
POZO 12	Corozal	1523085.71	865942.85	38.06
POZO 13	Corozal	1522714.28	865485.71	97.83
POZO 14	Corozal	1523300	867500	95.42
POZO 15	Corozal	1523142.85	865085.71	78.35
POZO 17	Corozal	1522571.42	867428.57	147.04
POZO 20	Corozal	1522100	867600	58.02
POZO 21	Corozal	1521571.42	867628.57	127.36
POZO 25	Corozal	1524100	866800	201.02
POZO 26	Corozal	1523340	864880	123.67

La información existente es complementada con los datos de la Tabla 11 y de esta forma se realiza la caracterización espacial, empleando los métodos de interpolación espacial (Software MATLAB), la Figura 35 muestra el resultado de transmisividades empleando el método GRIDDATA y las Figuras 36, 37 y 38 muestran los resultados de transmisividades empleando el método GRIDFIT para cada uno de sus paradigmas de regularización.

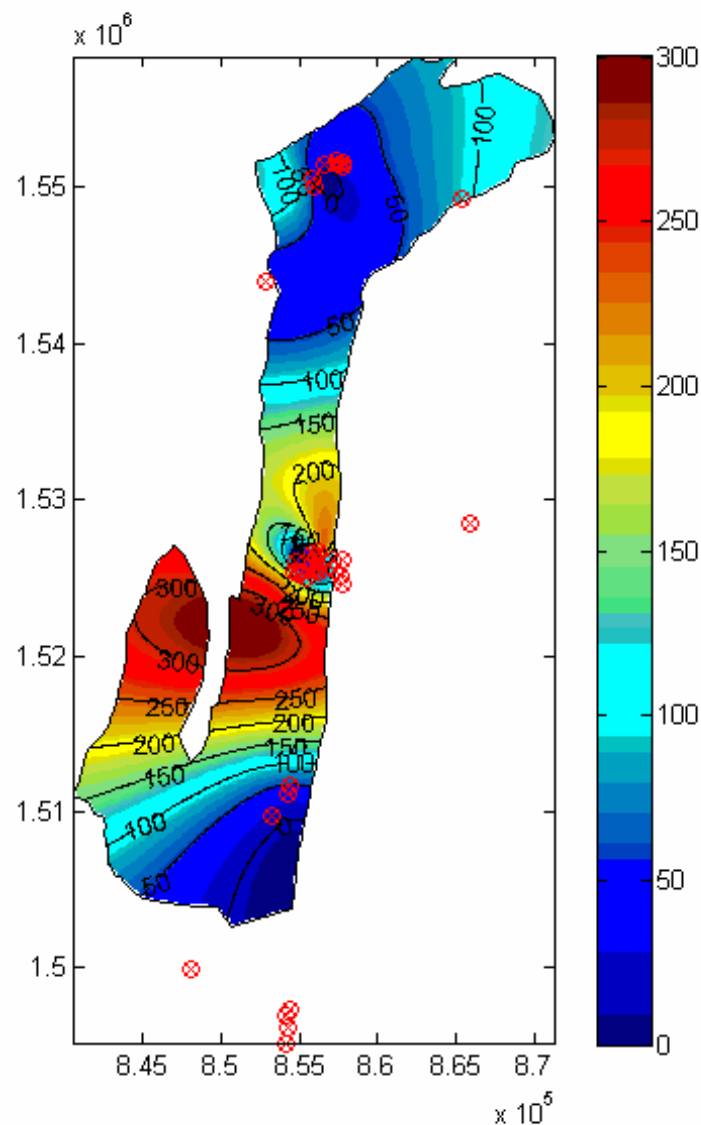


Figura 35 Resultado de transmisividades empleando el método GRIDDATA.

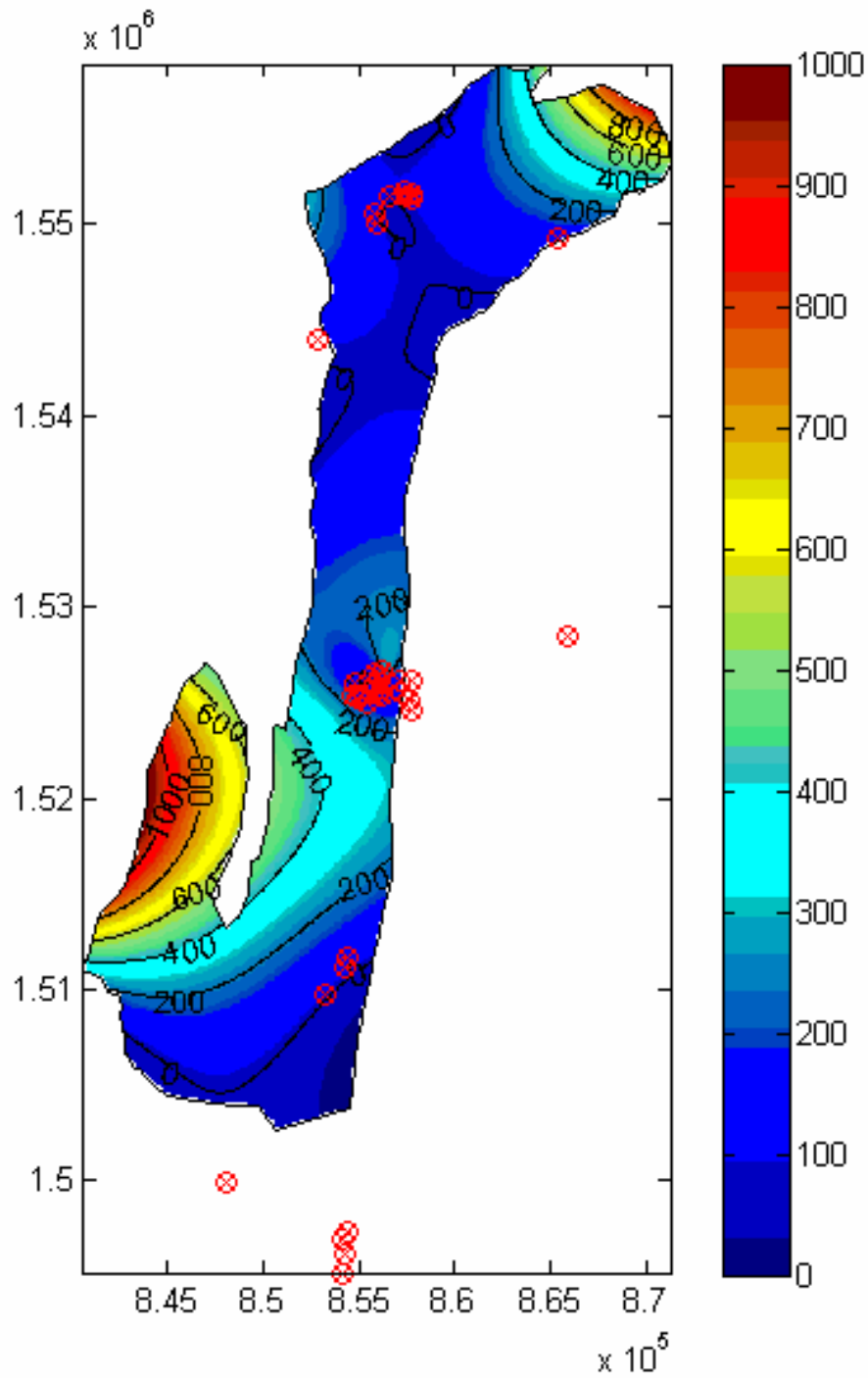


Figura 36 Resultado de transmisividades empleando el método GRIDFIT-GRADIENT.

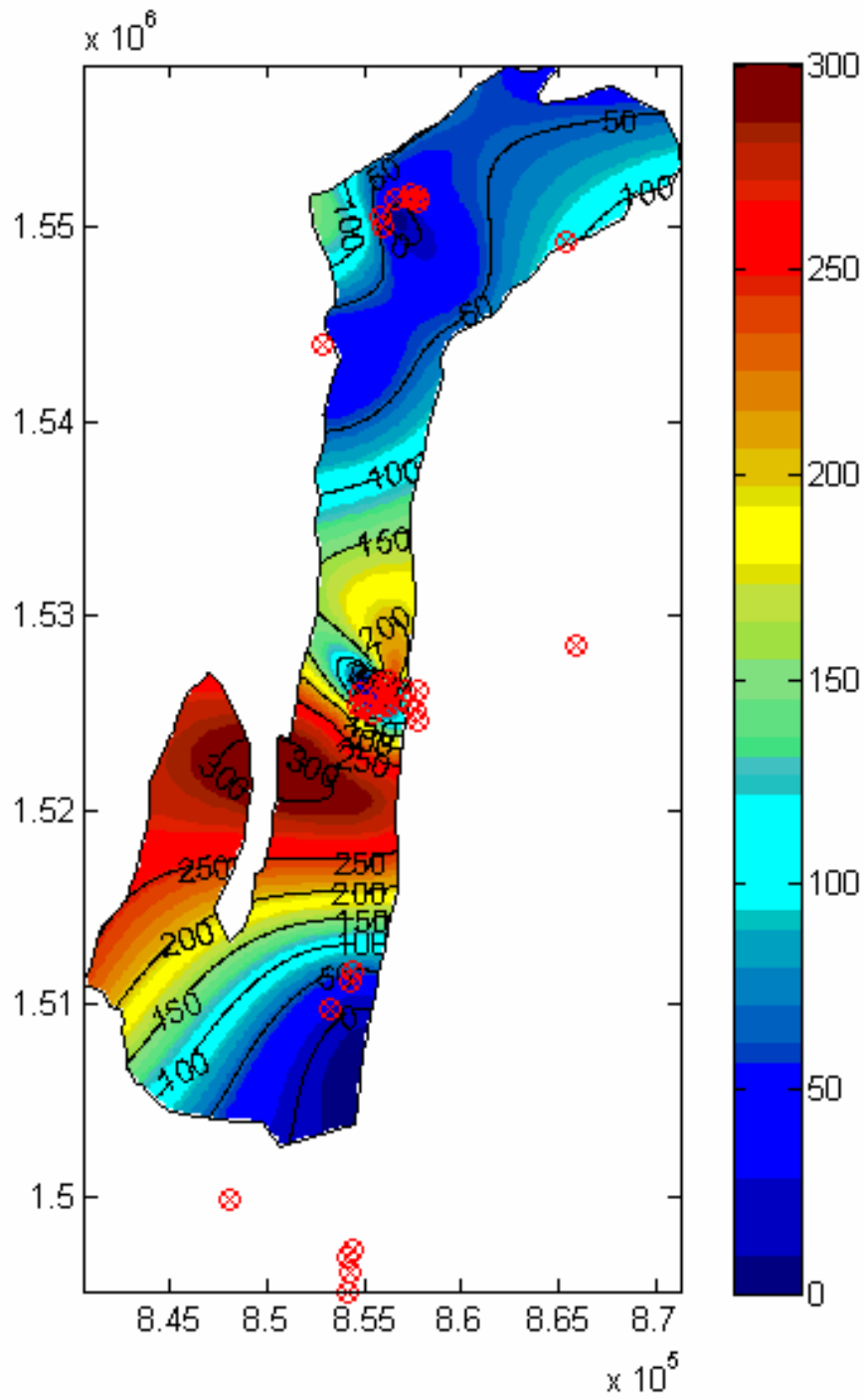


Figura 37 Resultado de transmisividades empleando el método GRIDFIT-DIFFUSION.

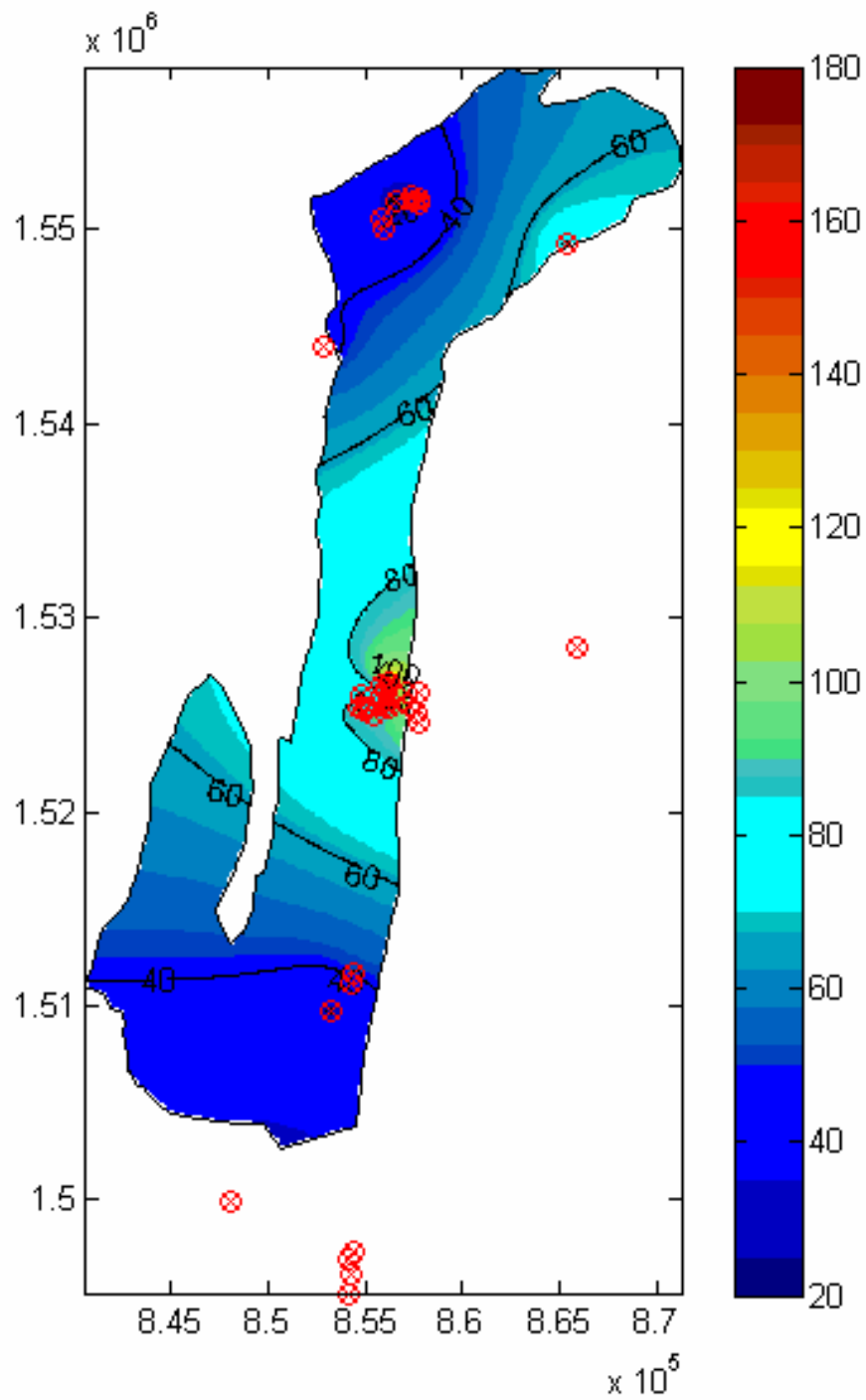


Figura 38 Resultado de transmisividades empleando el método GRIDFIT-SPRINGS.

En las Figuras 39 y 40 se presenta el histograma de frecuencia de datos, indicando su frecuencia relativa. Con el fin de normalizar las distribuciones y de ampliar los datos a un rango de 0-1, se aplica una transformación en la variable Z, debido a que los valores son extremadamente grandes.

Los datos se acomodan entorno a valores muy bajos, con una desviación bastante alta debido a la variabilidad de la Transmisividad, esto quiere decir que el campo no es muy uniforme, como se puede observar en la grafica del campo mostrado en la Figura 41.

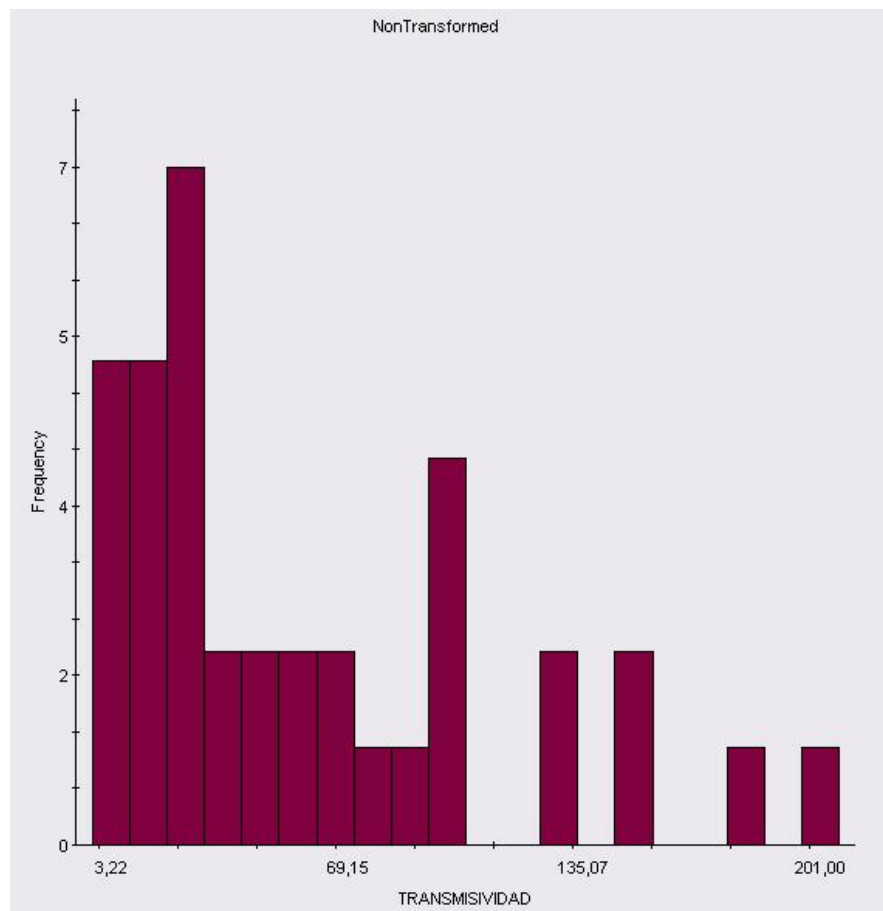


Figura 39 Histograma de los datos no transformados, indicando su frecuencia relativa (Software GSWIN9).

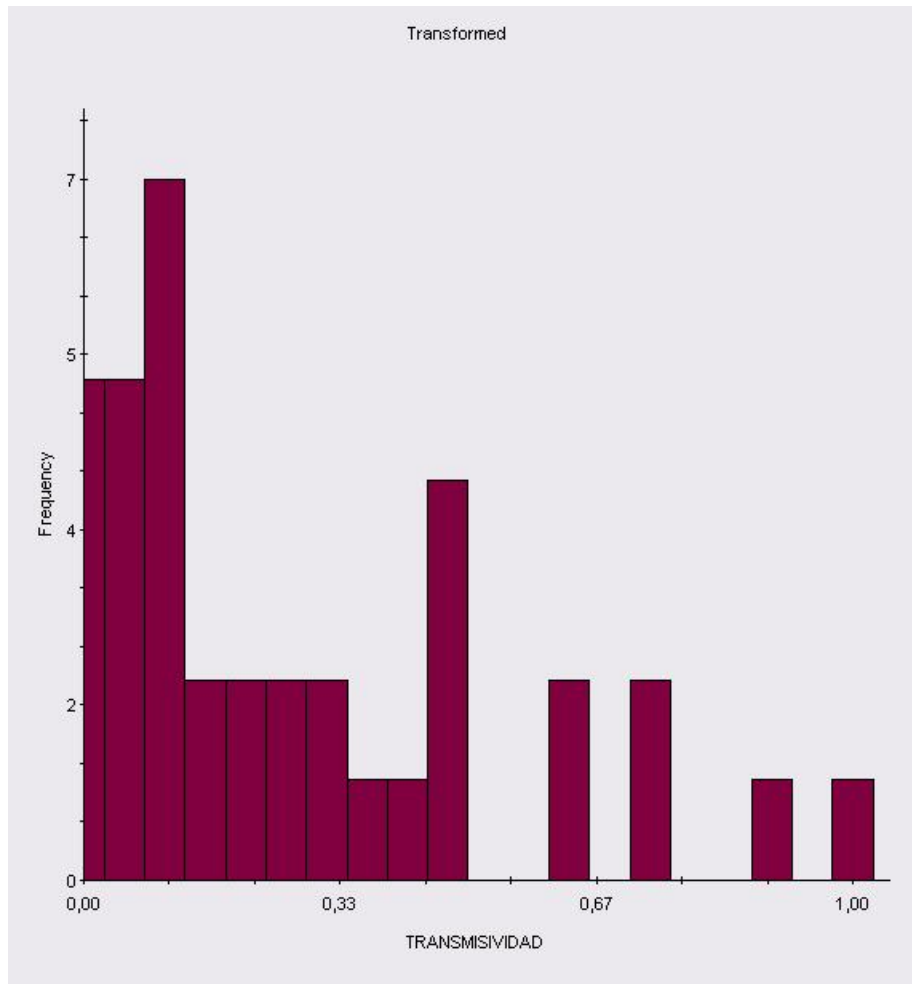


Figura 40 Histograma de los datos transformados, indicando su frecuencia relativa (Software GSWIN9).

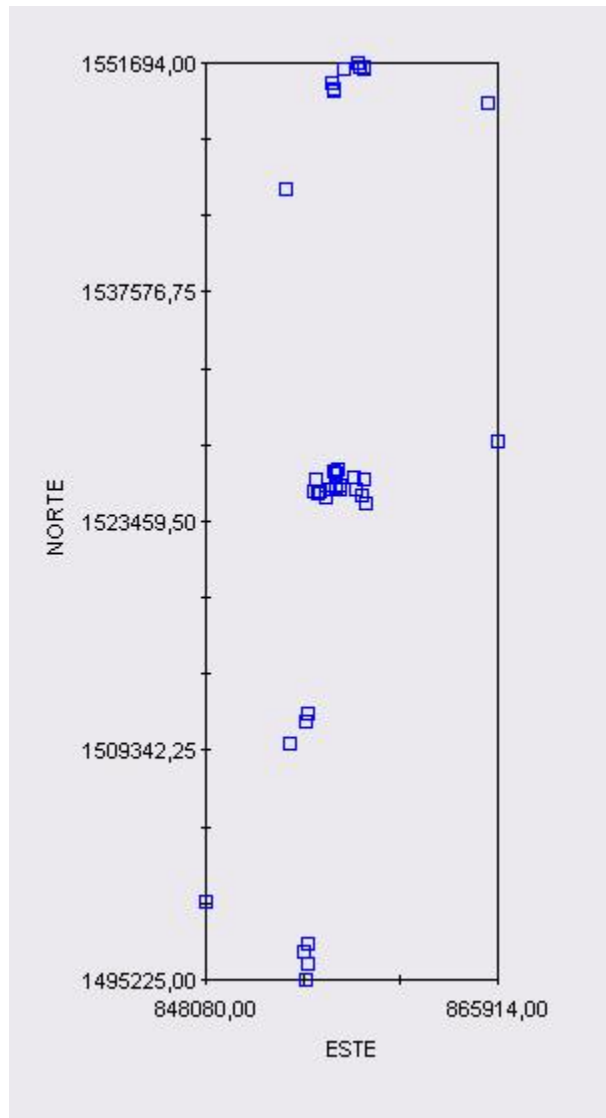


Figura 41 Disposición de los datos en el campo (Software GSWIN9).

Se calculan igualmente los semivariogramas para cuatro direcciones diferentes. Una primera con un azimut de  $0^\circ$ , otra con azimut de  $45^\circ$ , otra con azimut de  $90^\circ$  y otra con azimut de  $135^\circ$ , los cuales son mostrados a continuación en las Figuras 42, 43, 44 y 45

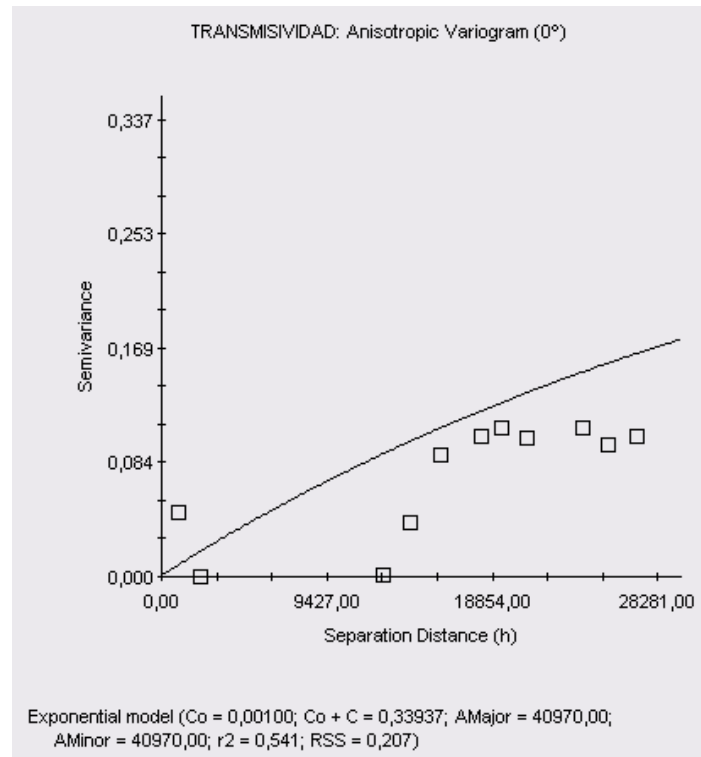


Figura 42 Semivariograma muestral y teórico ajustado a 0° (Software GSWIN9).

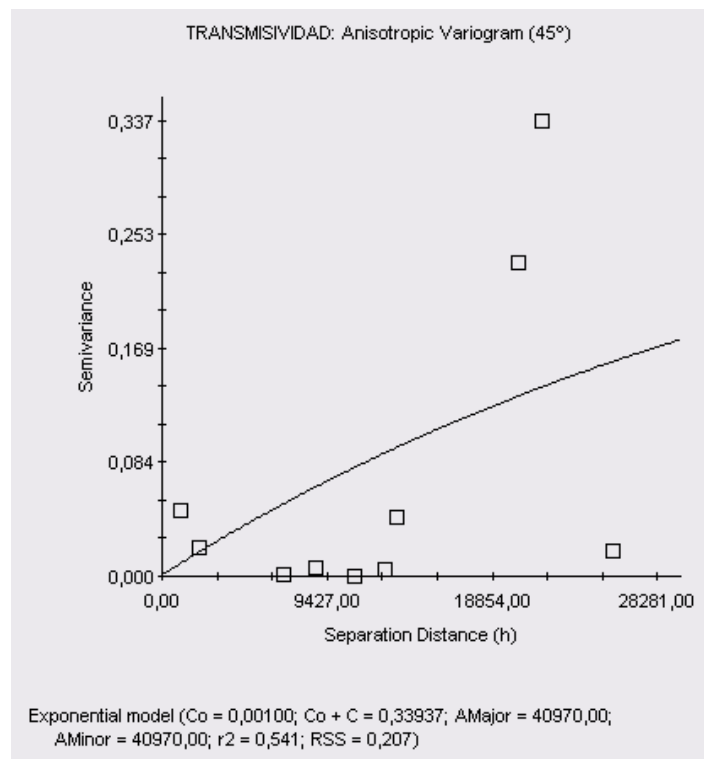


Figura 43 Semivariograma muestral y teórico ajustado a 45° (Software GSWIN9).

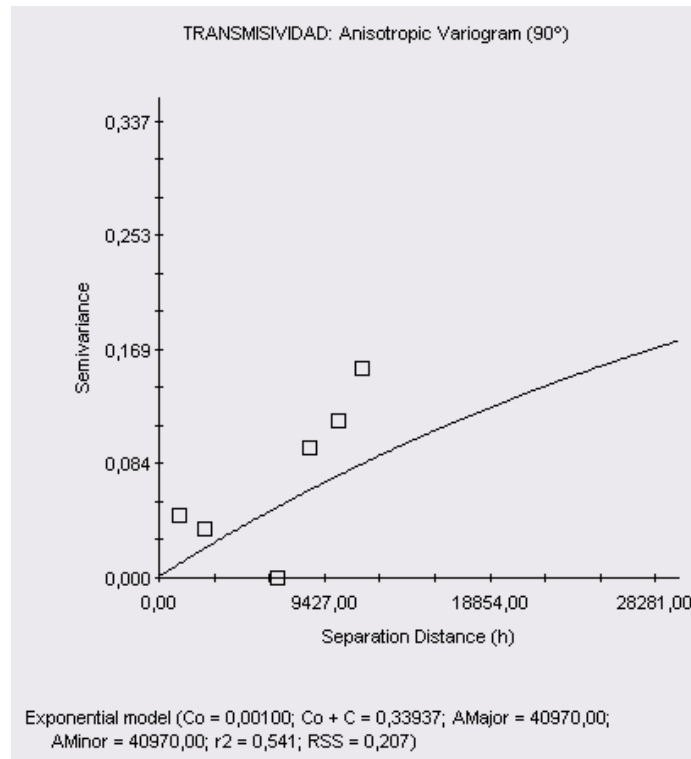


Figura 44 Semivariograma muestral y teórico ajustado a 90° (Software GSWIN9).

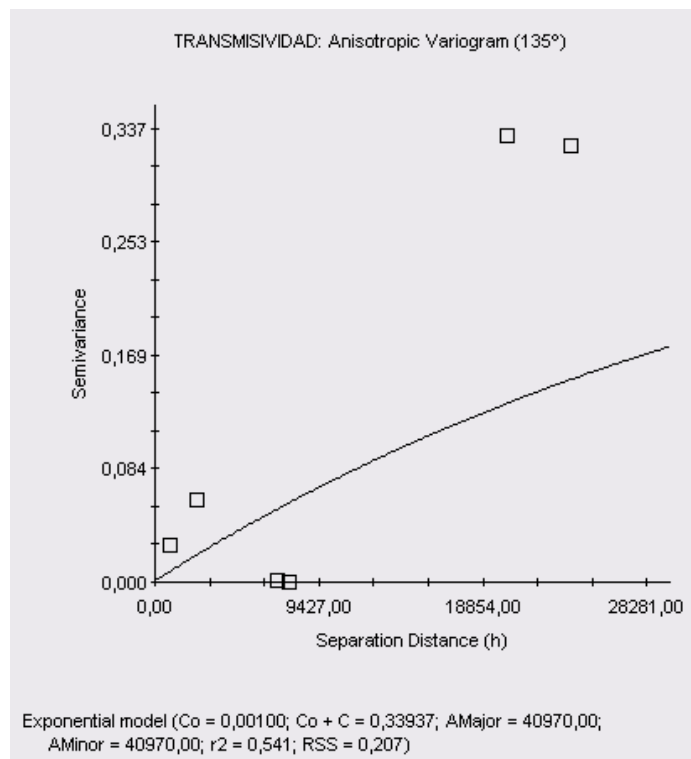


Figura 45 Semivariograma muestral y teórico ajustado a 135° (Software GSWIN9).

Obteniendo como resultado semivariogramas con una aproximación al modelo exponencial, con esta información se puede llevar a cabo la “interpolación” en los puntos no muestreados, resultando la distribución de la variabilidad de la transmisividad en la Figura 46 en 3D y en la Figura 47 en 2D.

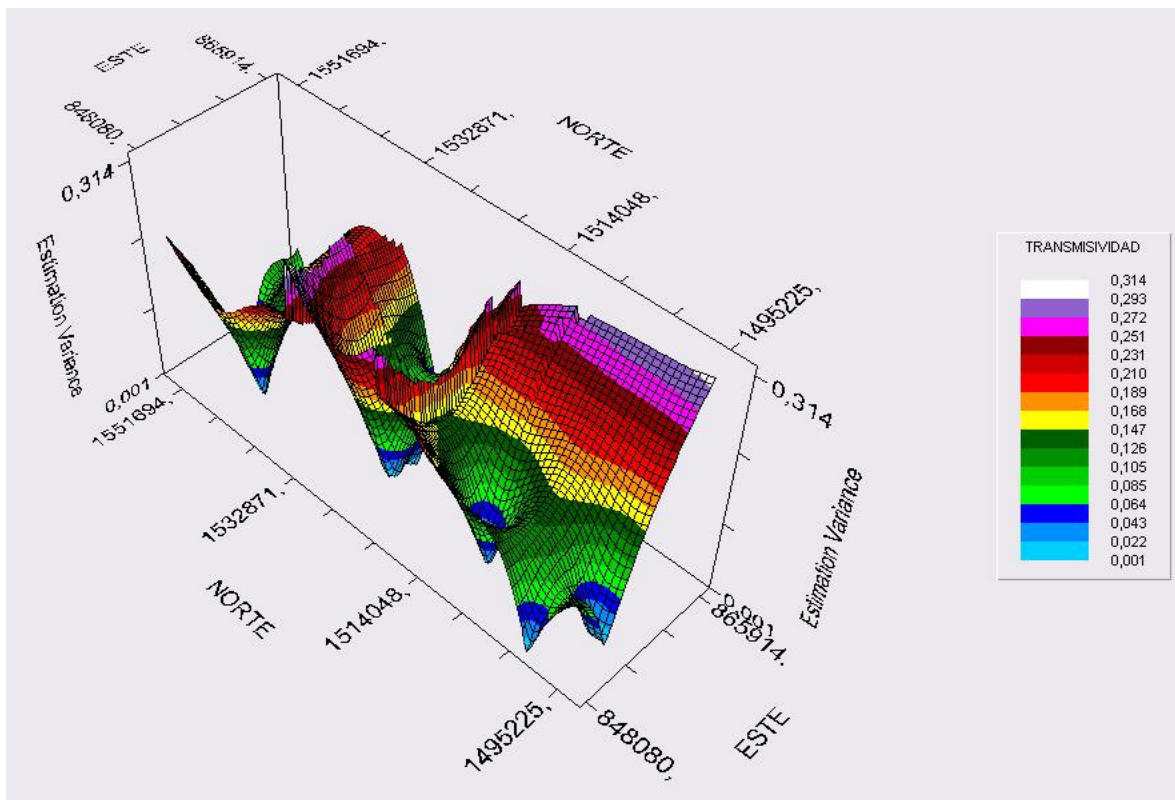


Figura 46 Campo de la varianza de estimación del Kriging en 3D (Software GSWIN9).

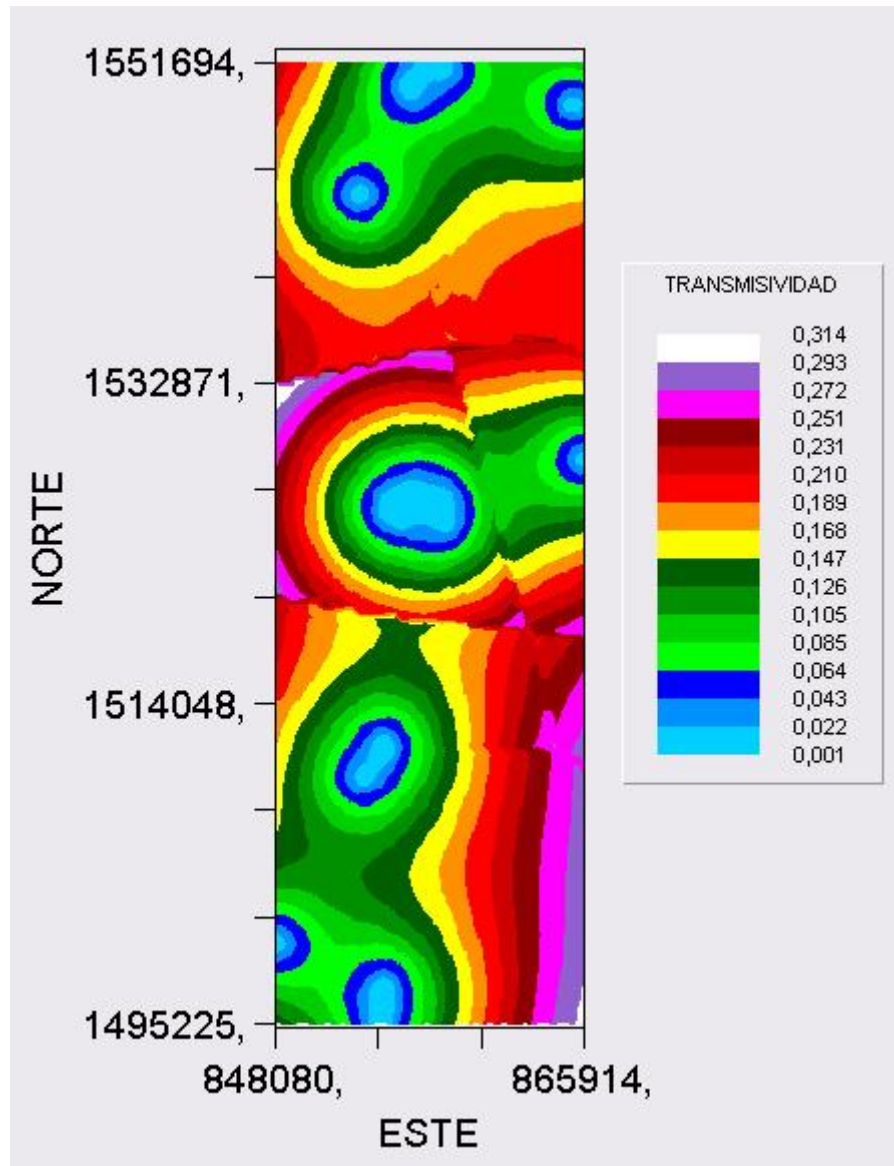


Figura 47 Campo de la varianza de estimación del Kriging en 2D (Software GSWIN9).

Con el semivariograma teórico definido anteriormente (modelo exponencial), se realiza la estimación condicionada de las transmisividades utilizando el software SURFER, presentando en la Figura 44 el mapa de estimación de las transmisividades.

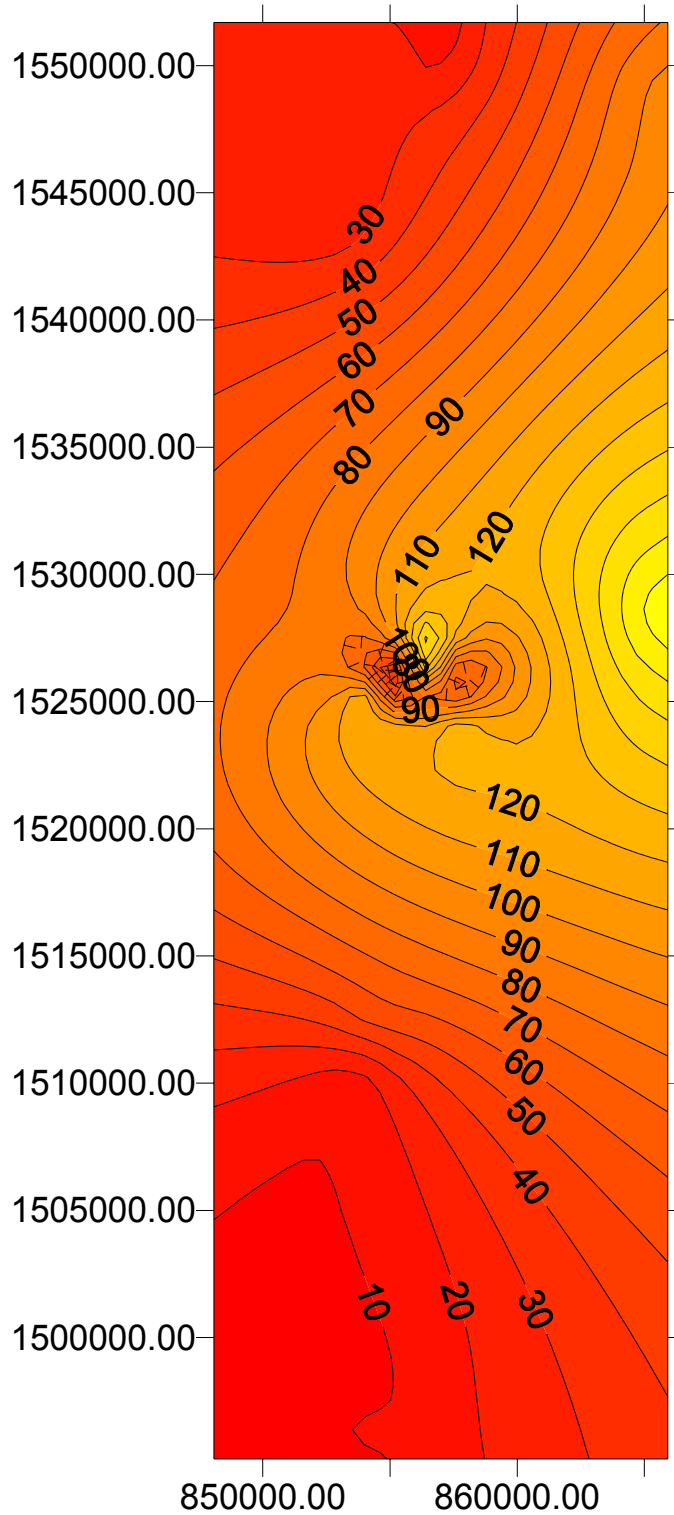


Figura 48 Mapa de estimación de las transmisividades con Kriging Ordinario (Software SURFER).

## 6. DISCUSION (ANALISIS, CONCLUSIONES, SUGERENCIAS)

La realización adecuada de una prueba de bombeo, así como las condiciones óptimas del pozo, repercuten directamente en el análisis del mismo, debido a que se puede obtener una información de mejor calidad, que permita un menor grado de incertidumbre y una mayor aproximación a las condiciones de los métodos de análisis empleados.

Al presentarse una inadecuada administración de la información de las pruebas de bombeo por parte de las entidades encargadas, se descartaron pruebas que ya habían sido analizadas, éste es un factor que incide en el análisis posterior de los métodos de interpolación y geoestadística, debido a que se cuenta con un número menor de datos, de esta forma afecta la suavidad de los mapas generados de transmisividades y de la variación de este parámetro.

El análisis previo de las pruebas de bombeo, mediante la prueba diagnóstica sienta precedente ante los anteriores estudios relacionados a este trabajo, debido a que al consultar los antecedentes del tema tratado, es un factor común el pasar este análisis por alto.

En las gráficas de resultados del análisis de las pruebas de bombeo utilizando EPHEBO, se puede apreciar que no todas las medidas se ajustan a la curva patrón, por lo tanto, para lograr mayor precisión del ajuste realizado y del valor de los parámetros obtenidos, se recomienda para próximos estudios, utilizar métodos numéricos para calcular la desviación estándar de los valores y así el error de desviación.

El estudio de la cartografía es de gran utilidad cuando se quiere obtener un dimensionamiento aproximado de parámetros, en este caso la transmisividad, a partir de medidas realizadas en estudio de campo, es decir partiendo de la distribución de valores puntuales en una superficie conocida, es posible obtener la mayor cantidad de información a lo largo de esta.

Se puede considerar el uso de los métodos de interpolación espacial como una herramienta muy completa en el análisis de los datos de campo adquiridos, ya que estos no cuentan con un espaciamiento constante entre ellos, sino que se encuentran de manera desigual y aleatoria, este es capaz de crear una red o bien considerado una interpolación espacial registrando una serie de rangos partiendo de los datos inicialmente suministrados.

La distribución realizada por el método de interpolación espacial GRIDFIT muestra la tendencia del método a suavizar las medidas, pasando aproximadamente por la media de los datos. Esta función construye una red más completa sin problemas de extrapolación de esquinas, generando mayor dominio sobre el suavizado de los datos a partir de la variedad de métodos que posee. Es decir no existe límite en el tamaño de la superficie siempre y cuando exista una densidad de datos proporcionados.

Los mapas obtenidos de los paradigmas de regularización muestran una heterogeneidad en sus resultados, generando una interpolación brusca por parte de GRIDFIT-GRADIENT donde el valor de la transmisividad no corresponde a la de los pozos analizados, GRIDFIT-SPRINGS es el la mejor aproximación al fenómeno natural y al mapa generado por el método Geoestadístico, por último el GRIDFIT-DIFFUSION muestra similitud con el método GRIDDATA, aunque la interpolación es suave se aleja aun de los parámetros.

El campo de la varianza de estimación del Kriging de la información primaria, se encuentra en un intervalo de 0.002 a 0.440, respecto al obtenido para la

información complementaria este intervalo es de 0.001 a 0.314, representando claramente la suavidad de la variación del parámetro en los datos primarios frente a la abrupta variación de los datos complementarios, producto del incremento de valores y la heterogeneidad de los mismos en la región central del campo.

La varianza del parámetro es un factor que incide en los resultados de los mapas de estimación de las transmisividades, de esta forma se puede observar para los valores de la información complementaria, la variabilidad de la transmisividad en una densidad de área muy pequeña.

## 7. BIBLIOGRAFIA

**Batu, V.** (1998). Aquifer Hydraulics. John Wiley & Sons, Inc. USA.

**Buitrago; Donado L.** (2000). Evaluación de las condiciones de explotación de agua subterránea en la zona de recarga del Acuífero Morroa, Departamentos de Sucre y Córdoba, Colombia. Proyecto como requisito para optar al título de ingeniero civil, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

**Cabrejo A.; Torres C.** (1999). Flujo en zona no saturada en hidrogeología: Aplicaciones y casos de estudio Latinoamericanos. Editado por Pulido G. Libro on line <http://www.docentes.unal.edu.co/lldonadog/>

**Carrera.** (2003). Diagnostico de ensayos hidráulicos. UPC. (Versión Electrónica).

**Donado L.D.** (1999). Hidráulica de pozos en hidrogeología: Aplicaciones y casos de estudio Latinoamericanos. Editado por Pulido G. Libro on line <http://www.docentes.unal.edu.co/lldonadog/>

**Estadísticas INAT.** <http://orbita.starmedia.com/~corozal2/datos.html>

**Esther B.; Solano D.** (2001). Biodiversity Reporting Award “Lo Acaban”. <http://www.biodiversityreporting.org/article.sub?docId=295&c=Col>

**INGEOMINAS.** (2004). Programa de Exploración de Aguas Subterráneas. <http://www.ingominas.gov.co>

- Kruseman G.P; Ridder N.A.** (1975). Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo. International Institute for Land Reclamation and improvement. Wageningen, Holanda.
- Ortiz C.** (2005). Apuntes de proyecto 3D de evaluación de yacimientos. Universidad de Chile. (Versión Electrónica).
- Pacheco A.; Villegas P.** (2003). Caracterización hidráulica del Acuífero Morroa utilizando pruebas de bombeo. Proyecto como requisito para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Sucre, Sincelejo, Colombia.
- Renard P.** (2005). Quantitative analysis of groundwater field experiments. Univerity of Neuchatel.
- Rodríguez, G.** (1993). Estudio hidrogeológico del acuífero de Morroa. INGEOMINAS. Bogotá, Colombia.
- Robles B.; Suárez S.; Díaz D.** (1980). Hidrogeología del noreste de la Serranía de San Jacinto, Departamentos de Córdoba y Sucre (Colombia). Ponencia del INSFOPAL (Instituto Nacional de Fomento Municipal) al XV congreso de Ingeniería.
- Samper C.; Carrera R.** (1996). Geoestadística, Aplicaciones a la hidrogeología subterránea (2<sup>da</sup> ed.). Barcelona: CIMNE ediciones. ISBN 84-404-6045-7.
- Sandwell; David T.** (1987) "Biharmonic Spline Interpolation of GEOS-3 and SEASAT Altimeter Data", *Geophysical Research Letters*, 14, 2, 139–142.
- Trujillo D.** (1999). Pruebas hidráulicas en hidrogeología: Aplicaciones y casos de studio Latinoamericanos. Editado por Pulido G. Libro on line <http://www.docentes.unal.edu.co/lldonadog/>

## **ANEXOS**

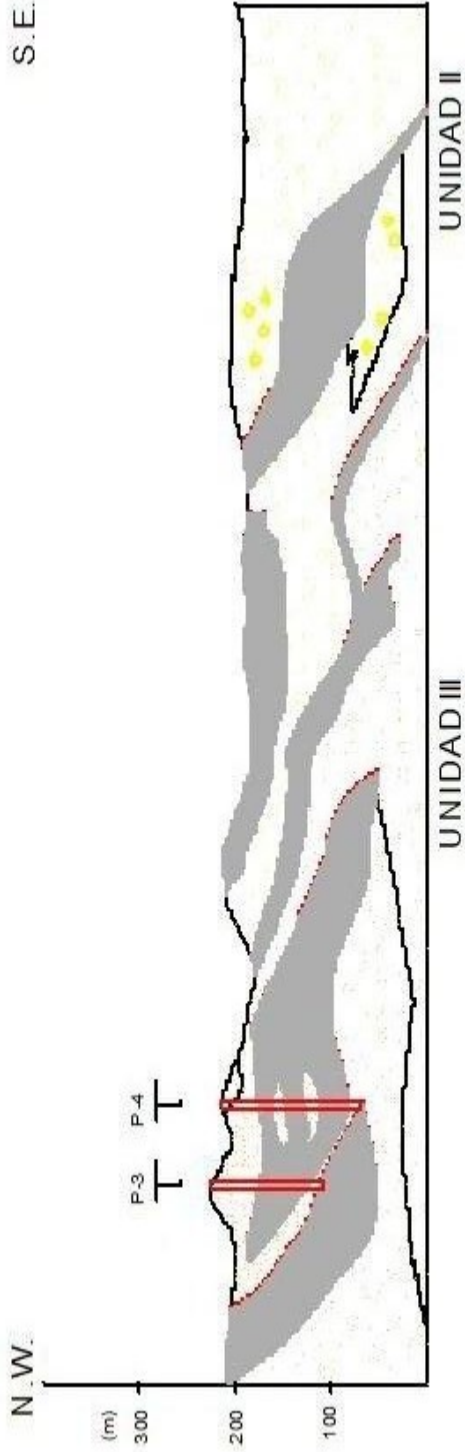
ANEXO A – Cortes hidrogeológicos tipo

ANEXO B – Plano de la distribución puntual de los pozos de bombeo

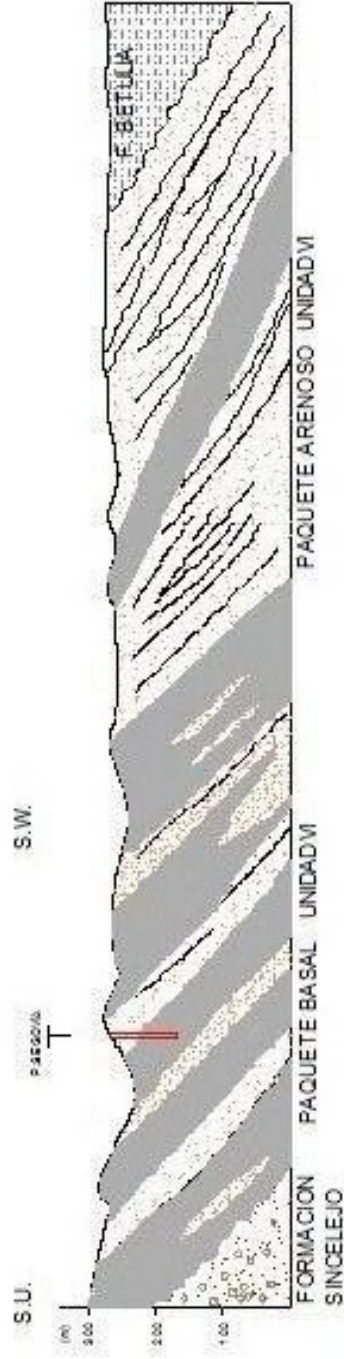
# **ANEXO A**

## **CORTES HIDROGEOLOGICOS TIPO**

---



Corte hidrogeológico de la región noroccidental del Acuífero Morroa (Buitrago y Donado, 2000)



Cortes hidrogeológicos de la región sur del Acuífero Morroa (Buitrago y Donado, 2000)