

**GENERACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (MDE)  
CORRESPONDIENTE A LA MESA DE BARICHARA LIMITADA POR LOS RIOS  
FONCE, SUAREZ Y CHICAMOCHA**

**JOSE LUIS VILLAMIZAR SOCHA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2006**

**GENERACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (MDE)  
CORRESPONDIENTE A LA MESA DE BARICHARA LIMITADA POR LOS RIOS  
FONCE, SUAREZ Y CHICAMOCHA**

**JOSE LUIS VILLAMIZAR SOCHA**

**Proyecto de Grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero Civil**

**Director  
Jorge Alberto Guzmán Jaimes.  
Ingeniero Civil Msc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2006**

*A Dios por permitirme vivir esta etapa de mi vida.*

*A Maria Auxiliadora quien me guía día a día y a quien confió todo lo que hago.*

*A mi Madre Oliva por que ha estado ahí en las noches de traspasos y días de sufrimiento que viví para hacer posible este sueño.*

*A mi Padre Luis Gerardo quien a lo largo de estos años a depositado su confianza en mi y me ha dado la oportunidad de lograr esta meta.*

*A mis Hermanos Jhon, Martha y Gerardo porque con ellos he compartido muchos momentos y experiencias buenas y malas que me han ayudado en mi formación como persona.*

*A mi Novia Sharis por su gran amor, porque le dio estabilidad a mi vida en el momento que mas lo necesitaba y por su constante apoyo y consejo.*

*Jose Luis.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Director del Proyecto, el I.C Msc Jorge Alberto Guzmán, por haber depositado su confianza en mí, por su paciencia, apoyo y aportes durante el transcurso del presente proyecto.

A la I.C. PhD Sully Gómez Isidro, quien me dio la oportunidad de viajar a la zona del proyecto para interactuar con la misma, y por sus valiosos aportes en los momentos que fueron solicitados.

Al Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático (GPH), por su apoyo técnico.

A la Familia Villamizar Duran por haberme ayudado en la consecución de este sueño.

A mis demás familiares quienes siempre me han estado apoyando en cada uno de mis sueños.

A los verdaderos amigos..., a mis compañeros, profesores, por que de alguna u otra manera han hecho su aporte en mi formación como ingeniero y persona.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1 MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES (DEM).....</b>	<b>3</b>
1.1 QUE ES UN DEM?.....	3
1.2 CREACIÓN DE UN DEM. ....	3
1.2.2 ESTRUCTURAS DE DATOS EN UN DEM .....	5
1.3 DETERMINACION DEL INTERPOLADOR A EMPLEAR.....	8
1.4 VALIDACION DEL MODELO GENERADO. ....	9
<b>2 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO.....</b>	<b>11</b>
2.1 LOCALIZACIÓN. ....	11
2.2 DESCRIPCION DE SUS PRINCIPALES CUENCAS Y MUNICIPIOS.....	12
2.2.1 CUENCA DEL RÍO SUÁREZ .....	12
2.2.2 CUENCA DEL RÍO FONCE .....	13
2.2.3 CUENCA DEL RÍO CHICAMOCHA .....	13
2.2.4 MUNICIPIO DE SAN GIL .....	13
2.3 ARCHIVOS DIGITALES DE LA ZONA DE ESTUDIO. ....	14
<b>3 PREPARACIÓN, LIMPIEZA Y CORRECIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE MODELOS A TRAVES DE LOS INTERPOLADORES SURFER.....</b>	<b>16</b>
3.1 UNIÓN DE PLANCHAS CARTOGRÁFICAS Y COMPROBACIÓN DEL VALOR DE CADA UNA DE LAS CURVAS DE NIVEL.....	16
3.2 CORRECCIÓN, UNIÓN DE CURVAS EN LOS LÍMITES DE LAS PLANCHAS CARTOGRÁFICAS Y ADICCIÓN DE INFORMACIÓN FALTANTE.....	17
3.3 TRANSFORMACIÓN DE LÍNEAS DISCONTINUAS EN POLILÍNEAS.....	18
<b>4 DESCRIPCIÓN, ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE LOS INTERPOLADORES SURFER EN LA GENERACIÓN DEL DEM PARA LA MESA DE BARICHARA.....</b>	<b>20</b>
4.1 VALIDACIÓN CRUZADA. ....	22

4.2 DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS INTERPOLADORES SURFER PARA LA GENERACIÓN DEL DEM.....	23
4.2.1 DISTANCIA INVERSA A UNA POTENCIA : .....	23
4.2.2 VECINO MÁS CERCANO .....	27
4.2.3 VECINO NATURAL .....	30
4.2.4 MINIMA CURVATURA .....	31
4.2.5 TRIANGULACION CON INTERPOLACION LINEAL .....	34
4.2.6 FUNCIONES RADIAL BASIC .....	35
4.2.7 KRIGING .....	39
4.3 COMPARACIÓN DEL MINIMO RMSE GENERADO POR CADA UNO DE LOS METODOS INTERPOLADORES PARA LA CREACIÓN DEL DEM. ....	43
4.4 TIEMPOS MAXIMOS DE GENERACIÓN DE MODELOS E INFORMES DE VALIDACION. ....	45
<b>5 MODIFICACIÓN DE PARAMETROS DEL INTERPOLADOR SELECCIONADO PARA LA CONSECUICIÓN DEL MODELO ÓPTIMO DE LA MESA DE BARICHARA. ....</b>	<b>48</b>
5.1 VALIDACIÓN DEL DEM PARA LA MESA DE BARICHARA.....	49
5.2 CALCULO DEL $Z_{RESIDUAL}$ .....	50
5.3 COMPARACION DEL $Z_{Residual}$ PARA EL METODO DE INTERPOLACION SELECCIONADO EN LA GENERACIÓN DEL DEM VS OTRO METODO INTERPOLADOR.....	51
<b>CONCLUSIONES. ....</b>	<b>56</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>57</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>58</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>60</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Representación de la realidad a través de las estructuras de datos Raster y Vectorial. ....	7
Figura 2 Ubicación geografica de la Mesa de Barichara.....	11
Figura 3 Límites y principales Municipios que conforman la Mesa de Barichara.....	12
Figura 4 Detalle de la no unión de curvas de nivel en los bordes o limites de las Planchas Cartográficas Digitalizadas IGAC. ....	17
Figura 5 a) Errores presentados al unir dos planchas IGAC; b) Aplicación de radios de tolerancia para el empalme de curvas de nivel; c) Curvas de nivel totalmente corregidas) .....	18
Figura 6 Terna de puntos generados por Spell Map para su posterior empleo en los interpoladores Surfer.....	19
Figura 7 Desplazamiento de los ejes principales con respecto al radio 1 causado por la variación del ángulo. ....	25
Figura 8 Aplicación del Método Vecino más Cercano en la búsqueda de colores en una Imagen..	27
Figura 9 Aparición de espacios en blanco sobre el Modelo de la Región 1 por el método Vecino más cercano para un Radio de búsqueda de 500. ....	28
Figura 10 Aumento de espacios en blanco sobre el Modelo de la Región 1 por el método Vecino mas cercano generados por un radio de búsqueda de 362. ....	29
Figura 11 Modelo generado por el Método Mínima Curvatura para un radio de anisotropía de 1 con un residuo máximo de 1.7 sobre la Región 1, donde se aprecia la aparición de ruido y huecos. ....	33
Figura 12 Modelo generado por el Método Mínima Curvatura para un radio de anisotropía de 1 con un residuo máximo de 1.2 sobre la Región 11 donde se aprecia la generación de huecos. ....	33
Figura 13 Componentes generales de un Variograma.....	40
Figura 14 Gráfico de un Variograma ascendente.....	40
Figura 15 Comparación de los máximos tiempos de validación para cada uno de los Métodos Interpoladores. ....	46
Figura 16 Comparación de los máximos tiempos de generación de modelos para cada uno de los Métodos Interpoladores.....	47
Figura 17 Cálculo de la Anisotropía óptima para la generación del modelo correspondiente a la Mesa de Barichara para la FBR Thin Spline Cúbica. ....	48
Figura 18 Cálculo de la Anisotropía óptima para la generación del modelo correspondiente a la Mesa de Barichara para la FBR Multicuadratica. ....	51
Figura 19 Vista en Planta del DEM de la Mesa de Barichara. ....	54
Figura 20 DEM en 3D para la Mesa de Barichara utilizando la FBR Thin Spline Cúbica.....	55

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Principales Ventajas y Desventajas del Modelo Vectorial.....	6
Tabla 2 Principales Ventajas y Desventajas del Modelo Vectorial.....	8
Tabla 3 Porcentajes de Relieve presentes en el Municipio de San Gil.....	14
Tabla 4 Coordenadas IGAC escala 1:25000 de la Zona de estudio de la Mesa de Barichara.....	15
Tabla 5 Valor de RMSE en cada una de las regiones de la zona de estudio a diferentes Potencias mediante Distancia Inversa para una anisotropía de 1 y 4 Sectores de Búsqueda.....	25
Tabla 6 Valor de RMSE en cada una de las regiones de la zona de estudio a diferentes Potencias mediante Distancia Inversa para una anisotropía de 1 y 8 Sectores de Búsqueda.....	26
Tabla 7 Variación del RMSE con respecto al Sector de Búsqueda Optimo (8).....	26
Tabla 8 RMSE generado en cada una de las regiones mediante el Interpolador Vecino más Cercano para diferentes Radios de Elipse.....	28
Tabla 9 RMSE Generado en cada una de las regiones mediante el Interpolador Vecino Natural.....	30
Tabla 10 Mínimo RMSE obtenido por el algoritmo Mínima Curvatura para cada una de las Regiones que conforman la zona de estudio.....	32
Tabla 11 RMSE obtenido por el algoritmo Triangulación con Interpolación Lineal para cada una de las Regiones que conforman la zona de estudio.....	34
Tabla 12 Comportamiento del RMSE mediante la modificación del parámetro R2 empleando la Función Radial Basic Inversa Multicuadratica.....	37
Tabla 13 Comportamiento del RMSE mediante la modificación del parámetro R2 empleando la Función Radial Basic Multicuadratica.....	37
Tabla 14 Comportamiento del RMSE mediante la modificación del parámetro R2 empleando la Función Radial Basic Multilogaritmica.....	37
Tabla 15 Comportamiento del RMSE mediante la modificación del parámetro R2 empleando la Función Radial Basic Spline Cúbica Natural.....	38
Tabla 16 Comportamiento del RMSE mediante la modificación del parámetro R2 empleando la Función Radial Basic Thin plate Spline.....	38
Tabla 17 Pendiente Promedio y generada para cada Región a través del Variograma Lineal.....	42
Tabla 18 RMSE Generado por el Método Kriging.....	43
Tabla 19 Mínimo RMSE presentado en cada uno de los métodos surfer empleados para la generación del DEM de la Mesa de Barichara.....	43

Tabla 20	Mínimo RMSE presentado en cada uno de los métodos surfer de la Función Radial Basic empleados para la generación del DEM de la Mesa de Barichara. ....	44
Tabla 21	Variación del RMSE para cada una de las regiones y métodos Surfer con respecto al RMSE mínimo. ....	44
Tabla 22	Variación del RMSE para cada una de las regiones para cada una de las funciones del interpolador Radial Basic con respecto al RMSE mínimo. ....	45
Tabla 23	Tiempos máximos de validación y generación de modelos para cada uno de los Métodos Interpoladores. ....	46
Tabla 24	Parámetros empleados en la Generación del DEM de la Mesa de Barichara a través de la FBR Thin Plate Spline ....	49
Tabla 25	Valor del ZResidual para cada uno de los Puntos tomados con el GPS Trimble. ....	50
Tabla 26	Validacion del Modelo Generado a través de Surfer 8.....	51
Tabla 27	Parámetros empleados en la Generación del DEM de la Mesa de Barichara a través de la FBR Multicuadratica.....	52
Tabla 28	Valor del ZResidual para cada uno de los Puntos tomados con el GPS Trimble.para la FBR Multicuadratica.....	52
Tabla 29	Validacion del Modelo de comparación generado a través de Surfer 8.....	53

## LISTA DE ANEXOS

### ANEXOS A

	<b>Pág.</b>
Figura A 1 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador Distancia Inversa a una Potencia. ....	60
Figura A 2 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador Vecino más cercano.....	61
Figura A 3 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador Vecino Natural.....	62
Figura A 4 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador Mínima Curvatura.....	63
Figura A 5 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador Triangulación con Interpolación Lineal. ....	64
Figura A 6 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador FBR Inversa Multicuadratica. ....	65
Figura A 7 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador FBR Multilogaritmica. ....	66
Figura A 8 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador FBR Multicuadratica. ....	67
Figura A 9 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador FBR Spline Cúbica Natural. ....	68
Figura A 10 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador FBR Thin Plate Spline.....	69
Figura A 11 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador Kriging Lineal.....	70

### ANEXOS B

Figura B 1 Modelo Generado Mediante el Interpolador Distancia Inversa a una Potencia.....	71
Figura B 2 Modelo Generado Mediante el Interpolador Vecino más Cercano. ....	72
Figura B 3 Modelo Generado Mediante el Interpolador Vecino Natural.....	73

Figura B 4 Modelo Generado Mediante el Interpolador Minima Curvatura.....	74
Figura B 5 Modelo Generado Mediante el Interpolador Triangulación con Interpolación Lineal.....	75
Figura B 6 Modelo Generado Mediante el Interpolador FBR Inversa Multicuadratica.....	76
Figura B 7 Modelo Generado Mediante el Interpolador FBR Multilogaritmica.....	77
Figura B 8 Modelo Generado Mediante el Interpolador FBR Multicuadratica.....	78
Figura B 9 Modelo Generado Mediante el Interpolador FBR Spline Cubica Natural.....	79
Figura B 10 Modelo Generado Mediante el Interpolador FBR Thin Plate Spline.....	80
Figura B 11 Modelo Generado Mediante el Interpolador Kriging.....	81

## **ANEXOS C**

Tabla C 1 Puntos que se tomaron de la Zona con Ayuda de un GPS de precisión marca Trimble.	<b>82</b>
--	-----------

## RESUMEN

### TÍTULO:

GENERACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (MDE) CORRESPONDIENTE A LA MESA DE BARICHARA LIMITADA POR LOS RIOS FONCE, SUAREZ Y CHICAMOCHA \*

**AUTOR:** JOSE LUIS VILLAMIZAR SOCHA\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Modelo, Elevaciones, MDE, Mesa, Barichara, Región, RMSE, Validación.

### DESCRIPCIÓN

El fin de este proyecto es generar el Modelo Digital de Elevaciones (DEM) correspondiente a la Mesa de Barichara (Zona Guanentina), a través del uso de once planchas IGAC escala 1:25000 en formato digital con extensión dwg. Se empleara una estructura de datos Raster generando una malla cuyo tamaño de celdas será de 50m x 50 m.

La primer etapa del proyecto consistió en la Búsqueda, Recolección, Preparación, corrección y limpieza de la información a utilizarse en la generación del Modelo, esto se hizo empleando los programas Autocad Y Autocad Map, el primero facilito el análisis, visualización, comparación y unión de la información disponible; y el segundo permitió realizar las correcciones y la limpieza necesaria a dicha información.

La siguiente etapa consistió en llevar dicha información a una serie de interpoladores pertenecientes a Surfer 8. En total se emplearon once interpoladores de este programa, los cuales fueron empleados uno a uno en cada una de las planchas o regiones. De los cuales se selecciono el que tuvo mejor comportamiento evaluando parámetros correspondientes a: Menor RMSE, Menor tiempo de Informes de Validación Cruzada, Menor tiempo de Generación del modelo y Mejor Representación del Relieve.

Por ultimo se optimizaron los parámetros del método interpolador seleccionado para el caso FBR Thin Plate Spline con el fin de emplearlos en la unión de las 11 Regiones para generar el Modelo Digital de Elevaciones De la Mesa de Barichara.

Una vez obtenido el Modelo, se hizo necesario viajar a la zona donde se tomaron unos puntos de referencia con equipo GPS de alta precisión para dar validez al modelo mediante el calculo de un error residual correspondiente a la diferencia entre el valor de elevación del Punto GPS menos el valor del punto del GPS equivalente en el modelo.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de ingeniería Civil, Director:  
Guzman Jaimes, Jorge Alberto

## SUMMARY

### TITLE:

PRODUCTION OF THE DIGITAL ELEVATION MODEL CORRESPONDING TO "LA MESA DE BARICHARA" LIMIT BY THE FONCE, SUAREZ AND CHICAMOCHA RIVERS\*.

**AUTHOR: JOSE LUIS VILLAMIZAR SOCHA\*\*.**

**KEY WORDS:** Model, Elevations, MDE, Mesa, Barichara, Region, RMSE, Validation.

The purpose of this Project is to generate the Digital Elevations Model (MDE - DEM) corresponding to "La Mesa de Barichara (Guanentina Zone), throughout the use of eleven IGAC Plaques a 1:25000 scale in a digital format with a dwg extension. It will be used a Raster data structure generating a screen, which its cells size will be of 50m x 50 m.

The first stage of the project consists of the searching, recollection, preparation, generation; this was done using the Autocad and Autocad Map programs, the first, made easier the analysis, visualization, comparison and union of the available information; and the second one let it possible to do the corrections and necessary revisions to the provided information.

The next stage consisted of taking such information to a series of interpolators belonging to an 8 Surfer. In total it was used on each of the plaques or regions, from which it was, selected the one that had the best behavior evaluating corresponding parameters to: less RMSE, less time of informs of cross validation, less time of the model generation and better representation of the relief.

At the find it was optimized the parameters of the selected interpolator method for the FBR Thin Plate Spline case in order to use them in the union of the eleven regions to generate the digital model elevations of " La Mesa de Barichara".

Once it was had the model, it was necessary to travel to the zone where it was taken some reference points with the GPS equipment of high precision to give validity to the model through the calculus of the residual mistake of elevations (Z) corresponding to the difference between the value of elevation of the GPS point minus the value of the equivalent GPS point in the model.

---

\* Grade Project.

\*\*UIS Physicomecanic Engineering Faculty, Civil Engineering School, Director: Guzman Jaimes Jorge Alberto.

## INTRODUCCIÓN

El presente proyecto muestra la construcción del Modelo Digital de Elevaciones (MDE - DEM) de la Mesa de Barichara a partir de cartografía IGAC disponible de la zona (Escala 1:25000) tanto en formato digital como en formato papel.

También muestra su respectiva Validación mediante la comparación con puntos de referencia IGAC y otros puntos georeferenciados durante la elaboración del proyecto.

La construcción del presente modelo nace de la necesidad de tener el relieve de la zona en 3D como base para su utilización en Sistemas de Información en el proyecto "*Investigación Geológica e Hidrológica en la Región Central del Dpto. de Santander*" que la UIS desarrolla junto con Ingeominas.

Los DEM han sido de gran importancia en diversos campos, donde cumplen diversas funciones como lo son la predicción de deslizamientos, modelación del relieve, planeación militar, determinación de zonas de vida, (Moore et al., 1991; Burrough and MacDonnell, 1998), estudios agrícolas y viales entre otros.

El campo donde su estudio se ha hecho notorio es el Hidrológico; allí han permitido solucionar problemas relacionados con modelación hidrológica y administración de recursos hídricos, y se destacan estudios como: Construcción de Modelos Lluvia - Escorrentía (Vélez, 2001), Estimación de Regímenes de Caudales (Vélez etc., 2000), Cálculo de Parámetros Geomorfométricos (Mantilla, 1999), Gestión del Recurso Hídrico (Correa, 2002), Extracción Automática de Redes de Drenaje (Ramírez 2002), Separación de Flujo Base en la Estación Café Madrid C.S.R.L (Serrano y Balaguera, 2006)

El presente documento se encuentra dividido en 5 capítulos cuyos contenidos son:

El capítulo 1 del presente documento hace una breve descripción de lo que es un DEM y los pasos a emplearse en la generación del mismo.

El capítulo 2 hace referencia a la zona de estudio, para el caso la Mesa de Barichara (zona Guanentina), donde se muestran sus límites y principales municipios, así como las planchas cartográficas IGAC que conforman la zona y que serán empleadas en la construcción del modelo.

El capítulo 3, y 4 describe la consecución de la información, su limpieza y corrección, la estructura de datos a emplear, así como los interpoladores Surfer

Utilizados en la generación de modelos e Informes para la selección del Interpolador final a emplear en la construcción del DEM de la Mesa de Barichara.

Por ultimo el capitulo 5 determina la búsqueda de los parámetros óptimos del Interpolador Surfer seleccionado, así como también la etapa de validación del mismo mediante la comparación de puntos GPS (puntos supuestos reales) vs. Puntos modelo.

En este trabajo se empleo software comercial como Surfer y software especifico diseñado por el grupo de Investigación GPH.

## 1 MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES (DEM)

Cuando se escucha el término Modelo Digital de Elevaciones (DEM - MDE) y no se conoce mucho acerca del tema, con lo primero que se suele relacionar es con unas curvas de nivel que se encuentran en un formato digital; se puede tener quizá algo de razón, pero esta quizá es tan solo una pequeña aproximación a lo que en verdad es un DEM.

### 1.1 QUE ES UN DEM?

Un DEM es una estructura discreta de datos que representan de manera digital una variable continua que se distribuye en el espacio sobre una superficie de dos dimensiones (Felicísimo 1994), las que comúnmente se representan con las letras X, Y; a la variable continua se suele representar con la letra Z y generalmente corresponde a la altitud de la superficie del terreno.

Es importante mencionar que la unidad básica de información en un DEM es un punto acotado, el cual se define o representa mediante una terna o trío compuesta por un valor de altitud, que como se mencionó anteriormente se representa con la letra z y al que acompañan los valores correspondientes de x e y.

### 1.2 CREACIÓN DE UN DEM

Generar un DEM no es algo sencillo, hacerlo implica una serie de pasos, algunos son fáciles y cortos, otros tediosos, pero en cada una de ellos se debe tener especial cuidado, ya que en los mismos se genera un error el cual deberá ser mínimo para lograr que el DEM se ajuste lo más cercanamente posible a la realidad.

Los pasos generalmente empleados en la creación de un DEM son:

- ✘ Búsqueda y Obtención de Datos.
- ✘ Escogencia del tipo de estructura del DEM.
- ✘ Determinación del interpolador a emplear
- ✘ Validación del modelo generado.

De la calidad y buena selección de los 3 primeros pasos dependerá la precisión del modelo generado y con la aplicación de la validación del modelo se tendrá una estimación de la calidad del mismo.

### 1.2.1 .ADQUISICIÓN U OBTENCIÓN DE DATOS

Esta etapa es de vital cuidado y la más importante dentro de la creación del DEM, ya que la calidad de la información que se emplee determinara en parte la calidad del Modelo.

Para la Adquisición de datos existen muchas técnicas, las cuales se pueden clasificar como directas e indirectas.

**Técnicas directas:** son aquellas que se aplican sobre la zona a estudiar, se emplean cuando no se cuenta con el presupuesto necesario, la información cartográfica no existe, es errónea o se ha presentado un cambio fuerte de relieve producido por eventos naturales.

Las técnicas directas más conocidas y empleadas son:

- ✘ Levantamientos Topográficos
- ✘ Levantamientos con Estación
- ✘ Levantamientos con GPS
- ✘ Altimetría con Radar o Láser.

**Técnicas indirectas:** son aquellas que se emplean sin la necesidad de estar en la zona de estudio para recopilar la información, suelen ser por lo general de muy buena calidad, la información se obtiene en tiempos cortos, y suelen ser muy económicas si se emplean en grandes áreas.

Algunas de las técnicas indirectas son:

- ✘ Planchas Cartográficas Digitales
- ✘ Fotogrametría
- ✘ Imágenes Satelitales.

Una vez se han obtenido los datos para la creación del modelo, se deben analizar cuidadosamente de tal forma que se detecten los posibles errores, con el fin de minimizarlos o si es posible eliminarlos. Los errores más comunes que se suelen encontrar en esta etapa son:

- ✘ **Errores cartográficos:** se dividen en errores posicionales y atributivos.

- **Posicionales:** se dan por la deficiente colocación de la cota y afectan por lo tanto la situación en el plano XY, solo afectan a modelos vectoriales y suele derivarse generalmente de la digitalización de mapas.
- **Atributivos:** afectan tanto a los modelos vectoriales como a los tipos Raster; al error atributivo en los modelos vectoriales se le suele llamar *Blunder*.
- ✘ **Errores Sistemáticos:** Presentan un patrón de distribución concreto e introduce un sesgo en el MDE. En el caso de existir pueden ser eliminados o al menos reducidos (Felicísimo 1994)
- ✘ **Errores Aleatorios:** se llaman así a los errores que quedan después del proceso de eliminación y corrección de errores sistemáticos y atributivos; no es posible conocer la naturaleza de su causa y por lo tanto están fuera del control del observador.

### 1.2.2 ESTRUCTURAS DE DATOS EN UN DEM

La elección de la estructura de datos en la construcción de un DEM es trascendental pues condiciona completamente el futuro manejo de la información; Existen varias formas de representarlos, aunque comúnmente son dos las formas más comunes de presentar los modelos (Felicísimo, 1994).

❖ **Modelo o Estructura Vectorial:** basado en entidades u objetos geométricos como lo son los puntos las líneas y los polígonos que se encuentran definidos por las coordenadas de sus nodos y vértices.

En los modelos vectoriales los atributos del terreno se representan mediante líneas (vectores) y mediante puntos acotados. Los puntos se definen mediante un par de valores de coordenadas y las líneas, por tanto, mediante un vector de pares de coordenadas. (Felicísimo 1994). Un ejemplo de este modelo se puede observar en la Figura 1 donde tanto los árboles como el río se han modelado mediante un conjunto de líneas y puntos que asemejaran la realidad.

#### ✘ **Contornos**

Su elemento básico es el vector, el cual esta compuesto por un conjunto de pares de coordenadas que describen la trayectoria de unas líneas isométrica (curvas de nivel), donde el número de elemento de cada vector es variable. En este caso el MDE está constituido por el conjunto de curvas de nivel que pasan por una zona, separadas generalmente por intervalos constantes de altitud.

#### ✘ **Redes de triángulos irregulares (TIN)**

Es una estructura cada vez más utilizada, que se representa como conjunto de triángulos irregulares adosados. Los triángulos se construyen ajustando un plano a

tres puntos cercanos no colineales y se unen sobre el terreno para formar un mosaico que se adapta a la superficie con diferentes grados de detalle, en función de la complejidad del relieve. Normalmente la distribución de puntos es aleatoria, pero es posible partir en base a los puntos de isolíneas.

Se han encontrado muchas aplicaciones para la estructura TIN, siendo la gran cantidad de información que es almacenada implícitamente en la estructura, la ventaja principal sobre las otras representaciones. Los mapas construidos de esta forma pueden ser usados para derivar mapas de pendientes, perfiles (Ramírez 2002)

*Las ventajas y desventajas que comúnmente se suelen presentar en el modelo vectorial se muestran en la Tabla 1.*

**Tabla 1 Principales Ventajas y Desventajas del Modelo Vectorial.**

Modelo Vectorial	
Ventajas	Desventajas
❖ Estructura de datos compacta.	❖ Estructura de datos muy compleja.
❖ La búsqueda, actualización, Generalización de gráficas y atributos es posible.	❖ Como cada unidad de datos tiene diferente forma topológica, las simulaciones son muy difíciles.
	❖ La superposición de varios mapas en formato vectorial y en celdas es muy difícil.
❖ Cálculo más preciso de áreas, perímetros y longitudes.	❖ El despliegue y el dibujo son más caros.
	❖ Costo de la tecnología.

Fuente: Introducción a los SIG capítulo 4 Pág. 13 Jorge Gómez G y modificado por el autor

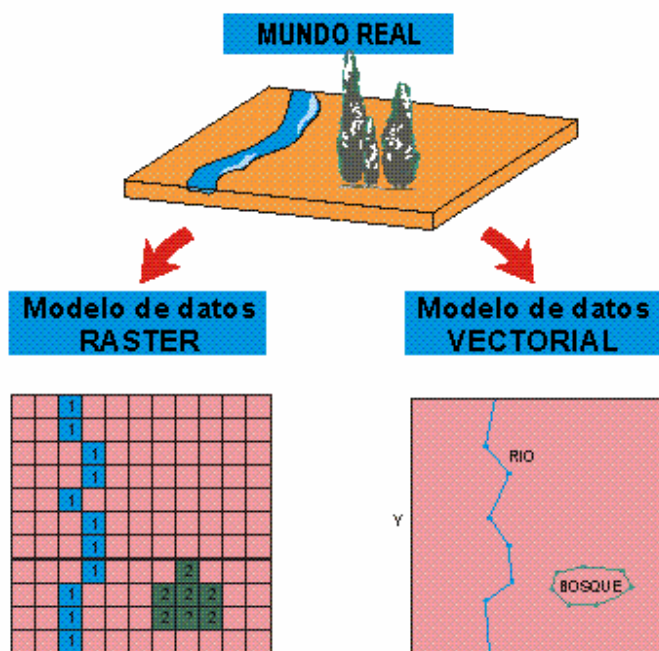
❖ **Modelo o Estructura Raster.** Es la forma más común de representar la variación de una superficie continua sobre un área determinada, su componente principal son áreas rectangulares organizadas de forma matricial, cada una de las cuales reciben el nombre de celda o píxel y su unión genera la malla regular o grilla del modelo (Ver Figura 1); Cada celda ha de ser rectangular, aunque no necesariamente cuadrada. Cada celda de la rejilla guarda tanto las coordenadas de la localización como el valor temático. La localización de cada celda es implícita, y depende directamente del orden que ocupa en la rejilla.

Al emplear una estructura Raster para la generación de un modelo se debe tener en cuenta la resolución y la precisión ya que en últimas estos dos parámetros determinaran el nivel de detalle con el cual se representa el terreno.

La resolución hace referencia a la longitud de cada celda en la matriz, por lo que se pueden manejar dos resoluciones una en X o otra en Y; y la precisión

corresponde a el número de decimales que se usa para almacenar los valores de la variable Z.

Figura 1 Representación de la realidad a través de las estructuras de datos Raster y Vectorial.



Fuente: WEB -Roberto Tinoco Guevara – Definición y algunas aplicaciones de modelos de datos

### ✘ Matrices Regulares

Se obtienen al colocar o superponer una cuadrícula o malla sobre el terreno a estudiar y extraer la altitud media de cada celda o asociar un valor puntual de altura para el centro de la celda. La malla puede ser una grilla regular de filas y columnas. Cada dato está implícitamente localizado según su situación en la matriz. Las matrices de altitud suelen provenir de la interpolación de modelos previos de contornos o por métodos fotogramétricos o radargramétricos.

### ✘ Matrices de Resolución Variable

En este tipo de matrices los elementos pueden estar ordenados como en las matrices regulares o bien organizadas en submatrices a resolución diferente. La estructura final es como un árbol jerárquico y dinámico de submatrices con profundidad en principio arbitraria y cuya resolución espacial se duplica en cada nivel.

*Las ventajas y desventajas que comúnmente se suelen presentar en un modelo Raster se presentan en la Tabla 2:*

**Tabla 2 Principales Ventajas y Desventajas del Modelo Vectorial.**

Modelo Raster	
Ventajas	Desventajas
❖ La estructura es mucho mas simple	❖ Cuando los datos espaciales están esparcidos, hay mayor desperdicio de espacio en el almacenamiento
❖ Son más sencillos los análisis espaciales por la forma misma de su estructura.	❖ Es más fácil cometer errores en la determinación de áreas y perímetros.
	❖ Son más difíciles de implementar los enlaces de redes.
❖ La tecnología aplicable es más barata.	❖ Las transformaciones de proyecciones son más lentas.

Fuente: Introducción a los SIG capitulo 4 Pág. 13 Jorge Gómez G y modificado por el Autor

### 1.3 DETERMINACION DEL INTERPOLADOR A EMPLEAR

Existe una gran variedad de métodos o algoritmos interpoladores que se pueden aplicar en la generación de mallas o grillas interpoladas; estos métodos se agrupan en 2 categorías, Determinísticos y Geoestadísticos.

**Métodos Determinísticos:** basan su funcionalidad en el cálculo de fórmulas matemáticas que consiguen un mayor o menor grado de suavizado, (Aguilar F, et al, 2004).donde son empleados factores de peso que se calculan por medio de la distancia relativa existente entre el punto a interpolar y los puntos muestrales.

✘ **Métodos Geoestadísticos:** además de tener en cuenta factores geométricos, también introducen la relación estadística entre los distintos puntos medidos para generar la predicción y establecer la fiabilidad del modelo. (Aguilar F, et al, 2004).

Dependerá del creador del modelo y el uso del mismo la escogencia del método que mejor se ajuste, ya que el mismo condicionara la calidad del modelo obtenido a través del mismo

Los métodos que se utilizaron en el presente proyecto son excepto Kriging Determinísticos; se encuentran incorporados dentro del programa Surfer 8 y son empleados por el mismo en una serie de aplicaciones entre las cuales se encuentra generar modelos a través de grillas interpoladas. Los interpoladores Surfer son:

- ✘ Distancia inversa a una Potencia
- ✘ Kriging
- ✘ Mínima curvatura
- ✘ Método De Shepard Modificado

- ✘ Vecino Natural.
- ✘ Vecino Más cercano
- ✘ Regresión Polinomial
- ✘ Funciones Radial Basic
- ✘ Triangulación con interpolación lineal
- ✘ Promedio Móvil
- ✘ Polinomio Local.

#### 1.4 VALIDACION DEL MODELO GENERADO

La validación del modelo generado para un DEM consiste en comparar altitudes, para ellos se toman datos posicionales tanto del modelo como reales con el fin de obtener la exactitud del modelo.

El primer acercamiento a dicha exactitud se hace en la selección del método interpolador, donde a través del menor RMSE (Raíz cuadrada del error medio); el calculo de este error se lleva a cabo mediante la comparación de datos que se suponen reales (Información Cartográfica Digitalizada) con la comparación de los datos obtenidos en el modelo generado por el interpolador en cada uno de sus nodos a través de la siguiente ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (Z_i - Z_t)^2} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$Z_i$  = Valor en el nodo por el interpolador.

$Z_t$  = Valor real en el nodo.

$n$  = número de puntos empleados.

Este método solo se empleara en la búsqueda del interpolador optimo, aunque hará su aporte de manera implícita en el valor de exactitud calculado para el modelo, pues como se menciono anteriormente dicho valor de exactitud se calcula mediante la comparación de datos reales conocidos contra los mismos datos pero generados por el modelo (el cual se escoge mediante el menor RMSE).

La segunda forma de calcular la exactitud es mediante la toma de elevaciones reales conocidas a través de una fuente precisa (GPS de alta precisión) y su comparación con elevaciones en el modelo aplicando la ecuación 2 para cada par de elevaciones (real - modelo), una vez se ha obtenido el residuo de cada par de elevaciones se calcula el residuo medio de elevación mediante la ecuación 3.

$$Z_{Residual} = Z_{DEM} - Z_{GPS} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$Z_{Residual}$ : Diferencia de elevación entre los puntos DEM y los puntos de GPS.

$Z_{DEM}$ : Valor de elevación en el DEM para una ubicación espacial determinada.

$Z_{GPS}$ : Es la elevación obtenida con equipo GPS.

$$Z_{Residual\ Medio} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_{Residual_i} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$Z_{Residual\ Medio}$ : Promedio de  $Z_{Residuales}$

$Z_{Residual\ i}$ : Diferencia para cada par de elevaciones (GPS – Modelo)

$n$  = # total de pares de elevaciones = # total de puntos GPS

## 2 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

### 2.1 LOCALIZACIÓN

Figura 2 Ubicación geográfica de la Mesa de Barichara



Fuente: el Autor

La Mesa de Barichara se encuentra geográficamente ubicada en el departamento de Santander (Colombia), ubicada en la provincia de Guanenta y delimitada por las cuencas del Suárez, Chicamocha y Fonce (Véase la Figura 2).

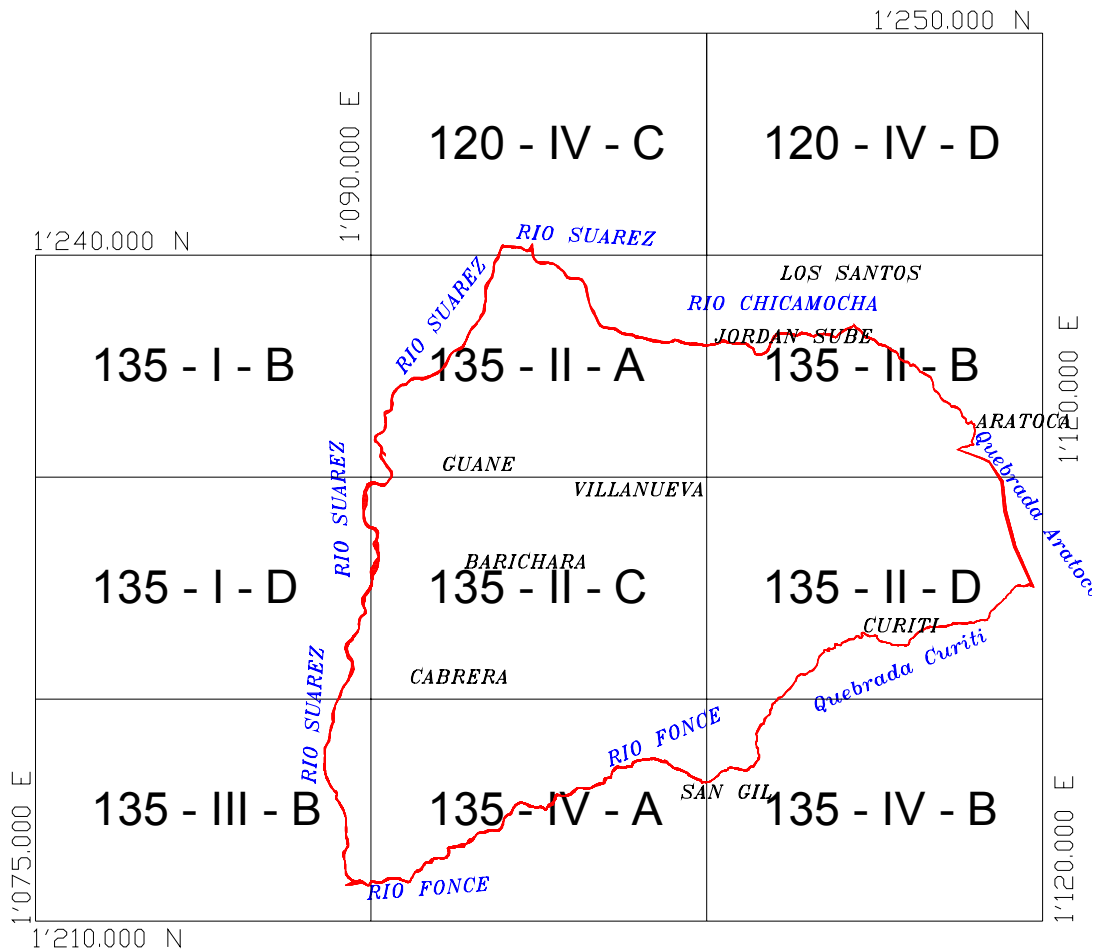
Esta delimitada hacia el norte por la unión de los ríos Suárez y Chicamocha a 350 m.s.n.m aproximadamente, hacia el Nororiente con los municipios de los Santos, Jordán Sube y el río Chicamocha, hacia el oriente con el municipio de Aratoca, hacia el Suroriente con el municipio de Curití, hacia el sur con la unión de los ríos Fonce y Suárez y el municipio de San Gil y hacia el occidente con el río Suárez. (Figura 3)

Conformada por los municipios de San Gil, Villanueva, Barichara, Guane, Cabrera, Jordán Sube, Jordán Bajo, Curití, Aratoca.

## 2.2 DESCRIPCION DE SUS PRINCIPALES CUENCAS Y MUNICIPIOS

Las cuencas principales de la Mesa de Barichara son las que la delimitan y corresponden a la Cuenca del Suárez, Chicamocha y Fonce. (Plan de acción Trienal 2004 – 2006 C.A.S Pág. 66).

Figura 3 Límites y principales Municipios que conforman la Mesa de Barichara.



Fuente: IGAC Planchas Digitalizadas Escala 1:25000 y Modificado por el autor

### 2.2.1 CUENCA DEL RÍO SUÁREZ

El río Suárez nace en la laguna de Funeque, en los límites del departamento de Boyacá, para luego entrar por el sur del departamento de Santander, sector por donde se desplaza con características turbulentas debido a las pendientes acentuadas que presenta en cortos trayectos.

La cuenca del río Suárez posee una extensión de 982300 hectáreas y al departamento de Santander le corresponden 348256 es decir el 35.25% del área total de la cuenca.

El cauce del río Suárez tiene una pendiente media desde su nacimiento hasta la desembocadura en el río Sogamoso de 17m/Km. y una altura máxima y mínima 3700 y 700 m.s.n.m respectivamente. El caudal medio multianual es de 195 m<sup>3</sup>/seg. (Plan de acción Trienal 2004 – 2006 C.A.S Pág. 66).

### **2.2.2 CUENCA DEL RÍO FONCE**

El río Fonce nace en los límites con el departamento de Boyacá en la serranía de Peña Blanca. Desemboca en el río Suárez en inmediaciones del municipio el Palmar, se caracteriza por poseer una pendiente promedio del orden de 32 m/Km. y una longitud de 98 Km. La cuenca transcurre desde una altura de 3800 m.s.n.m en sus nacimientos, hasta llegar a 700 m.s.n.m al desembocar en el río Suárez. Posee una extensión de 215900 hectáreas, de las cuales pertenecen al departamento de Santander 209956, equivalentes al 97.25% del área total.

Las subcuencas que hacen parte de esta importante hoya hidrográfica son: río Curití, río Mogotitos, río Pienta, río Taquiza, las cuales generan un caudal de escorrentía media multianual de 90 m<sup>3</sup>/seg. (Plan de acción Trienal 2004 – 2006 C.A.S Pág. 66).

### **2.2.3 CUENCA DEL RÍO CHICAMOCHA**

El río Chicamocha nace en el departamento de Boyacá, al entrar por el departamento de Santander toma su nombre hasta la desembocadura en el río Sogamoso. Tiene un longitud total de 270 Km. y una hoya hidrográfica de 1'033200 hectáreas de las cuales solamente 401278 hectáreas pertenecen al departamento de Santander.

Presenta alturas de cauce que van desde los 3300 m.s.n.m, hasta los 480 m.s.n.m. (Plan de acción Trienal 2004 – 2006 C.A.S Pág. 66).

### **2.2.4 MUNICIPIO DE SAN GIL**

San Gil se encuentra ubicado a 96 Km. de Bucaramanga (Santander) y a 327 Km. de Bogotá.

Es la capital de la provincia Guanentina y tiene un área de 145 Km<sup>2</sup>.

Ubicada a 1154 m.s.n.m. con una temperatura media de 24° C, una máxima de 32° C y una mínima de 16° C; el régimen de lluvias oscila entre 600 a 1800 mm/año con un promedio de 1.200 mm, presentando las mayores precipitaciones en los meses de abril, mayo, septiembre y octubre. El 82.2 % de su piso térmico es cálido y sólo el 17,8 % es medio.

Su topografía es variada (Tabla 3) y presenta los siguientes porcentajes:

**Tabla 3 Porcentajes de Relieve presentes en el Municipio de San Gil**

Topografía	Porcentaje (%)
Plano	30
Ondulado o Fuertemente Ondulado	65
Escarpado	5

Fuente: Autor

En cuanto a su población cuenta con 35100 habitantes en el área urbana y 9900 habitantes en el área rural para un total de 45000 habitantes, la población rural se dedica a las labores de la agricultura con cultivos de frijol, tomate y yuca.

### **2.3 ARCHIVOS DIGITALES DE LA ZONA DE ESTUDIO**

Para la construcción del presente Modelo Digital de Elevaciones (MDE), se hizo necesario el uso de cartografía IGAC escala 1:25000 tanto en formato digital, como en formato papel, esta información fue suministrada en su totalidad por el Grupo de Predicción Hidroclimático (GPH).

El DEM de la mesa de Barichara se construyó con un total de once planchas IGAC escala 1:25000; donde las principales coordenadas que las componen se muestran en la Tabla 4, donde se muestran sus valores mínimos y máximos.

**Tabla 4 Coordenadas IGAC escala 1:25000 de la Zona de estudio de la Mesa de Barichara.**

PLANCHA IGAC NUMERO	ESCALA	COORDENADAS IGAC			
		ESTE		NORTE	
		MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO
<b>120 - IV - C</b>	<b>1:25000</b>	1,090,000.00	1,105,000.00	1,240,000.00	1,250,000.00
<b>120 - IV - D</b>		1,105,000.00	1,120,000.00	1,240,000.00	1,250,000.00
<b>135 - I - B</b>		1,075,000.00	1,090,000.00	1,230,000.00	1,240,000.00
<b>135 - II - A</b>		1,090,000.00	1,105,000.00	1,230,000.00	1,240,000.00
<b>135 - II - B</b>		1,105,000.00	1,120,000.00	1,230,000.00	1,240,000.00
<b>135 - I - D</b>		1,075,000.00	1,090,000.00	1,220,000.00	1,230,000.00
<b>135 - II - C</b>		1,090,000.00	1,105,000.00	1,220,000.00	1,230,000.00
<b>135 - II - D</b>		1,105,000.00	1,120,000.00	1,220,000.00	1,230,000.00
<b>135 - III - B</b>		1,075,000.00	1,090,000.00	1,210,000.00	1,220,000.00
<b>135 - IV - A</b>		1,090,000.00	1,105,000.00	1,210,000.00	1,220,000.00
<b>135 - IV - B</b>		1,105,000.00	1,120,000.00	1,210,000.00	1,220,000.00

Fuente: Autor

### **3 PREPARACIÓN, LIMPIEZA Y CORRECCIÓN DE INFORMACIÓN PARA LA GENERACIÓN DE MODELOS A TRAVÉS DE LOS INTERPOLADORES SURFER**

Para poder emplear los interpoladores Surfer en la generación del modelo, se hace necesario que la información correspondiente a la zona de estudio se encuentre en un archivo .dxf, el cual estará conformado únicamente por las curvas de nivel que conforman dicha zona.

Cada una de estas curvas debe ser totalmente continua, por lo que se hace necesario la utilización del comando polilínea de Autocad.

Los archivos donde se encuentra la información de la zona de estudio, se encuentran en formato digital con extensión .dwg, razón por la cual se hace necesaria la aplicación del Programa Autocad 2005 o cualquiera de sus versiones.

El proceso que se siguió fue el siguiente.

- ✘ Unión de Planchas Cartográficas y Comprobación del valor de cada una de las curvas de nivel.
- ✘ Corrección de unión de curvas en los límites de las planchas y Adición de información faltante
- ✘ Transformación de líneas discontinuas en polilíneas.

#### **3.1 UNIÓN DE PLANCHAS CARTOGRÁFICAS Y COMPROBACIÓN DEL VALOR DE CADA UNA DE LAS CURVAS DE NIVEL**

La unión de las planchas IGAC se hizo a través del programa Autocad, donde se generó un archivo nuevo llamado Zona de Estudio DEM Mesa de Barichara.

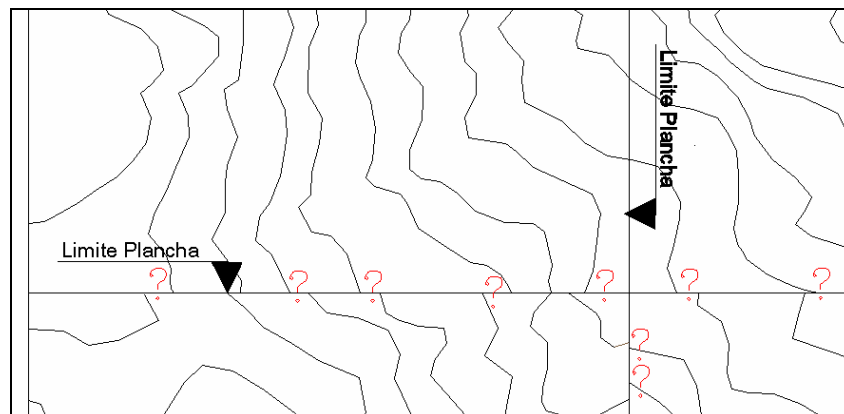
Inicialmente se abrieron 2 planchas adyacentes, se desactivaron las capas que no correspondían a curvas de nivel, dejando únicamente esta última activa, posteriormente se seleccionó toda la información activa de una de las planchas (curvas de nivel cada 50 m), se copiaron y posteriormente se pegaron en el archivo Zona de estudio DEM Mesa de Barichara, mediante la opción *pegar en coordenadas originales*, luego se seleccionó toda la información activa de la segunda plancha se copió y se pegó en coordenadas originales en el archivo Zona de Estudio DEM Mesa de Barichara.

El siguiente paso consiste en la comprobación del valor de cada una de las curvas de nivel en el archivo Zona de estudio DEM Mesa de Barichara mediante el Comando *propiedades*, donde se verificaba que el valor de altura digital correspondiera al valor de altura en el formato papel.

### 3.2 CORRECCIÓN, UNIÓN DE CURVAS EN LOS LÍMITES DE LAS PLANCHAS CARTOGRÁFICAS Y ADICCIÓN DE INFORMACIÓN FALTANTE

Al realizar la unión de las planchas cartográficas se observó que las curvas de nivel no empalmaban en los límites de las planchas, un sencillo ejemplo se ve en la Figura 4, donde los signos de interrogación muestran las curvas de nivel que no empalman.

**Figura 4**Detalle de la no unión de curvas de nivel en los bordes o límites de las Planchas Cartográficas Digitalizadas IGAC.

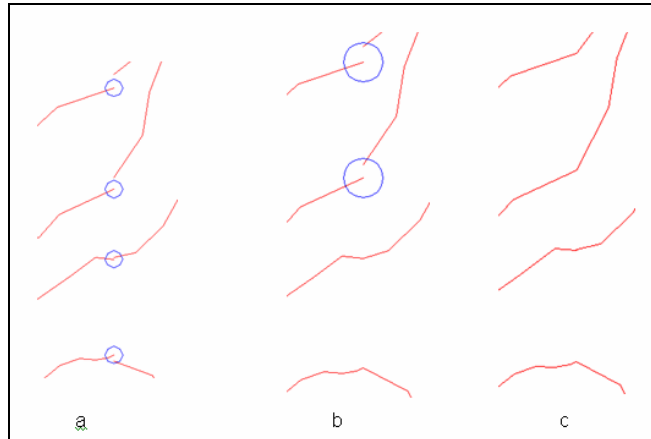


Fuente: el Autor

El empalme de estas curvas se hizo empleando el Programa Autocad Map 2000, una versión de la familia CAD diseñada especialmente para la eliminación de líneas duplicadas, objetos cortos, disolución de seudonodos y Agrupación de nodos y todo aquello que tenga que ver con la limpieza de dibujos y mapas.

Autocad Map reconoce este error como la falta de agrupación de nodos y su corrección se llevo a cabo mediante la introducción de un radio de tolerancia (Figura 5a) que permite la unión de los nodos para su posterior empalme; para ello se emplearon una serie de radios de menor a mayor magnitud (Figura 5a y 5b) hasta que se logro el total de los empalmes (Figura 5c).

**Figura 5 a) Errores presentados al unir dos planchas IGAC; b) Aplicación de radios de tolerancia para el empalme de curvas de nivel; c) Curvas de nivel totalmente corregidas)**



Fuente: el Autor

Gracias a que el grupo GPH ha interactuado con la zona de estudio se pudo observar también que algunas de las curvas estaban mal digitalizadas, por lo que se hizo necesario la revisión una a una de cada una de las curvas de nivel digitalizadas vs. Las curvas que se encontraban en formato digital y corregir aquellas que no se ajustaban.

Finalmente el problema que quedo por solucionar fue la falta de información (pequeñas curvas de nivel) en los archivos digitales, para lo cual se digitalizaron aquellas curvas que no se encontraban en formato digital y que pertenecían a la zona.

### **3.3 TRANSFORMACIÓN DE LÍNEAS DISCONTINUAS EN POLILÍNEAS**

Una vez se agrego la información faltante y se hizo la limpieza del dibujo, se procedió a darle continuidad a cada una de las curvas de nivel; este paso se hizo curva por curva y con mucho cuidado, hasta lograr la fusión de las dos planchas.

Unidas las dos primeras planchas, se procedió a abrir uno a uno los archivos de las planchas faltantes, repitiendo el proceso descrito desde el numeral 3.1 al 3.3, donde al iniciar cada proceso la plancha que ha quedado fusionada deberá ser una de las dos nuevas planchas a fusionar hasta lograr que el total de las 11 planchas queden fusionadas.

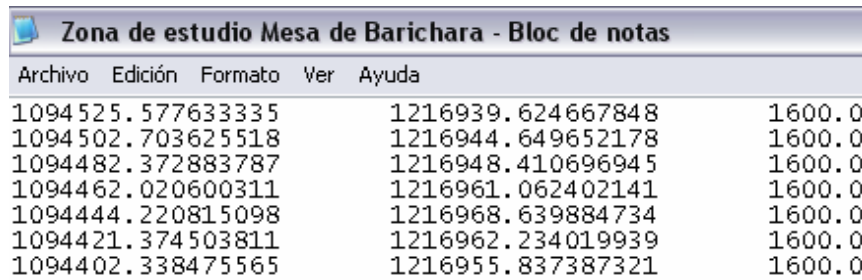
Finalmente el archivo Zona de Estudio DEM Mesa de Barichara con extensión .dwg se transformo a una extensión .dxf y se exporto al programa Spell Map el cual fue desarrollado por el ing. Jorge Alberto Guzmán adscrito al Grupo en

Predicción y Modelamiento Hidroclimático (GPH) perteneciente a la Universidad Industrial de Santander (UIS).

Spell Map cuenta con una Gran variedad de aplicaciones, muchas de las cuales se emplearon en el presente proyecto.

Spell se empleo en la extracción de los datos correspondientes a las coordenadas espaciales de cada una de las polilíneas que conforman la zona de estudio; el programa genero un archivo de texto, donde se guardo la información correspondiente a la terna de coordenadas cartesianas (x, y, z) de cada una de la curvas de nivel de la zona de estudio, tal como se ve en la Figura 6 para su posterior uso en el programa Surfer.

**Figura 6 Terna de puntos generados por Spell Map para su posterior empleo en los interpoladores Surfer.**



Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
1094525.577633335			1216939.624667848	1600.0
1094502.703625518			1216944.649652178	1600.0
1094482.372883787			1216948.410696945	1600.0
1094462.020600311			1216961.062402141	1600.0
1094444.220815098			1216968.639884734	1600.0
1094421.374503811			1216962.234019939	1600.0
1094402.338475565			1216955.837387321	1600.0

Fuente: el Autor

#### 4 DESCRIPCIÓN, ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE LOS INTERPOLADORES SURFER EN LA GENERACIÓN DEL DEM PARA LA MESA DE BARICHARA

Una vez se definió la zona de estudio, se corrigió e hizo la limpieza de su información se optó por emplear una estructura tipo Raster después de analizar sus ventajas y desventajas (Tabla 2, Capítulo 1), además de que la misma produce buenos resultados en áreas con fuertes relieves (Carter 1988).

Queda por definir el algoritmo Interpolador a emplear, pues cada técnica de interpolación, en función del algoritmo y los parámetros que maneja, generan una replica que intenta aproximarse a la realidad. El fin de esta etapa es determinar cual de estos algoritmos asemeja con mejor calidad la realidad.

El programa a emplear es Surfer 8 producido por la Golden Software, Inc., el cual cuenta con una serie de algoritmos interpoladores determinísticos, que se clasifican dentro del programa en:

- **Interpoladores Exactos**
  - **Interpoladores de Suavizado o Alisado.**
- **Interpoladores Exactos:** mantienen los puntos de referencia en su posición original cuando el punto de control o apoyo coincide perfectamente con el punto que está siendo interpolado; Cuando esto ocurre el algoritmo que se está utilizando asigna un peso igual a uno (1) al punto de control coincidente y a los demás puntos de control utilizados en la interpolación de dicho punto asigna pesos iguales a cero (0) (Manual del usuario Surfer 2004).

Los algoritmos interpoladores exactos Surfer son:

- Distancia Inversa.
  - Kriging.
  - Vecino Natural.
  - El Vecino Más Cercano.
  - Método De Shepard Modificado.
  - Funciones Radial Basic.
  - Triangulación con Interpolación Lineal.
- **Interpoladores de Suavizado o Alisado:** nunca asignan como peso la unidad (1) a ninguno de los puntos de control o apoyo, ni siquiera cuando alguno de estos coincide exactamente con el punto a ser interpolado. Se emplean cuando no se tiene una total confianza en la capacidad de repetición de las medidas de los datos, su fin es lograr asignar factores de peso a cada uno de los datos de

Apoyo para así poder obtener un mapa o una superficie mas lisa, se debe ser cuidadoso al momento de aplicarlos ya que si se exagera en su valor se puede llevar a que el mapa o la superficie tiendan a un plano horizontal (Manual del usuario Surfer 2004).

Los algoritmos interpoladores de suavizado Surfer son:

- Distancia Inversa
- Kriging
- Funciones Radial Basic
- Método De Shepard Modificado
- Regresión Polinómica
- Polinomio Local
- Móvil Promedio

Para la aplicación de los diferentes algoritmos se decidió trabajar las planchas cartográficas de forma individual por lo que se hizo necesario dividir el archivo Zona de Estudio DEM mesa de Barichara en sus once planchas que para comodidad del lector a partir de este momento se llamaran Regiones.

En total las once regiones contienen un total de 272705 datos o ternas de coordenadas.

Los métodos interpoladores a emplear en cada una de las regiones serán:

- Distancia Inversa a la Potencia
- Vecino mas Cercano
- Vecino Natural
- Triangulación con Interpolación Lineal
- Mínima Curvatura
- Kriging
- Funciones Radial Basic:
  - *Multicuadratica Inversa*
  - *Multilogaritmica*
  - *Multicuadratica*
  - *Spline Cúbica Natural*
  - *Thin Plate Spline*

Cada uno de estos algoritmos se aplico a cada una de las regiones, esto se hizo con el fin de determinar cual de ellos se ajustaba mejor a cada una de las regiones para al final definir el Interpolador general.

La calidad de cada uno de los modelos generados para cada una de las regiones por cada uno de los algoritmos se determino mediante el proceso de Validación Cruzada, seleccionando de esta manera el de mejor ajuste.

#### 4.1 VALIDACIÓN CRUZADA

La Validación Cruzada consiste en un informe estadístico de datos que de forma objetiva permite a el usuario determinar la eficacia de un método interpolador, así como la comparación en cuanto a calidad de dos o más métodos interpoladores, gracias a que cada uno de los métodos interpoladores puede generar un informe de Validación Cruzada.

El proceso de validación Cruzada en Surfer 8 consiste en la eliminación del primer dato, punto o valor muestral de información, el cual consta de unas coordenadas (x, y) de la cantidad de datos o puntos a validar por el usuario y a partir de los mismos genera un valor al cual se le conoce como valor interpolado (Manual del Usuario Surfer 2004).

Posteriormente calcula el error cometido en la interpolación del Valor muestral como:

$$\text{Error Residual} = \text{Valor Interpolado} - \text{Valor Muestral} \quad \text{Ecuación 4}$$

Este mismo procedimiento se realiza para cada uno de los puntos a validar y finaliza cuando se logra calcular el error en la interpolación del último valor muestral, por lo que al final se tendrán tantos errores residuales como puntos a validar.

Al finalizar el proceso de Validación Cruzada Surfer genera el informe, en el cual se encuentran una serie de valores que corresponden a las estadísticas más importantes del método interpolador empleado con respecto a los datos a validar.

Uno de estos valores corresponde al RMSE (Root Main Square Error), el cual se asumió como el factor de comparación entre los diversos métodos para cada una de las regiones que conforman la zona y así determinar el interpolador a emplear en la generación del DEM de la Mesa de Barichara; dicho valor se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Ei)^2} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde

**n** = número de puntos a validar

**Ei** =  $Z_{DEM} - Z_{ENTRADA}$

## 4.2 DEFINICIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS INTERPOLADORES SURFER PARA LA GENERACIÓN DEL DEM

### 4.2.1 DISTANCIA INVERSA A UNA POTENCIA :

Puede ser un interpolador exacto o de alisado; Una de sus características es que trabaja con pesos ponderados, en donde los datos que se encuentran mas cercanos al dato a interpolar adquieren mucho mas peso que aquellos datos que se encuentran mas alejados. El responsable de los factores de peso que adquieren los datos que intervienen en la interpolación es el parámetro de la potencia.

La ecuación que emplea Surfer para el Método de la Distancia Inversa a una Potencia es:

$$\hat{Z}_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad \text{Ecuación 6} \quad h_{ij} = \sqrt{d_{ij}^2 + \delta^2}$$

Donde:

$h_{i,j}$  = Es la distancia final de separación entre el nodo "j" de la rejilla y el punto vecino " i."

$\hat{Z}_j$  = Es el valor interpolado para el nodo " j " de la rejilla;

$Z_i$  =son los puntos vecinos;

$d_{i,j}$  = es la distancia entre el nodo " j " de la rejilla y el punto vecino " i".

$\beta$  = Es la potencia de peso (es el parámetro power);

$\delta$  = Es el parámetro de alisado.

Como se puede apreciar en la ecuación 6 Cuando la potencia de peso se haga mayor, el efecto en los puntos mas alejados con respecto al punto interpolado será menor. También se puede observar que si asignamos una potencia muy pequeña los pesos serán mas uniformes entre los puntos vecinos al punto a interpolar.

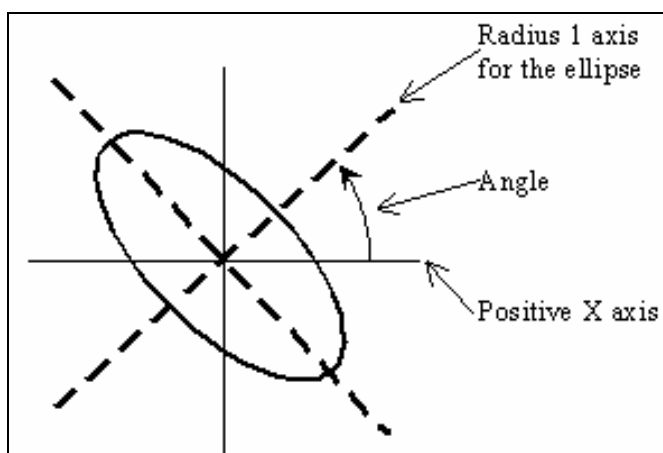
Los factores de peso asignados a los puntos de muestra son fracciones muy pequeñas, en donde su sumatoria es igual a la unidad (1). Cuando uno de los puntos de muestra coincide con un nodo de la rejilla, la distancia entre ese punto y el nodo de la rejilla es 0, por lo que esa observación inmediatamente tendrá un peso de uno (1), mientras que los datos vecinos adquieren valores de cero (0), dando como resultado que el nodo de la rejilla adquiera el valor de el punto coincidente.

Los parámetros que se pueden modificar y con los que cuenta el método son los siguientes:

- **Potencia:** por defecto es igual a dos pero el usuario puede modificarla en un rango de valores comprendido entre  $1.2 \times 10^{-32}$  y  $1.0 \times 10^{38}$
- **Suavizado:** por defecto su valor es cero lo que hace el método un interpolador exacto pero puede ser modificado según la calidad que se requiera, en este proyecto se asumirá el valor por defecto.
- **Anisotropía:** es la propiedad que presentan ciertos cuerpos a que sus propiedades se dirijan hacia cierta dirección; por lo general se suele considerar este efecto cuando se manejan unidades diferentes como por ejemplo en el caso de una precipitación sobre un río en cierta zona, en el eje de las x tendremos las longitudes, en el eje de las Y los tiempos y en el eje de las z las profundidades, como puede verse son unidades distintas donde debe tenerse en cuenta la anisotropía.
- **Radio de anisotropía:** Suele calcularse como el resultado de dividir el rango máximo entre el rango mínimo, por defecto dicho valor es igual a 1 y para el caso se tomo este valor.
- **Angulo de anisotropía:** Es la dirección preferida del eje principal en grados, puede variar de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  grados; se emplea cuando no se trabaja con toda la cantidad de datos donde se busca su mejor colocación; en este caso se emplearon todos los datos de cada una de las regiones por lo que este valor se asumió como cero (0).
- **Sectores de Búsqueda:** se emplearon dos sectores de búsqueda 4 y 8 (cuadrantes y octantes) donde se observo que su influencia es muy poca tal como se observa en la Tabla 7, Esto se hizo con el fin de definir cuantos sectores se emplearan en la consecución del Interpolador y en la generación del modelo.(8).
- **Angulo:** corresponde al ángulo de búsqueda el cual varia desde cero (0) a trescientos sesenta (360) grados
- **Elipse de Búsqueda:** permite definir la vecindad o el numero de puntos a utilizar para interpolar un nodo, se compone de dos radios y ángulo de barrido (Figura 7), este parámetro no influye en la asignación de pesos a los datos (Manual usuario Surfer 2004), cuando se define que no existe anisotropía los radios de las elipses son iguales, El ángulo es la inclinación entre el eje positivo de X y el eje de la elipse asociados al radio 1. Éste puede ser

cualquier valor entre -360 y +360 grados. ( Parámetros tomados del Manual del Usuario Surfer 2004)

Figura 7 Desplazamiento de los ejes principales con respecto al radio 1 causado por la variación del ángulo.



Fuente: Manual del usuario Surfer 2004

Los resultados del RMSE obtenidos mediante el proceso de Validación cruzada para cada una de las Regiones Mediante el interpolador de la Distancia Inversa se muestran en las Tablas 5 y 6 para 4 y 8 Sectores de Búsqueda respectivamente.

Tabla 5 Valor de RMSE en cada una de las regiones de la zona de estudio a diferentes Potencias mediante Distancia Inversa para una anisotropía de 1 y 4 Sectores de Búsqueda.

RMSE EN DISTANCIA INVERSA A UNA POTENCIA PARA UNA ANISOTROPIA =1 Y 4 SECTORES DE BUSQUEDA											
POTENCIA	REG. 1	REG. 2	REG. 3	REG. 4	REG. 5	REG. 6	REG. 7	REG. 8	REG. 9	REG. 10	REG. 11
1	21.2768	24.835	27.1509	24.0093	24.4876	25.3606	15.4873	15.6439	27.1436	15.4900	18.1636
2	15.9236	18.4954	18.6268	19.7708	19.2475	19.6114	10.7867	10.1009	19.8337	11.8940	13.2914
3	12.7301	15.4647	14.0360	17.1909	16.2444	16.9768	8.2902	7.6799	16.6547	10.3911	11.0265
4	11.7852	<b>14.993</b>	12.5874	<b>16.546</b>	<b>15.593</b>	<b>16.547</b>	7.4740	<b>7.1520</b>	<b>16.290</b>	<b>10.1523</b>	10.3482
5	<b>11.775</b>	15.3775	<b>12.304</b>	16.7328	15.8729	16.8372	<b>7.3327</b>	7.1547	16.7183	10.2296	<b>10.2279</b>
6	-	15.9117	12.3596	17.1397	16.3733	17.2739	7.4021	7.2738	17.2474	10.3720	10.2834

Fuente: el Autor

**Tabla 6 Valor de RMSE en cada una de las regiones de la zona de estudio a diferentes Potencias mediante Distancia Inversa para una anisotropía de 1 y 8 Sectores de Búsqueda.**

RMSE EN DISTANCIA INVERSA A UNA POTENCIA PARA UNA ANISOTROPIA =1 Y 8 SECTORES DE BUSQUEDA											
POTENCIA	REG. 1	REG. 2	REG. 3	REG. 4	REG. 5	REG. 6	REG. 7	REG. 8	REG. 9	REG. 10	REG. 11
1	20.4580	23.8226	26.6520	22.7637	23.5801	24.6854	14.9111	15.2760	26.6544	15.0315	17.651
2	15.4902	18.1506	18.3404	19.0777	18.8367	19.2262	10.4940	9.9522	19.5775	11.7789	12.993
3	12.5840	15.3600	13.9449	16.9192	16.1130	16.8452	8.1873	7.6410	16.5725	10.3729	10.925
4	11.746	14.969	12.5651	16.452	15.560	16.510	7.4442	7.1439	16.270	10.148	10.318
5	11.7653	15.3722	12.298	16.6990	15.8648	16.8264	7.3246	7.1530	16.7126	10.2286	10.218
6	12.0188	15.9104	12.3579	17.1266	16.3712	17.2703	7.3999	7.2734	17.2455	10.3716	10.280

Fuente: el Autor

**Tabla 7 Variación del RMSE con respecto al Sector de Búsqueda Optimo (8)**

S. B	REG. 1	REG. 2	REG. 3	REG. 4	REG. 5	REG. 6	REG. 7	REG. 8	REG. 9	REG. 10	REG. 11
4	11.7755	14.9932	12.3043	16.5469	15.5935	16.547	7.3327	7.152	16.2909	10.1523	10.2278
8	11.7464	14.9691	12.2986	16.4523	15.5604	16.5101	7.32456	7.14386	16.2701	10.1489	10.2181
VARI	0.25%	0.16%	0.05%	0.57%	0.21%	0.22%	0.11%	0.11%	0.13%	0.03%	0.09%

Fuente: El Autor S.B: Sectores de Búsqueda

Se puede observar que el valor del RMSE no se afecta drásticamente por los sectores de búsqueda, sin embargo lo que se quiere es obtener un modelo de muy buena calidad, por lo que se decidió que los sectores de búsqueda a emplear corresponderán a 8.

Este método es un interpolador muy rápido. Su desventaja radica en que no extrapola valores de z más allá del rango.

El tiempo de duración del interpolador de la Distancia Inversa a una Potencia para la generación de un informe de validación se comprendió entre cinco (5) y diez (10) minutos, por lo que se puede decir que el método es muy rápido. Igual sucede con la generación de cada uno de los modelos de las regiones donde se emplea un rango de tiempo comprendido entre 10 y 20 minutos.

Con un solo algoritmo interpolador no se puede predecir un punto de comparación para la calidad de un modelo; razón por la cual se continuó con la generación de modelos a través de otros interpoladores.

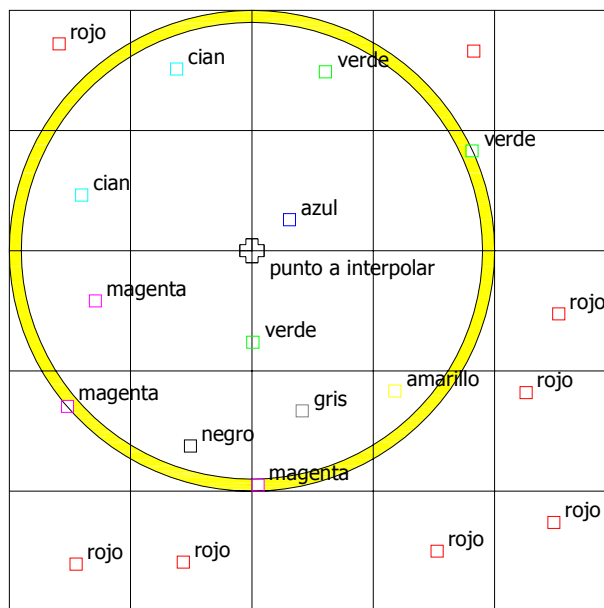
#### 4.2.2 VECINO MÁS CERCANO

Es considerado un método interpolador exacto y de fácil aplicación. Como su nombre lo indica este interpolador busca entre los datos o puntos vecinos más próximos al punto o nodo interpolado, el valor que se encuentre más próximo, lo toma y se lo asigna.

Para una mayor comprensión se plantea el siguiente ejemplo:

En la Figura 8 se puede observar un punto en forma de cruz, el cual se desea interpolar, para ello se asignó un radio de búsqueda, el cual se encuentra definido por el círculo amarillo, lo que indica que el método solo busca el valor a interpolar dentro de los puntos que se encuentran dentro del radio de búsqueda.

**Figura 8 Aplicación del Método Vecino más Cercano en la búsqueda de colores en una Imagen.**



Fuente: Web página del Geological data center y modificado por el autor

Los puntos externos inmediatamente son excluidos por el método; una vez se ha aplicado el radio de búsqueda, el método empieza a radiar distancias a partir del punto que se desea interpolar contra los puntos que se encuentran dentro del radio de búsqueda, dando como resultado final que el punto a interpolar adquiera un color azul, según se puede observar en la Figura 8 ya que el azul es el color más cercano al punto a interpolar.

Este método suele ser empleado para completar archivos densos con información faltante; teniendo especial cuidado al asignar el radio de búsqueda, ya que el mismo no genera información en aquellas zonas donde no existen datos vecinos al punto a interpolar.

En resumen el Vecino más Cercano no interpola datos, solo calcula la distancia de los puntos vecinos al punto a interpolar y asigna el valor del punto que se encuentre a menor distancia.

Los resultados obtenidos para cada una de las regiones por este método se muestran en la Tabla 8

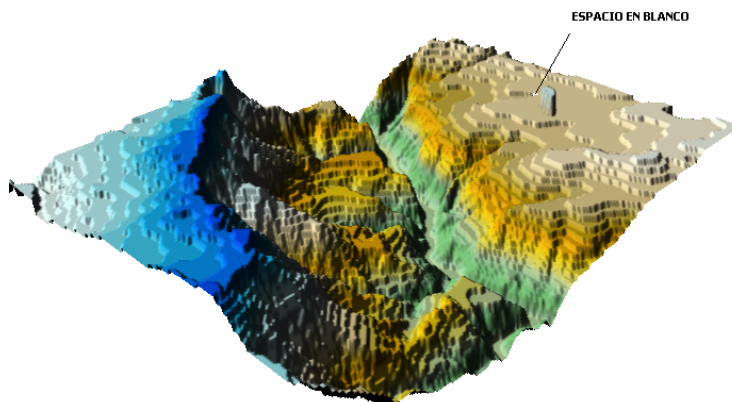
**Tabla 8 RMSE generado en cada una de las regiones mediante el Interpolador Vecino más Cercano para diferentes Radios de Elipse.**

RMSE POR EL METODO VECINO MAS CERCANO											
RADIO DE ELIPSE	REG. 1	REG. 2	REG. 3	REG. 4	REG. 5	REG. 6	REG. 7	REG. 8	REG. 9	REG. 10	REG. 11
18100	15.395	21.061	15.129	21.507	21.826	21.599	9.209	8.987	21.943	6.251	12.036
9050	15.395	21.061	15.129	21.507	21.826	21.599	9.209	8.987	21.943	6.251	12.036
905	15.395	21.061	15.129	21.507	21.826	21.599	9.209	8.987	21.943	6.251	12.036

Fuente: El Autor.

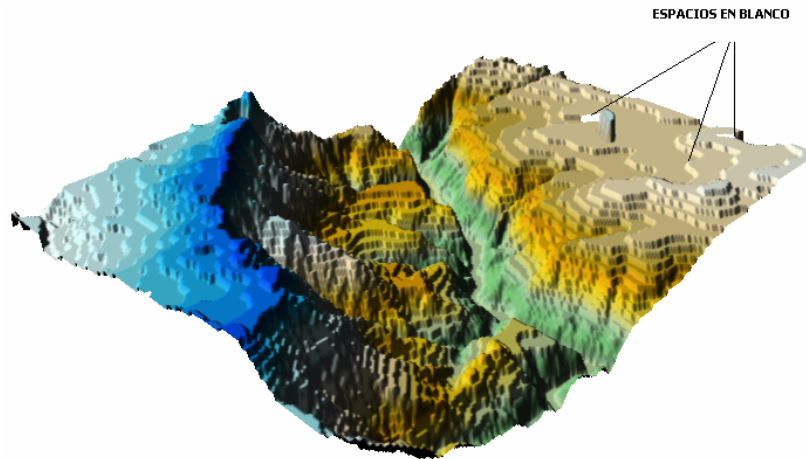
Como se puede ver en la Tabla 8 el RMSE es constante en cada una de las regiones hasta para valores de alrededor del 5% del radio de búsqueda, a partir de allí se empiezan a generar zonas blancas debidas a que los radios suministrados no se hacen suficientes para cubrir ciertas zonas, tal como se puede apreciar en la Figura 9 y la Figura 10 donde se redujeron mucho mas los valores de los radios.

**Figura 9 Aparición de espacios en blanco sobre el Modelo de la Región 1 por el método Vecino más cercano para un Radio de búsqueda de 500.**



Fuente: Surfer 8

**Figura 10 Aumento de espacios en blanco sobre el Modelo de la Región 1 por el método Vecino mas cercano generados por un radio de búsqueda de 362.**



Fuente: Surfer 8

Por lo que el valor de los radios de búsqueda generados por Surfer 8 poseen un Factor de Seguridad comprendido en un rango de 10 a 20 que hace que quien los emplee se sienta totalmente seguro y no obtenga espacios en blanco en sus resultados.

Como se puede apreciar al comparar las Tablas 6 y 8 del método de la Distancia Inversa a una Potencia vs. Vecino mas Cercano, vemos que el error en este ultimo aumento en un rango de alrededor del 20 al 25% con respecto al obtenido por la Distancia Inversa a una Potencia, esto se debe al mismo funcionamiento del método, donde como se explico anteriormente, se toma el valor o dato más cercano al punto que se desea interpolar y se asigna a este.

En cuanto a los tiempos de generación de los informes de validación así como los empleados en la generación de los modelos fueron relativamente cortos, ya que el programa internamente solo calcula distancias con respecto al punto a interpolar y asigna un valor, el intervalo de tiempo estuvo entre 10 y 15 minutos en cuanto a validaciones se refiere y entre 10 a 20 minutos en la generación de modelos.

Se puede decir que el método producirá mejores resultados (disminución del error y suavizado del relieve) si se emplean densidades mayores de datos.

No se recomienda el empleo de este método en aquellas zonas donde la topografía es muy variable y poco densa ya que se puede caer en el error de modelar algo que realmente no se asemeja mucho a la realidad, debido a que el método no incluye el parámetro de anisotropía para tener en cuenta estas variables.

### 4.2.3 VECINO NATURAL

El Método Vecino Natural se basa en la generación de una triangulación de Delanuy mediante la utilización de los puntos muestrales, donde se debe cumplir con la condición que la circunferencia circunscrita en los vértices de cada triangulo no incluya otro vértice, por lo que la red de triángulos se hará prácticamente equilátera; una vez construida la triangulación se comprueba su circunscripción, hecho esto el algoritmo selecciona todos los puntos cercanos que generan polígonos de Thiessen convexos alrededor del punto que se desea interpolar, a dichos puntos se le asignan unos factores de peso, cuya sumatoria debe ser igual a la unidad (1) y su valor deberá ser proporcional al área de cada uno de los polígonos(Manual del Usuario Surfer 2004).

Este método puede ser considerado un arma de doble filo ya que su ventaja radica en que el usuario solo necesita estar familiarizado con la variabilidad de la información, pues los únicos parámetros que emplea son la anisotropía y el ángulo de la dirección a la cual se desea emplear, pero a su vez contar con tan pocos parámetros pueden llevarlo a no considerar otras variables.

Una de las desventajas que presenta el método Vecino Natural es la no extrapolación de datos, ya que como se dijo anteriormente este algoritmo trabaja mediante la asignación de pesos de forma proporcional al área de cada uno de los polígonos de Thiessen cercanos al punto a interpolar.

Este Algoritmo adicionalmente genera un archivo dxf donde se puede apreciar la red de triángulos generada para cada una de las regiones; la cantidad de triángulos generados y el # de datos son proporcionales al tiempo, tanto en la generación del informe de validación, así como del modelo.

Los datos obtenidos al aplicar este algoritmo en cada una de las regiones se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9 RMSE Generado en cada una de las regiones mediante el Interpolador Vecino Natural.**

RMSE POR EL METODO VECINO NATURAL											
RADIO	REG. 1	REG. 2	REG. 3	REG. 4	REG. 5	REG. 6	REG. 7	REG. 8	REG. 9	REG. 10	REG. 11
18100	7.0021	10.480	9.7185	9.9402	9.4709	10.9977	4.4340	4.7069	10.9898	2.8895	6.3350

Fuente: El Autor.

De los métodos que hasta ahora se han empleado para la generación del modelo en cada una de las Regiones, Vecino Natural ha sido el que mejor se ha ajustado,

obteniéndose una reducción del RMSE en un rango del 20 al 40% y con una mejora del suavizado o relieve de cada una de las regiones de la zona donde se generara el DEM ;sin embargo se continuara generando modelos y analizando sus resultados en cada una de las Regiones y para cada uno de los otros métodos propuestos, con el fin de observar si se puede obtener un menor error y un mejor suavizado, ya que a pesar, de obtener muy buenos resultados con este algoritmo, los tiempos de validación fueron extremadamente altos (de 10 a 18 horas), por lo que al momento de generar el modelo general se estaría empleando un tiempo de alrededor de 200 horas como mínimo.

#### 4.2.4 MINIMA CURVATURA

Este método no se encuentra ubicado entre los interpoladores exactos; su funcionamiento consiste en tratar de generar una superficie de interpolación muy similar a una delgada placa lineal elástica que pase por cada uno de los puntos dato con un mínimo valor de curvatura, tratando de generar que la superficie sea lo mas lisa posible y que sus datos se mantengan lo mas aproximadamente posible a los reales (Manual del usuario Surfer 2004).

El método cuenta con seis parámetros a modificar según la necesidad y la información con la que cuente el usuario, dichos parámetros son:

- **Residuo Máximo:** Surfer calcula este valor internamente mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$\text{Residuo maximo por defecto} = 0.001(Z_{\text{max}} - Z_{\text{min}}) \quad \text{Ecuación 7;}$$

Surfer también recomienda que este valor pueda corresponder al 10% de la precisión de los datos es decir que si tenemos una precisión de la información igual a la unidad (1), el valor del residuo máximo corresponde a 0.1.

Cualquiera de las dos anteriores formas de calcular el residuo máximo es valida; Para este caso se empleo el valor obtenido por la ecuación 7.

- **Máximo de Iteraciones:** Surfer emplea por defecto un total de 100000 iteraciones, aplicando por lo tanto un factor de seguridad muy alto que permite al algoritmo ejecutarse correctamente sin que se presente una interrupción en el proceso. Cuando esto ocurre se muestra el siguiente texto en color rojo (*ERROR: No available statistics.*).

El valor máximo de iteraciones puede ser calculado como una (1) o dos (2) veces el numero total de nodos de la malla a generar; para el caso puede estar entre 2500 y 5000 iteraciones (Manual del usuario Surfer 2004)

- **Tensión Interna:** se emplea con el fin de controlar la inclinación en cada uno de los puntos internos entre mayor sea la tensión interna, menor será la inclinación. su rango esta comprendido entre 0 y 1; Surfer recomienda cuando no se tiene amplia experiencia en el manejo de este algoritmo, un valor de cero (0). Para este caso se empleo dicho valor.
- **Tensión del Contorno:** controla la inclinación de los puntos que conforman el contorno, al igual que la tensión interna, entre mayor sea la tensión menor será la inclinación; tiene el mismo rango que la tensión interna.
- **Factor de Relajación:** su fin es hacer que el algoritmo converja, su valor se calcula mediante prueba y error, por lo que Surfer recomienda un valor de uno
- **Anisotropía:** (mirar Distancia Inversa a una Potencia).

Este algoritmo a diferencia de otros si permite la extrapolación o llenado de datos faltantes; solos que se debe emplear correctamente, para tratar que el modelo generado se aproxime a la realidad.

Los resultados de RMSE obtenidos mediante este algoritmo se muestran en la Tabla 10.

**Tabla 10 Mínimo RMSE obtenido por el algoritmo Mínima Curvatura para cada una de las Regiones que conforman la zona de estudio.**

RMSE POR EL METODO MINIMA CURVATURA											
RMSE	REG. 1	REG. 2	REG. 3	REG. 4	REG. 5	REG. 6	REG. 7	REG. 8	REG. 9	REG. 10	REG. 11
	10.7173	12.5478	11.0344	14.6422	12.8326	11.9067	6.9121	5.9743	12.9777	6.2998	8.4468

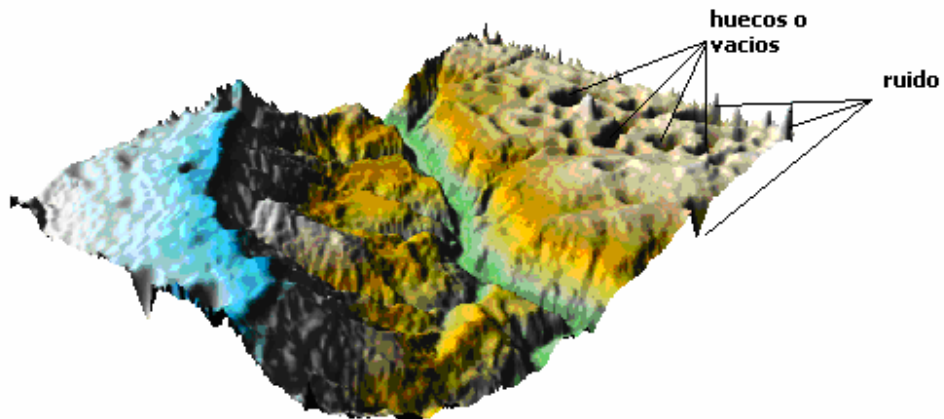
Fuente: El Autor.

El algoritmo Mínima Curvatura no es un buen método para aplicar en la topografía donde se generara el DEM como se puede apreciar al comparar la Tabla 10 con respecto a las Tablas de los otros algoritmos; se trabajo con 1000 datos para cada región debido a que el interpolador es demasiado lento, requiere de la aplicación de muchas iteraciones, en donde algunas veces se superaron las 5000. Se intento generar la validación para el total de datos de la región 1, pero después de 48 horas de ejecutado el algoritmo se observo que solo se llevaba el 45% del total de datos.

Por otro lado se genero ruido y huecos en algunas regiones como se muestran en las figuras 11 y 12; los tiempos de generación del modelo fueron relativamente

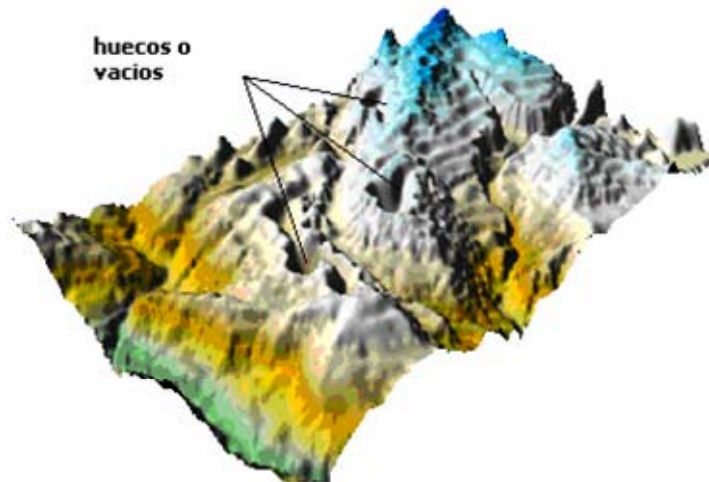
cortos alrededor de 1 a 2 minutos; mientras que para la validación de los 1000 datos para cada una de las regiones el tiempo empleado fue de 6 a 15 horas.

**Figura 11** Modelo generado por el Método Mínima Curvatura para un radio de anisotropía de 1 con un residuo máximo de 1.7 sobre la Región 1, donde se aprecia la aparición de ruido y huecos.



Fuente: Surfer 8

**Figura 12** Modelo generado por el Método Mínima Curvatura para un radio de anisotropía de 1 con un residuo máximo de 1.2 sobre la Región 11 donde se aprecia la generación de huecos.



Fuente: Surfer 8

#### 4.2.5 TRIANGULACIÓN CON INTERPOLACIÓN LINEAL

El funcionamiento de este método es muy similar al vecino natural ya que emplea Triángulos de Delanuay para generar una malla triangular, uniendo los puntos datos mediante líneas, que unidas generaran los triángulos, que deberán cumplir con la condición de Delanuay,

Es 100% un interpolador exacto, la manera de interpolar los nodos es suponiendo que dichos puntos pertenecen a la superficie plana de primer orden que se apoya en los vértices de cada triángulo, en donde cada uno de los triángulos cuentan con una inclinación y elevaciones que son aprovechadas en el momento de la interpolación.

Este algoritmo interpola rápidamente con poca cantidad de datos, pero no genera buenos resultados, por lo que lo hace un método ineficiente en aquellos archivos que contienen poca cantidad de datos. Este método genera buenos resultados a partir de 1000 datos, pero su principal problema radica en que a mayor cantidad de datos mayor tiempo de validación de los mismos por lo que en archivos grandes la validación puede durar días.

Los resultados obtenidos por este método para cada una de las regiones se muestran en la Tabla 11.

**Tabla 11 RMSE obtenido por el algoritmo Triangulación con Interpolación Lineal para cada una de las Regiones que conforman la zona de estudio.**

RMSE POR EL METODO TRIANGULACION CON INTERPOLACION LINEAL											
RADIO	REG. 1	REG. 2	REG. 3	REG. 4	REG. 5	REG. 6	REG. 7	REG. 8	REG. 9	REG. 10	REG. 11
18100	6.9250	9.3308	9.3894	9.3977	9.4709	13.3139	4.4238	4.9200	10.8590	2.8455	6.4743

Fuente: El Autor

Los resultados obtenidos por este algoritmo muestran un RMSE un poco menor que el obtenido por el algoritmo Vecino Natural en la mayoría de las regiones (alrededor del 80%), lo que lo hace el mejor interpolador aplicado en cuanto al RMSE, pero los tiempos empleados en la generación del informe de validación son mayores, lo que lo hacen que sea el posible Interpolador mas no el definitivo.

El tiempo promedio empleado en la generación del informe de validación fue de 19 horas, mientras que el tiempo de generación de los modelos es de aproximadamente una (1) hora.

#### 4.2.6 FUNCIONES RADIAL BASIC

Conocido también como el algoritmo FBR que es el resultado de unir las iniciales, FBR es un interpolador exacto que puede ser transformado en un interpolador de suavizado mediante la modificación del parámetro  $R^2$ .

Este interpolador cuenta con 5 Funciones básicas, las cuales son dependientes de la distancia entre el punto interpolado y los puntos vecinos, donde cualquiera de ellas puede ser empleada según la necesidad y la información con la que se cuente.

Las funciones básicas empleadas son:

- **MULTICUADRATICA INVERSA:**

$$F(d_i) = \frac{1}{\sqrt{d_i^2 + R^2}} \quad \text{Ecuación 8}$$

- **MULTILOGARITMICA:**

$$F(d_i) = \log(d_i^2 + R^2) \quad \text{Ecuación 9}$$

- **MULTICUADRATICA:**

$$F(d_i) = \sqrt{(d_i^2 + R^2)} \quad \text{Ecuación 10}$$

- **NATURAL CUBIC SPLINE:**

$$F(d_i) = \sqrt{(d_i^2 + R^2)^3} \quad \text{Ecuación 11}$$

- **THIN PLATE SPLINE:**

$$F(d_i) = (d_i^2 + R^2) \log(d_i^2 + R^2) \quad \text{Ecuación 12}$$

Estas funciones tienen en común la generación de superficies que pasan exactamente por los puntos muestrales, cuando el parámetro de alisado ( $R^2$ ) es cero (0). Con estas técnicas se consiguen ajustes del terreno similares en la forma a una membrana elástica que pasara por todos los puntos muestrales, minimizando la curvatura para el resto de la superficie.

La Función base que ha presentado mejores resultados según lo estudiado por otros autores y que recomienda Surfer ha sido la función multicuadratica, sin embargo como se ha venido haciendo se analizaran cada una de las funciones del FRB, y se compararan con los otros Métodos Interpoladores Surfer.

El valor de la variable  $Z_{INT}$  o dato a interpolar se formula mediante la siguiente ecuación:

$$Z_{INT} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times F(d_i) \text{ Ecuación 13}$$

Donde:

$Z_{INT}$ : Valor a interpolar

$\lambda_i$ = pesos asignados, los cuales se obtienen mediante la resolución de un sistema lineal de ecuaciones.

$F(d_i)$ = cualquiera de las Funciones Básicas Radiales mencionadas anteriormente de a cuerdo a lo que se desee obtener.

$n$  = cantidad de datos vecinos al punto a interpolar.

Los parámetros con los que cuenta el método para modificar son:

**Función Base:** permite el usuario escoger una de las cinco funciones vistas anteriormente.

- **$R^2$ :** define al Interpolador como exacto o de suavizado, un valor de  $R^2$  igual a cero lo convierte en interpolador exacto, mientras que un valor diferente a cero, lo convierte en interpolador de suavizado (Parámetros tomados del Manual del Usuario Surfer 2004).

El valor de  $R^2$  se puede estimar mediante la siguiente formula:

$$R^2 = \frac{\text{Longitud de la diagonal de los datos}}{25 \times \# \text{ de datos}} \text{ Ecuación 14}$$

Este es el valor empleado por Surfer, sin embargo no existe alguna metodología que lo condicione, en el presente proyecto se busco el  $R^2$  óptimo, es decir el que genere menor RMSE, para ello se empleo la prueba y el error.

Los resultados obtenidos por cada una de las FBR se muestran en las Tablas 12, 13, 14, 15, 16, donde se generaron una serie de RMSE para cada una de las regiones hasta encontrar un valor cercano al óptimo.

**Tabla 12 Comportamiento del RMSE mediante la modificación del parámetro R2 empleando la Función Radial Basic Inversa Multicuadratica.**

RMSE OBTENIDO POR LA FUNCION RADIAL BASIC INVERSA MULTICUADRATICA											
R <sup>2</sup>	REG. 1	REG. 2	REG. 3	REG. 4	REG. 5	REG. 6	REG. 7	REG. 8	REG. 9	REG. 10	REG. 11
0.5	24.625	27.768	31.939	25.115	29.964	28.641	18.122	19.324	32.033	14.861	21.651
1	22.690	27.197	31.202	24.633	29.608	27.938	17.725	18.918	31.392	14.444	21.134
1.5	23.429	26.879	30.666	24.283	27.562	27.433	17.440	18.620	30.923	14.139	20.759
2	21.885	26.570	30.232	23.999	27.226	27.938	17.211	18.377	30.541	13.891	20.457
2.5	22.681	26.304	29.862	23.757	26.938	26.685	17.016	18.169	30.214	13.680	20.200
5	21.439	25.316	28.508	22.870	25.875	26.213	16.308	17.403	29.012	12.907	19.265
10	19.917	24.046	26.817	21.758	24.527	23.935	15.422	16.433	27.497	11.939	18.114
<b>OPTIMO</b>	<b>7.244</b>	<b>9.052</b>	<b>9.866</b>	<b>10.582</b>	<b>10.555</b>	<b>12.148</b>	<b>5.822</b>	<b>6.180</b>	<b>12.084</b>	<b>2.916</b>	<b>7.651</b>
>OPTIMO	8.496	9.357	13.970	12.085	12.559	13.873	5.881	6.712	13.788	4.017	8.605
<b>R<sup>2</sup> OPTIMO</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>

Fuente: El Autor.

**Tabla 13 Comportamiento del RMSE mediante la modificación del parámetro R2 empleando la Función Radial Basic Multicuadratica.**

RMSE OBTENIDO POR LA FUNCION RADIAL BASIC MULTICUADRATICA											
R <sup>2</sup>	REG. 1	REG. 2	REG. 3	REG. 4	REG. 5	REG. 6	REG. 7	REG. 8	REG. 9	REG. 10	REG. 11
0.5	6.274	8.344	7.982	8.353	8.497	11.393	4.002	4.480	9.792	2.918	5.852
1	6.261	8.332	7.953	8.344	8.487	11.385	3.993	4.467	9.779	2.897	5.839
1.5	6.250	8.322	7.932	8.338	8.479	11.380	3.986	4.457	9.769	2.881	5.829
2	6.242	8.315	7.914	8.333	8.472	11.375	3.981	4.448	9.760	2.868	5.821
2.5	6.234	8.308	7.898	8.328	8.466	11.372	3.976	4.441	9.753	2.856	5.814
5	6.206	8.282	7.837	8.311	8.443	11.357	3.956	4.412	9.725	2.811	5.785
10	6.169	8.246	7.753	8.289	8.413	11.340	3.930	4.372	9.687	2.746	5.747
<b>OPTIMO</b>	<b>6.042</b>	<b>7.986</b>	<b>6.544</b>	<b>8.192</b>	<b>8.278</b>	<b>11.293</b>	<b>3.600</b>	<b>3.598</b>	<b>9.341</b>	<b>1.632</b>	<b>5.216</b>
>OPTIMO	6.155	8.018	6.718	8.385	8.558	11.442	3.665	3.651	9.455	1.787	5.223
<b>R<sup>2</sup> OPTIMO</b>	<b>330</b>	<b>500</b>	<b>330</b>	<b>250</b>	<b>480</b>	<b>100</b>	<b>970</b>	<b>1000</b>	<b>570</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>

Fuente: El Autor.

**Tabla 14 Comportamiento del RMSE mediante la modificación del parámetro R2 empleando la Función Radial Basic Multilogaritmica.**

RMSE OBTENIDO POR LA FUNCION RADIAL BASIC MULTILOGARITMICA											
R <sup>2</sup>	REG. 1	REG. 2	REG. 3	REG. 4	REG. 5	REG. 6	REG. 7	REG. 8	REG. 9	REG. 10	REG. 11
0.5	11.302	14.092	16.001	13.594	14.073	15.382	8.464	9.080	16.148	6.891	10.664
1	10.890	13.665	15.453	13.211	13.658	14.995	8.158	8.776	15.674	6.590	10.340
1.5	10.637	8.327	15.115	12.977	13.404	14.761	7.970	8.590	15.384	6.406	10.141
2	10.452	13.214	14.866	12.806	13.218	14.591	7.833	8.453	15.172	6.269	9.994
2.5	10.305	13.064	14.670	12.671	13.070	14.458	7.725	8.344	15.004	6.160	9.878
5	9.832	12.577	14.021	12.235	12.593	14.033	7.370	7.990	14.461	5.801	9.500
10	9.328	12.060	13.318	11.774	12.086	13.594	6.990	7.606	13.886	5.411	9.094
<b>OPTIMO</b>	<b>6.416</b>	<b>8.366</b>	<b>7.270</b>	<b>8.779</b>	<b>8.627</b>	<b>11.485</b>	<b>4.031</b>	<b>4.269</b>	<b>9.730</b>	<b>1.995</b>	<b>5.771</b>
>OPTIMO	6.423	8.732	8.195	8.947	8.906	11.619	4.424	4.456	10.092	2.460	6.097
<b>R<sup>2</sup> OPTIMO</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>

Fuente: El Autor.

**Tabla 15 Comportamiento del RMSE mediante la modificación del parámetro R2 empleando la Función Radial Basic Spline Cúbica Natural.**

RMSE OBTENIDO POR LA FUNCION RADIAL BASIC SPLINE CUBICA NATURAL											
R <sup>2</sup>	REG. 1	REG. 2	REG. 3	REG. 4	REG. 5	REG. 6	REG. 7	REG. 8	REG. 9	REG. 10	REG. 11
<b>0</b>	<b>6.1518</b>	<b>8.3194</b>	<b>6.1242</b>	<b>8.8508</b>	<b>8.7437</b>	<b>12.6180</b>	<b>3.5507</b>	<b>3.4820</b>	<b>9.9813</b>	<b>1.5845</b>	<b>5.3521</b>
0.1	6.1532	8.3201	6.1244	8.8513	8.7443	12.6184	3.5508	3.4820	9.9938	1.5844	5.3523
5	6.1884	8.3415	6.1288	8.8703	8.7644	12.6357	3.5553	3.4827	9.9938	1.5832	5.3583
10	6.2134	8.3580	6.1330	8.8874	8.7810	12.6514	3.5592	3.4834	10.0048	1.5877	5.3640
100	6.4834	8.5457	6.1908	9.1214	8.9816	12.8623	3.6136	3.4952	10.1545	1.5695	5.4467
<b>X DEF</b>	6.9415	9.2107	6.3183	10.0619	9.5648	13.2764	3.7925	3.5520	10.7179	1.5773	5.8220
1000	7.9534	9.6325	6.7090	10.7758	10.2435	14.1261	3.9955	3.5945	11.1646	1.5819	6.0807
<b>R<sup>2</sup> X DEF</b>	330	610	330	590	590	350	970	780	570	380	620
<b>R<sup>2</sup> OPTIMO</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Fuente: El Autor.

**Tabla 16 Comportamiento del RMSE mediante la modificación del parámetro R2 empleando la Función Radial Basic Thin plate Spline**

RMSE OBTENIDO POR LA FUNCION RADIAL BASIC THIN PLATE SPLINE											
R <sup>2</sup>	REG. 1	REG. 2	REG. 3	REG. 4	REG. 5	REG. 6	REG. 7	REG. 8	REG. 9	REG. 10	REG. 11
<b>0</b>	<b>5.732</b>	<b>7.760</b>	6.297	<b>8.048</b>	<b>8.062</b>	<b>11.548</b>	<b>3.461</b>	<b>3.581</b>	<b>9.274</b>	1.867	5.095
0.1	5.734	7.761	6.296	8.049	8.063	11.548	3.461	3.581	9.274	1.867	5.095
5	5.763	7.776	6.284	8.064	8.081	11.563	3.461	3.575	9.280	1.849	5.095
10	5.779	7.786	6.275	8.076	8.094	11.576	3.461	3.570	9.286	1.836	5.094
100	5.954	7.897	6.195	8.233	8.232	11.743	3.471	3.527	9.358	1.715	5.104
<b>X DEFECTO</b>	6.292	8.365	<b>6.148</b>	8.915	8.654	12.109	3.667	3.468	9.709	<b>1.594</b>	5.264
<b>R<sup>2</sup> X DEFECTO</b>	330	610	330	590	480	350	970	780	570	380	620
<b>R<sup>2</sup> OPTIMO</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>330</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>380</b>	<b>0</b>

Fuente: El Autor.

Exceptuando la FBR Inversa Multicuadratica; las FBR empleadas por Surfer en la generación de modelos presentan un buen comportamiento en cuanto al RMSE se refiere ya que los resultados que se obtuvieron son mucho mas óptimos (< RMSE) que otros interpoladores Surfer.

Tanto la Función Spline Cúbica Natural, así como la Thin Plate Spline se comportan en la gran mayoría de las regiones como Interpoladores exactos, lo que les da un punto a favor en la consecución del DEM, ya que como se menciona al inicio del capítulo, un interpolador exacto es aquel que cuando el punto a interpolar coincide con el punto muestral adquiere el mismo valor sin necesidad de ser modificado mediante la asignación de pesos; los tiempos de generación de los informes de validación de las regiones que conforman el DEM no superan las 2 horas lo que les da una gran ventaja con respecto al Interpolador Triangulación con Interpolación Lineal, el cual se presentaba como el posible interpolador a emplear para el DEM.

Los tiempos de generación del modelo, son relativamente altos con respecto a los otros interpoladores, los cuales se encuentran entre un rango de 30 y 75 minutos; pero aceptables a la hora de generar el DEM definitivo.

#### **4.2.7 KRIGING**

Muy utilizado tanto en la generación de DEM como en otros campos. El kriging es un método de interpolación exacto, que pondera el peso de cada punto muestral  $X_i$  en el valor interpolado en un punto no muestral  $X_o$  según una función estocástica de la distancia entre dichos puntos.

Kriging se hace un interpolador fuerte frente a otros interpoladores por las siguientes características (López y Osorio, 2005):

1. Kriging no solo emplea la distancia del punto a interpolar a los puntos vecinos para calcular el peso de cada dato muestral y así obtener el dato interpolado, sino que además considera la geometría donde se encuentran ubicados los puntos muestrales.
2. Minimiza la varianza en el error esperado. (RMSE)
3. por ser un método geoestadístico se puede adicionar información secundaria que esta relacionada con la variable principal.

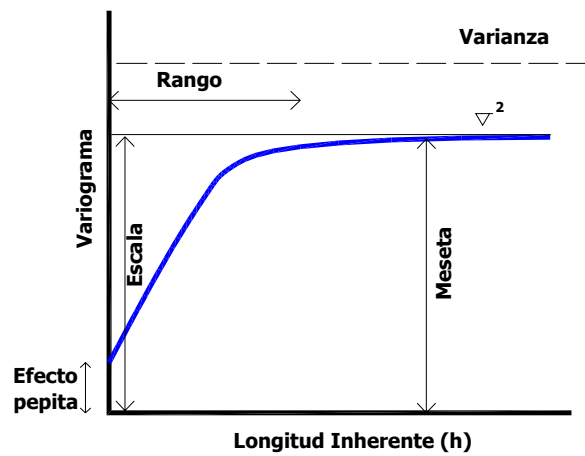
La consecución de buenos resultados mediante Kriging parte de la elección del variograma óptimo, si esto no se lleva a cabo cuidadosamente, los resultados no serán los esperados. Un buen variograma solo se puede obtener si se manejan una gran serie de conceptos estadísticos avanzados además de una serie de herramientas y trucos, por lo que modelar un variograma es una tarea complicada. Es por esta razón que Surfer permite emplear al usuario que no domina dichos parámetros el Variograma lineal, con el cual generalmente se obtienen buenos resultados

#### **Que es un Variograma?**

Un variograma sencillamente es la representación de cómo cambian los datos con respecto a la media.

Matemáticamente el modelo del variograma representa la variabilidad del conjunto de datos con respecto a la variable regionalizada. Los pesos de la interpolación, que se aplican a los puntos muestrales durante los cálculos del nodo de la rejilla, son funciones directas del modelo del variograma.

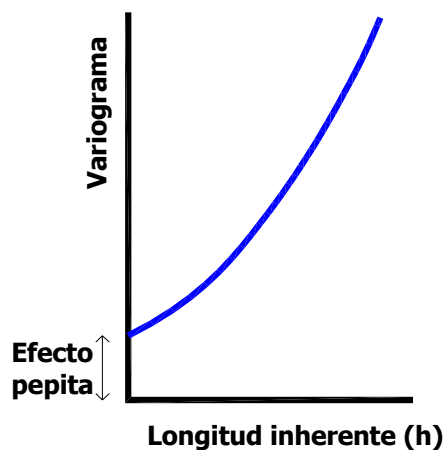
Figura 13 Componentes generales de un Variograma.



Fuente: El Autor.

El Variograma es una función monótona creciente que alcanza cierto valor límite, y que corresponde normalmente a la varianza muestral, a este límite se le conoce como meseta (Figura 13), La meseta se alcanza para un valor determinado de  $h$  al que se le llama el rango o alcance y que determina la zona de influencia en torno a un punto, más allá de este punto la auto correlación es nula; pero no todos los variogramas alcanzan una meseta. Es posible que un variograma no tienda asintóticamente a la varianza, sino que tienda a infinito cuando así lo haga  $h$ , tal como se puede apreciar en la Figura 14.

Figura 14 Grafico de un Variograma ascendente



Fuente: El Autor.

El semivariograma o simplemente variograma, a partir de los datos disponibles, se estima como:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \text{ Ecuación 14}$$

Kriging se basa en el empleo de dos variogramas llamados Variograma Experimental y Variograma Teórico, esto con el fin de comprobar la calidad de los mismos ya que con el Variograma Experimental no se tiene un acceso a la función matemática precisa.

La seguridad de que lo que se está haciendo está bien se logra cuando el variograma teórico se ajusta lo mejor posible al experimental.

Surfer cuenta con una serie de modelos de Variogramas donde los más representativos corresponden a:

- Esférico
- Exponencial
- Gaussiano
- Potencial
- Lineal
- Efecto pepita puro

Los parámetros que se pueden modificar en la ejecución del método Kriging son:

**EFFECTO PEPITA (NUGGET):** dicho parámetro resulta de sumar la varianza y la microvarianza; cuando se adiciona este parámetro con un valor diferente de cero (0), Kriging se convierte en un interpolador de alisado, un valor demasiado alto hará que el modelo generado sea totalmente liso.

Para este proyecto se adiciona este parámetro con un valor de cero, lo cual permite que el método asigne el valor original de Z cuando las coordenadas (x, y) del valor muestral coincidan con las del valor interpolado.

**RANGO:** Es la distancia para la cual los datos muestrales dejan de estar correlacionados, por lo que en distancias mayores al rango los datos se vuelven independientes.

Este parámetro se puede observar en aquellos Variogramas Experimentales, donde se genera la meseta, tal como se puede ver en la Figura 13.

**MESETA (SILL):** Es el valor para el cual la varianza, representada en el variograma, permanece constante. Dicho valor se obtiene directamente del variograma Experimental mediante un análisis visual.

**ANISOTROPIA:** este parámetro ya fue explicado en el Método de la Distancia Inversa y para cuestiones de comparación con los demás métodos seguirá siendo igual a uno (1).

**DIRECCIÓN:** Permite al usuario controlar la dirección desde la cual se ve el variograma. La *dirección* especifica la dirección focal, la cual va de 0° a 90°, en donde 0° es a lo largo del eje x Positivo y 90° a lo largo del eje Y positivo (Parámetros tomados del Manual del Usuario Surfer 2004)

El Variograma por el que se optó en el presente proyecto fue el lineal, escogido por razones de manejo y confiabilidad. La máxima distancia que se empleará en la construcción de los variogramas para cada una de las regiones corresponde a 1000 y se modificarán la dirección en valores de 0°, 45°, 90°, 135° y 180°.

### **ANÁLISIS DE VARIOGRAMAS EXPERIMENTALES:**

Al observar los Variogramas que se generaron para cada una de las regiones se puede observar que la tendencia de los mismos es 100% lineal, en donde el valor correspondiente a la pendiente de cada uno de estos para cada una de las regiones se muestra en la Tabla 17.

**Tabla 17 Pendiente Promedio y generada para cada Región a través del Variograma Lineal.**

<b>REGION</b>	<b>PENDIENTE (m)</b>
<b>REGION 1</b>	26,1
<b>REGION 2</b>	7.62
<b>REGION 3</b>	18,9
<b>REGION 4</b>	25,4
<b>REGION 5</b>	29
<b>REGION 6</b>	29,7
<b>REGION 7</b>	6,8
<b>REGION 8</b>	5,52
<b>REGION 9</b>	21,6
<b>REGION 10</b>	12,2
<b>REGION 11</b>	8,01
<b>PENDIENTE PROMEDIO</b>	<b>17.35</b>

Fuente: El Autor.

El valor correspondiente del RMSE calculado para cada una de las Regiones, mediante el Uso del Método Interpolador Kriging adicionando su respectivo variograma lineal se muestra en la Tabla 18.

**Tabla 18 RMSE Generado por el Método Kriging.**

RMSE POR EL METODO KRIGING MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UN VARIOGRAMA LINEAL										
REG. 1	REG. 2	REG. 3	REG. 4	REG. 5	REG. 6	REG. 7	REG. 8	REG. 9	REG. 10	REG. 11
6.3084	8.3760	8.0520	8.3698	8.5262	11.4140	4.0251	4.5149	9.8257	2.9741	5.8848

Fuente: El Autor.

Los resultados por Kriging son muy buenos pero no superiores a los obtenidos con las FBR Thin Plate Spline y Multicuadratica; en cuanto a la generación de los informes de Validación Cruzada y los modelos son similares a los de las FBR con tiempos de 60 a 70 minutos para la validación y entre 65 y 75 minutos, para la generación del modelo.

#### 4.3 COMPARACIÓN DEL MINIMO RMSE GENERADO POR CADA UNO DE LOS METODOS INTERPOLADORES PARA LA CREACIÓN DEL DEM

Una vez se generaron todas las regiones por cada uno de los métodos interpoladores de Surfer, el siguiente paso fue comparar el error (RMSE) mínimo que se obtuvo para cada uno de ellos en cada una de las regiones y observar cual de estos era el mas optimo (menor RMSE), menores tiempos de generación del modelo y la mejor calidad del suavizado del relieve, con el fin de elegir o seleccionar el método interpolador definitivo a ser utilizado en la generación del DEM de la mesa de Barichara.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

**Tabla 19 Mínimo RMSE presentado en cada uno de los métodos surfer empleados para la generación del DEM de la Mesa de Barichara.**

METODO INTERPOLADOR Y MINIMO RMSE						
REGION	DISTANCIA INVERSA A UNA POTENCIA	VECINO MAS CERCANO	VECINO NATURAL	MINIMA CURVATURA	TRIANGULACION CON INTERPOLACION LINEAL	KRIGING LINEAL
REGION 1	11.7464	15.3953	7.0021	10.7173	6.9250	6.3084
REGION 2	14.9691	15.1294	10.4806	12.5478	9.3308	8.3760
REGION 3	12.2986	21.5077	9.7185	11.0345	9.3894	8.0520
REGION 4	16.4523	21.8265	9.9402	14.6422	9.3977	8.3698
REGION 5	15.5604	21.5993	9.4709	12.8326	9.4709	8.5262
REGION 6	16.5101	<b>9.2097</b>	10.9977	11.9067	13.3139	11.4140
REGION 7	7.3246	8.9873	4.4340	6.9121	4.4238	4.0251
REGION 8	7.1439	21.9433	4.7069	5.9743	4.9200	4.5149
REGION 9	16.2701	<b>6.2514</b>	10.9898	12.9777	10.8590	9.8257
REGION 10	10.1489	12.0367	2.8895	6.2998	2.8455	2.9741
REGION 11	10.2182	21.0616	6.3350	8.4468	6.4743	5.8848

Fuente: El Autor.

Tabla 20 Mínimo RMSE presentado en cada uno de los métodos surfer de la Función Radial Basic empleados para la generación del DEM de la Mesa de Barichara.

METODO INTERPOLADOR Y MINIMO RMSE					
REGION	FUNCION RADIAL BASIC				
	INVERSA MULTICUADRATICA	MULTILOGARITMICA	MULTICUADRATICA	SPLINE CUBICA NATURAL	THIN PLATE SPLINE
REGION 1	7.2446	6.4161	6.0422	6.1518	<b>5.7325</b>
REGION 2	9.0527	8.3664	7.9869	8.3194	<b>7.7599</b>
REGION 3	9.8665	7.2701	6.5448	<b>6.1242</b>	6.1485
REGION 4	10.5829	8.7792	8.1926	8.8508	<b>8.0479</b>
REGION 5	10.5555	8.6272	8.2788	8.7437	<b>8.0618</b>
REGION 6	12.1489	11.4856	11.2930	12.6180	11.5476
REGION 7	5.8221	4.0313	3.6009	3.5507	<b>3.4606</b>
REGION 8	6.1809	4.2695	3.5989	<b>3.4820</b>	3.5807
REGION 9	12.0846	9.7301	9.3413	9.9813	9.2735
REGION 10	2.9160	1.9958	1.6321	<b>1.5845</b>	1.8672
REGION 11	7.6510	5.7719	5.2169	5.3521	<b>5.0944</b>

Fuente: El Autor.

Tabla 21 Variación del RMSE para cada una de las regiones y métodos Surfer con respecto al RMSE mínimo.

VARIACION DEL RMSE CON RESPECTO AL RMSE OPTIMO						
REGION	DISTANCIA INVERSA A UNA POTENCIA	VECINO MAS CERCANO	VECINO NATURAL	MINIMA CURVATURA	TRIANGULACION CON INTERPOLACION LINEAL	KRIGING LINEAL
REGION 1	104.91%	168.56%	22.15%	86.96%	20.80%	10.05%
REGION 2	92.90%	94.97%	35.06%	61.70%	20.24%	7.94%
REGION 3	100.82%	251.19%	58.69%	80.18%	53.31%	31.48%
REGION 4	104.43%	171.21%	23.51%	81.94%	16.77%	4.00%
REGION 5	93.01%	167.92%	17.48%	59.18%	17.48%	5.76%
REGION 6	79.27%	0.00%	19.41%	29.28%	44.56%	23.93%
REGION 7	111.65%	159.70%	28.13%	99.74%	27.83%	16.31%
REGION 8	105.16%	530.19%	35.18%	71.58%	41.30%	29.66%
REGION 9	160.26%	0.00%	75.80%	107.59%	73.70%	57.17%
REGION 10	540.53%	659.67%	82.37%	297.60%	79.59%	87.70%
REGION 11	100.58%	313.43%	24.35%	65.81%	27.09%	15.52%

Fuente: El Autor.

**Tabla 22 Variación del RMSE para cada una de las regiones para cada una de las funciones del interpolador Radial Basic con respecto al RMSE mínimo.**

<b>VARIACION DEL RMSE CON RESPECTO AL RMSE OPTIMO</b>					
<b>REGION</b>	<b>FUNCION RADIAL BASIC</b>				
	<b>INVERSA MULTICUADRATICA</b>	<b>MULTILOGARITMICA</b>	<b>MULTICUADRATICA</b>	<b>SPLINE CUBICA NATURAL</b>	<b>THIN PLATE SPLINE</b>
<b>REGION 1</b>	26.38%	11.93%	5.40%	7.31%	0.00%
<b>REGION 2</b>	16.66%	7.82%	2.93%	7.21%	0.00%
<b>REGION 3</b>	61.11%	18.71%	6.87%	0.00%	0.40%
<b>REGION 4</b>	31.50%	9.09%	1.80%	9.98%	0.00%
<b>REGION 5</b>	30.93%	7.01%	2.69%	8.46%	0.00%
<b>REGION 6</b>	31.91%	24.71%	22.62%	37.01%	25.39%
<b>REGION 7</b>	68.24%	16.49%	4.05%	2.60%	0.00%
<b>REGION 8</b>	77.51%	22.61%	3.36%	0.00%	2.83%
<b>REGION 9</b>	93.31%	55.65%	49.43%	59.66%	48.34%
<b>REGION 10</b>	84.03%	25.96%	3.01%	0.00%	17.84%
<b>REGION 11</b>	50.18%	13.30%	2.40%	5.06%	0.00%

Fuente: El Autor.

Como se puede apreciar en la Tabla 19 y la Tabla 20 los menores RMSE se presentan en el interpolador Función Radial Basic para las funciones Thin Plate Spline con 6 de las 11 regiones, seguido por la Función Spline Cúbica Natural con 3 y por ultimo en el interpolador Vecino mas Cercano con 2.

Si se observa la variación del RMSE con respecto al mínimo RMSE se puede decir que los mejores resultados se presentaron con la FRB Thin Plate Spline, la calidad del suavizado por este método es muy buena y similar a la que se obtuvo por Kriging, pero los errores en este último son un poco mas variables.

Solo queda por observar el comportamiento de los tiempos, tanto en la generación de los informes de validación, así como también en la generación de los modelos, para así poder seleccionar con total seguridad el interpolador a emplear en la generación del DEM de la Mesa de Barichara.

#### **4.4 TIEMPOS MAXIMOS DE GENERACIÓN DE MODELOS E INFORMES DE VALIDACIÓN**

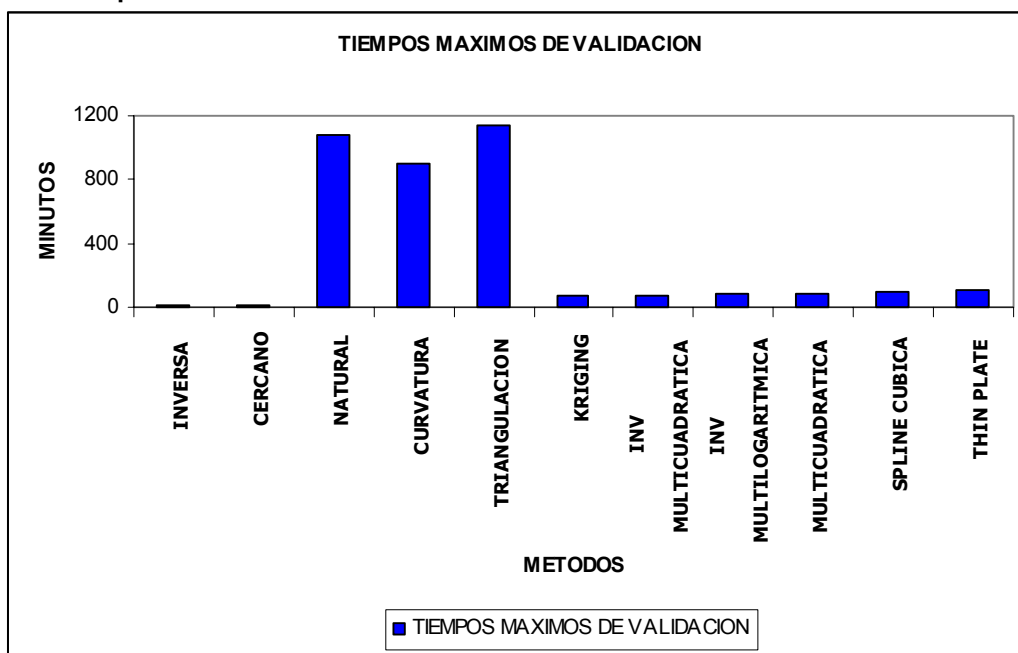
Los tiempos máximos en la generación de los informes de Validación y los modelos de cada una de las regiones para los interpoladores Surfer empleados se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23 Tiempos máximos de validación y generación de modelos para cada uno de los Métodos Interpoladores.

METODO INTERPOLADOR	TIEMPO MAXIMO VALIDACION (minutos)	TIEMPO MAXIMO GENERACIÓN DEL MODELO (minutos)
DISTANCIA INVERSA A UNA POTENCIA	10	20
VECINO MAS CERCANO	15	20
VECINO NATURAL	1080	20
MINIMA CURVATURA	900	5
TRIANGULACION CON INTERPOLACION	1140	60
KRIGING LINEAL	70	75
INVERSA MULTICUADRATICA	75	30
INVERSA MULTILOGARITMICA	90	35
MULTICUADRATICA	85	35
SPLINE CUBICA NATURAL	95	50
THIN PLATE SPLINE	105	75

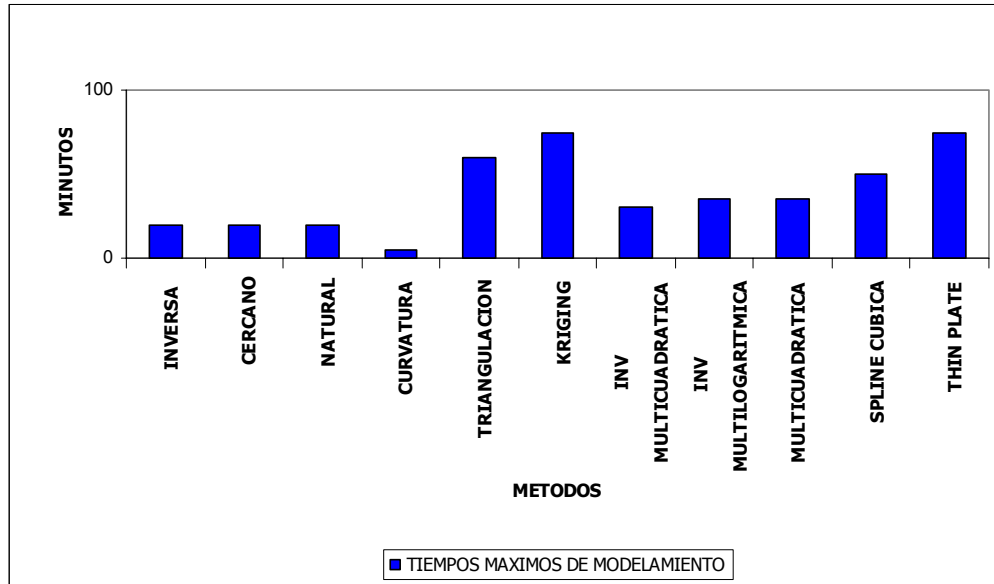
Fuente: El Autor.

Figura 15 Comparación de los máximos tiempos de validación para cada uno de los Métodos Interpoladores.



Fuente: El Autor.

**Figura 16 Comparación de los máximos tiempos de generación de modelos para cada uno de los Métodos Interpoladores.**



Fuente: El Autor.

En cuanto a los tiempos de Validación y generación de los modelos, se puede observar (Figura 15 y 16) que la FBR Thin Plate Spline que hasta ahora es la que mejores resultados ha presentado posee unos tiempos aceptables en cuanto a la generación de informes, mientras que en la generación del modelo presenta los mayores tiempos junto con el interpolador Kriging, sin embargo este tiempo se hace aceptable para la consecución del DEM de la Mesa de Barichara.

Por todo lo anterior se observo que el método a emplear para generar del DEM de la Mesa de Barichara es la FBR Thin Plate Spline.

Sin embargo esto no termina aquí, el método cuenta con una serie de parámetros que se hacen necesarios modificar para la consecución de mejores resultados que nos muestren un modelo más acorde a la realidad.

## 5 MODIFICACIÓN DE PARAMETROS DEL INTERPOLADOR SELECCIONADO PARA LA CONSECUCCIÓN DEL MODELO ÓPTIMO DE LA MESA DE BARICHARA

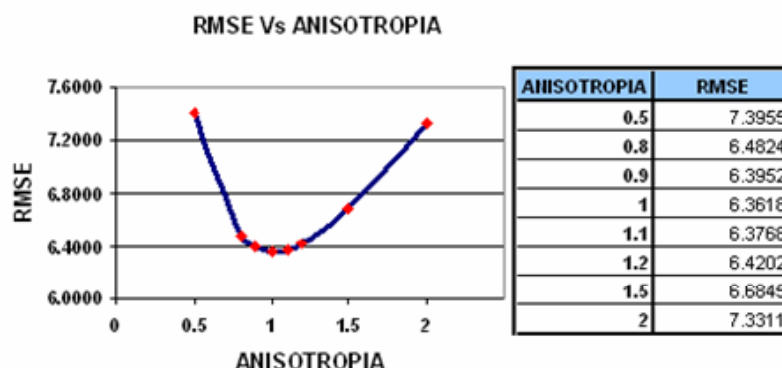
Después de un largo proceso mediante el cual se determino a la FBR Thin Plate Spline como el interpolador definitivo para generar el Modelo de la Mesa de Barichara, se procedió a modificar los parámetros con los que cuenta que son  $R^2$ , y la anisotropía. Los cuales fueron explicados en el Capítulo 4.

Se analizó la variación del RMSE con respecto a la anisotropía para el total de datos que conforman las once regiones, las Validaciones Cruzadas que se realizaron inicialmente fueron para anisotropías de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0, donde los mejores resultados se presentaron alrededor de una anisotropía de 1 por lo que se hizo necesario analizar dos puntos a la izquierda y dos puntos a la derecha para observar mejor el comportamiento del RMSE.

No se modifico el parámetro correspondiente a la dirección de la anisotropía ya que este proceso se llevara a cabo con toda la cantidad de datos, al variar dicho parámetro se obtendrá por lo tanto el mismo RMSE.

Los resultados obtenidos y el comportamiento del RMSE se muestran en la Figura 17; el menor RMSE para el total de datos que conforman la Zona de Estudio de la Mesa de Barichara se obtuvo para una anisotropía de uno (1) que fue la que se empleo como punto de comparación entre todos los métodos Surfer que contaban con este parámetro, por lo que esto confirma aun mas que el método seleccionado generara el mejor modelo.

Figura 17 Cálculo de la Anisotropía óptima para la generación del modelo correspondiente a la Mesa de Barichara para la FBR Thin Spline Cúbica.



Fuente: El Autor.

## 5.1 VALIDACIÓN DEL DEM PARA LA MESA DE BARICHARA

Los parámetros definitivos que se emplearan para el Interpolador FBR Thin Plate Spline para la generación del DEM de la Mesa de Barichara son:

**Tabla 24 Parámetros empleados en la Generación del DEM de la Mesa de Barichara a través de la FBR Thin Plate Spline.**

Parámetro	Valor
Radio de Anisotropía	1
Dirección Anisotropía	0
R <sup>2</sup>	0
Celda	100 x 100 m
Coordenadas en X	1'075.000 - 1'120.000
Coordenadas en Y	1'210000 - 1250000
Elevaciones	300 -3200
Total Datos Muestrales	285848

Fuente: El Autor.

El proceso de Validación del DEM de la Mesa de Barichara consistió en comparar Elevaciones del modelo vs. Elevaciones Reales, esto con el fin de encontrar el Valor Residual o error Residual obtenido para el modelo. Lo anterior se puede comprender mejor con la siguiente ecuación:

$$Z_{RESIDUAL} = Z_{GRID} - Z_{GPS} \quad \text{Ecuación 15}$$

Z<sub>residual</sub>: Diferencia de elevación entre el DEM y los puntos de GPS.

Z<sub>grid</sub>: Valor de elevación en el DEM para una ubicación espacial determinada.

Z<sub>gps</sub>: Es la elevación obtenida con equipo GPS.

Los puntos reales (X, Y, Z) se tomaron con ayuda de un GPS marca Trimble, la precisión del mismo es de aproximadamente 3 m en altura y fue suministrado por el Grupo de Investigación Geomatica Adscrito a la Universidad Industrial de Santander y dirigido por el Ingeniero Civil Hernán Porras Díaz.

Para ello se realizó un viaje a la zona, donde se tomaron puntos de referencia de los Municipios de San Gil, Barichara, Guane, Villanueva, Jordán sube, Aratocha, Cabrera y las minas Almirante Colon y el Carrancho.

Los puntos tomados con el GPS son puntos de Referencia de los municipios, tales como los parques, las iglesias, alcaldías, escuelas, estaciones de policía, puentes y algunos deltas geológicos, los cuales se muestran en el anexo C.

## 5.2 CALCULO DEL Z<sub>RESIDUAL</sub>

Para conseguir el Z<sub>Residual</sub> presentado por cada uno de los datos espaciales, se hizo necesario aplicar el programa SPELL.

Para ello guardamos el modelo de la Mesa de Barichara con una extensión GS ASCII (\*.grd), este archivo posteriormente se abrió en SPELL, donde se genero el mapa modelo, donde se hicieron una serie de operaciones como lo son la limpieza de Pits, la ubicación de los puntos a una misma altura, la substracción del mapa original y finalmente la búsqueda de los Z<sub>Residuales</sub> para cada Punto GPS.

El valor de los Z<sub>Residuales</sub> se muestra en la Tabla 25, donde el Z<sub>Residual</sub> Promedio obtenido para el Modelo mediante la FBR Thin Spline Cúbica es de 18.06782 m un error aceptable, ya que el máximo permitido corresponde a la mitad del menor tamaño de la celda que para el caso corresponde a 25m.

A través de Surfer se hizo una segunda validacion cuyos resultados se muestran en la tabla 26, donde el error de elevación es de aproximadamente 7 m; se opto por asumir como el error de validacion del modelo el generado por Surfer.

**Tabla 25 Valor del Z<sub>Residual</sub> para cada uno de los Puntos tomados con el GPS Trimble.**

PUNTO	Z <sub>Residual</sub>	PUNTO	Z <sub>Residual</sub>	PUNTO	Z <sub>Residual</sub>	PUNTO	Z <sub>Residual</sub>
1	-96.397	24	13.0924246	47	-0.47845125	70	46.8524503
2	-91.7117	25	-39.6606332	48	-20.7714209	71	22.6585695
3	-46.104	26	-23.8891036	49	13.6222592	72	25.0759616
4	15.9413	27	-8.76637081	50	22.5151372	73	-2.55403571
5	8.009442	28	-27.0567937	51	-4.45590227	74	-10.4280372
6	18.1752846	29	7.05773925	52	-1.42246331	75	32.6005424
7	44.515097	30	-29.244817	53	-13.2023523	76	-8.24624044
8	11.95129	31	37.5850772	54	11.7805338	77	8.65534107
9	-67.7095	32	78.324082	55	9.90729598	78	-19.4433733
10	15.170577	33	24.43468	56	2.22752796	79	-17.4244871
11	32.432212	34	31.0664273	57	7.49457013	80	-18.5923371
12	3.1285126	35	58.5594562	58	0.00282491	81	-14.652516
13	1.30724521	36	-27.2409655	59	-15.5915396	82	-14.7272885
14	17.737466	37	-5.15508024	60	-10.8360756	83	-19.1143161
15	-23.4469	38	1.18664144	61	-1.16767782	84	-16.3049678
16	-23.783838	39	-20.8354718	62	38.3379833	85	-8.66466393
17	-23.04663	40	-15.4280433	63	-6.97458474	86	8.46165293
18	1.95469647	41	2.98608117	64	-4.01281216	87	-13.9679355
19	-3.263178	42	24.0063692	65	-6.09094986	88	-8.1677946
20	-4.79674256	43	2.9092652	66	-10.1584334	89	-14.4144379
21	14.6750693	44	2.79024112	67	-3.77030882	90	-11.4230873
22	1.8674425	45	0.41373399	68	11.0574153	91	-8.99233016
23	26.5216499	46	4.24694009	69	-5.66043253	92	-9.69471727
<b>Z<sub>Residual</sub> PROMEDIO</b>		<b>18.06782</b>					

Fuente: El Autor.

Tabla 26 Validacion del Modelo Generado a través de Surfer 8

STATISTIC	Column D
Number of values	93
Sum	620.2524235
Minimum	-30.49151059
Maximum	67.21886921
Range	97.7103798
Mean (RMSE)	6.669380897
Standard deviation	21.37217271

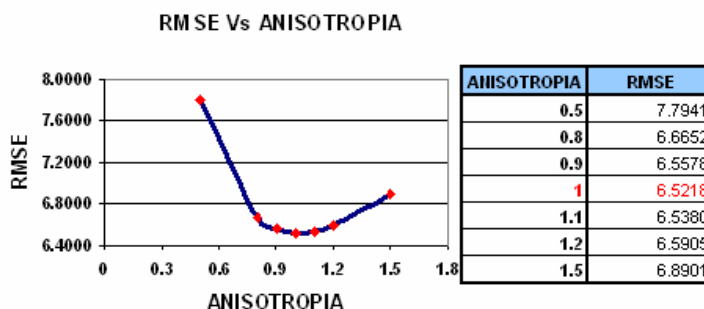
Fuente: El Autor.

### 5.3 COMPARACION DEL $Z_{Residual}$ PARA EL METODO DE INTERPOLACION SELECCIONADO EN LA GENERACIÓN DEL DEM VS OTRO METODO INTERPOLADOR

Como ya se menciona el método seleccionado para la generación del DEM de la Mesa de Barichara es la FBR Thin Spline Cúbica, el cual será comparado contra el segundo mejor método que como se puede apreciar por los resultados mostrados en las Tablas 19 y 20 es la FBR Multicuadratica.

Para comparar el modelo de la Mesa de Barichara mediante FBR Multicuadratica, se buscaron sus parámetros óptimos; de manera similar a la que se empleo con el interpolador FBR Thin Spline Cúbica., los resultados se muestran en Figura 18.

Figura 18 Cálculo de la Anisotropía óptima para la generación del modelo correspondiente a la Mesa de Barichara para la FBR Multicuadratica.



Fuente: El Autor

Los parámetros definitivos para la FBR Multicuadratica son:

**Tabla 27 Parámetros empleados en la Generación del DEM de la Mesa de Barichara a través de la FBR Multicuadratica.**

Parámetro	Valor
Radio de Anisotropía	1
Dirección Anisotropía	0
R <sup>2</sup>	530
Celda	50 x 50 m
Coordenadas en X	1'075.000 - 1'120.000
Coordenadas en Y	1'210000 – 1'250000
Elevaciones	300 -3200
Total Datos Muestrales	285848

Fuente: El Autor.

Finalmente se procedió a calcular el  $Z_{\text{residual}}$  para el modelo generado mediante la FBR Multicuadratica y los datos tomados con el GPS obteniéndose los valores que se muestran en la Tabla28.

**Tabla 28 Valor del ZResidual para cada uno de los Puntos tomados con el GPS Trimble para la FBR Multicuadratica.**

PUNTO	Z <sub>Residual</sub>	PUNTO	Z <sub>Residual</sub>	PUNTO	Z <sub>Residual</sub>	PUNTO	Z <sub>Residual</sub>
1	-89.7563732	24	13.3396464	47	0.12136348	70	47.9925633
2	-83.4280813	25	-38.729285	48	-20.9322816	71	22.6446626
3	-37.1010801	26	24.426284	49	15.579261	72	25.064821
4	18.9524712	27	-9.15263506	50	22.5210737	73	-21.3892944
5	8.33272065	28	-25.1735555	51	-5.8782562	74	-2.53359557
6	18.1895074	29	8.38270227	52	-0.83728819	75	6.91047192
7	43.5132223	30	-26.0175881	53	-13.5324608	76	-11.146108
8	11.1795259	31	35.7922193	54	4.26379917	77	29.602995
9	-67.9011063	32	80.570038	55	7.31978472	78	-11.0942241
10	14.7483508	33	23.8715397	56	-2.76553763	79	-16.8401653
11	32.5685808	34	30.9576053	57	7.67139995	80	-15.3955408
12	7.34558184	35	58.1965565	58	-1.69064653	81	-16.7443811
13	1.25863668	36	-28.0885709	59	-16.8208505	82	-13.4554773
14	18.0596026	37	-5.03041305	60	-9.51219379	83	-18.1685091
15	-20.6407884	38	3.49241553	61	28.7450625	84	-16.286113
16	-21.4124175	39	-17.8908717	62	11.6565238	85	8.02372847
17	-21.0596432	40	-16.07908	63	-1.20149859	86	6.05637267
18	-10.1429476	41	0.95452452	64	-5.68386076	87	-13.7022159
19	-1.98435053	42	-27.4821908	65	-4.8887507	88	-16.112423
20	-5.0620283	43	3.89954522	66	-8.81804294	89	-25.7855751
21	12.4564467	44	3.85392404	67	-7.7092624	90	-26.7171098
22	2.76963724	45	1.8062045	68	-11.6805664	91	-32.1441317
23	21.6285483	46	4.54068978	69	-5.82000059	92	-29.2102804
<b>Z<sub>Residual</sub> PROMEDIO</b>		18.5422854					

Fuente: El Autor.

**Tabla 29 Validacion del Modelo de comparación generado a través de Surfer 8**

<b>STATISTIC</b>	<b>Column D</b>
<b>Number of values</b>	93
<b>Sum</b>	648.1524235
<b>Minimum</b>	-30.49151059
<b>Maximum</b>	67.21886921
<b>Range</b>	97.7103798
<b>Mean</b>	6.969380897
<b>Standard deviation</b>	21.37217271

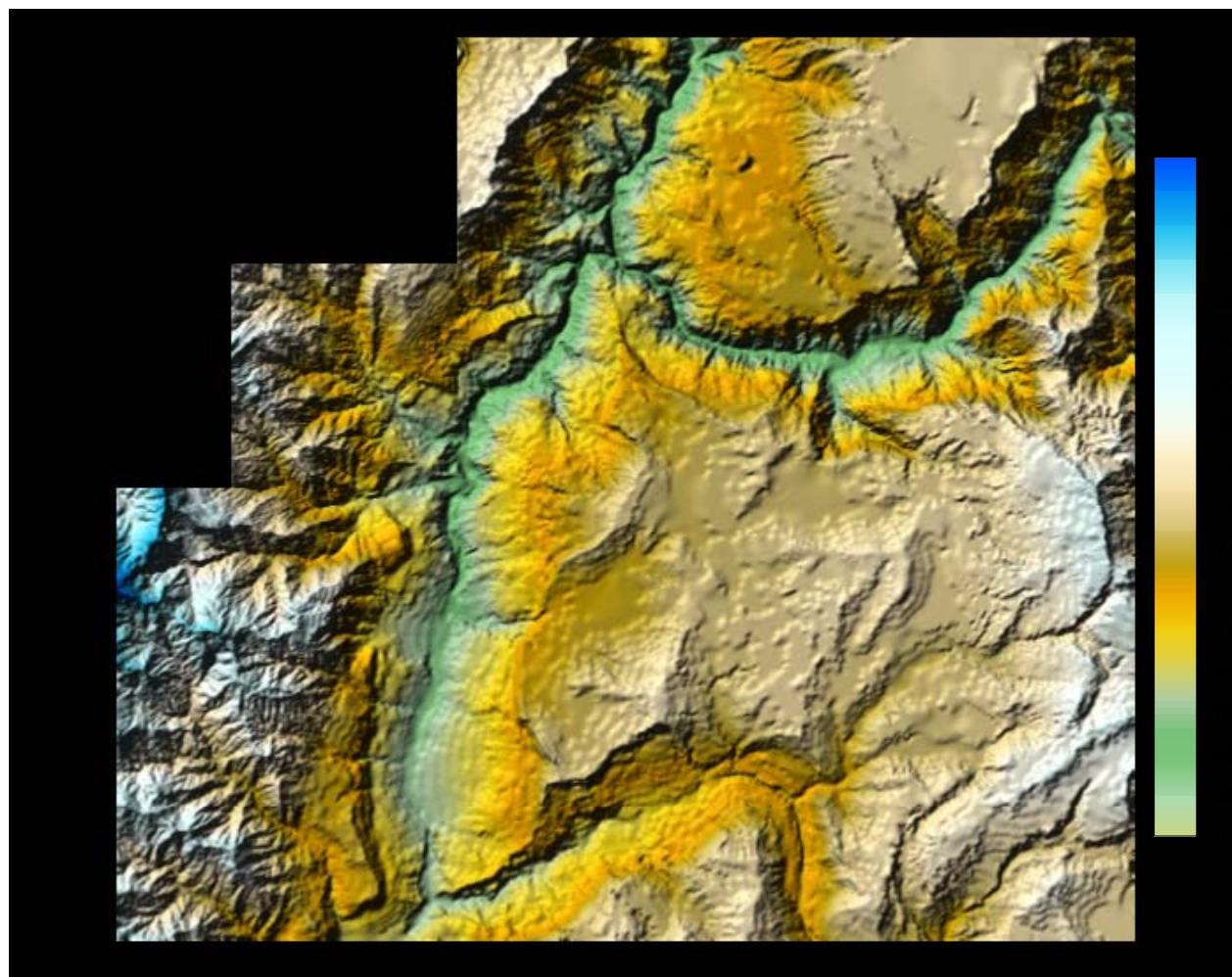
Como se puede ver en las Tablas 26 y 29 el  $Z_{Residual}$  promedio es mayor por este método al obtenido para el FBR Thin Plate Spline, por lo que no solo sirve para validar el modelo sino que además ratifica que la FBR Thin Spline Cúbica es el Interpolador Surfer Optimo en la consecución del DEM de la Mesa de Barichara.

#### **5.4 DEM PARA LA MESA DE BARICHARA**

Ya definido el Método Interpolador Surfer a emplear (FBR Thin Plate Spline) el siguiente paso fue la generación del modelo el cual se muestra en las Figuras 19.y 20.

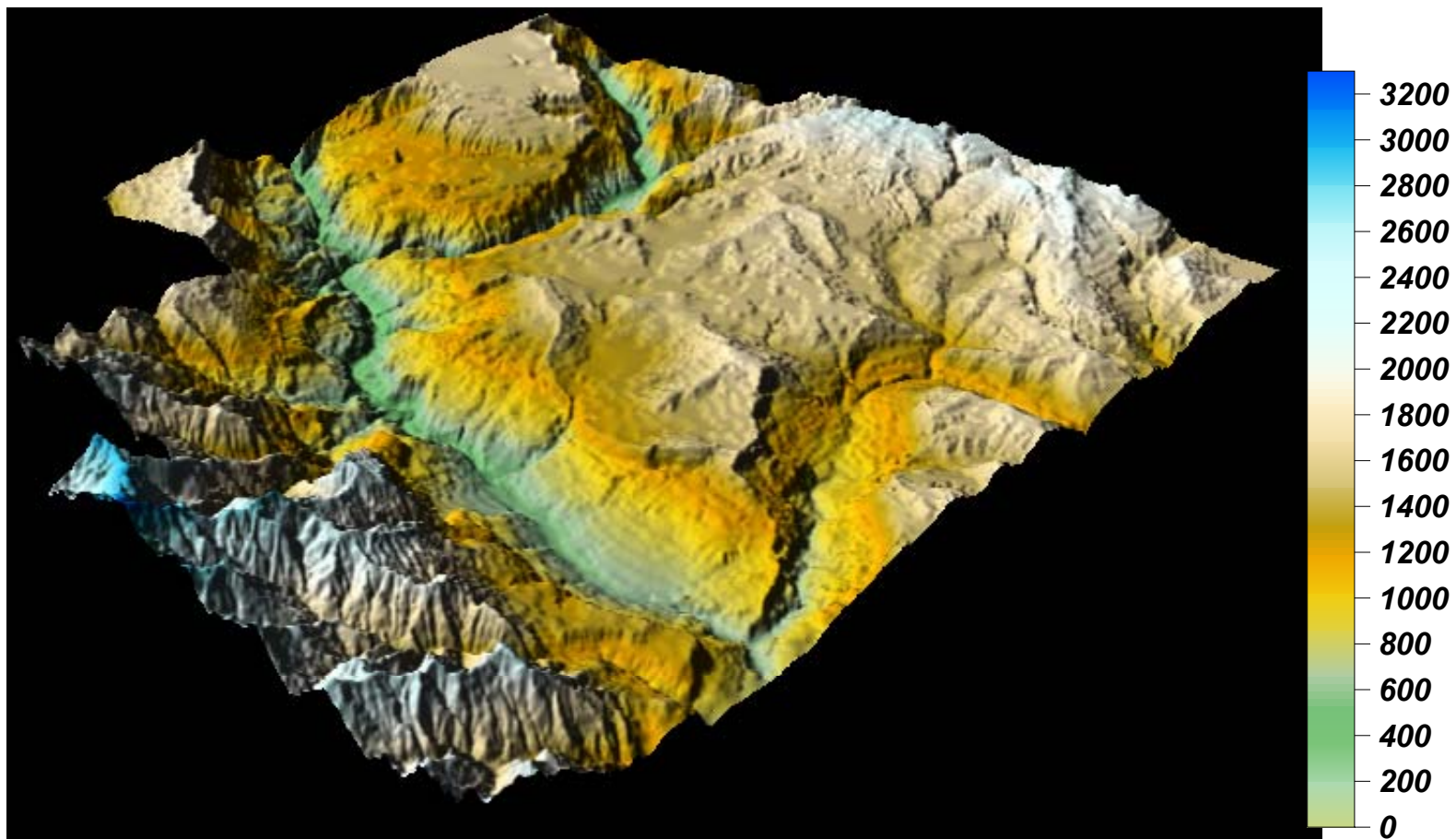
El DEM de la Mesa de Barichara esta conformado por elevaciones que van desde 300 a 3200 m.s.n.m. con celdas cuyo tamaño son 50m x 50m las cuales fueron definidas desde el inicio del proyecto.

Figura 19 Vista en Planta del DEM de la Mesa de Barichara.



Fuente: El Autor.

Figura 20 DEM en 3D para la Mesa de Barichara utilizando la FBR Thin Spline Cúbica.



Fuente: El Autor.

## CONCLUSIONES

- En este trabajo se obtuvo un primer Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de la región llamada Mesa de Barichara, la cual esta comprendida por el Río Suárez, Río Chicamocha y Río Fonce para un Tamaño de Celda de 50 x 50 m, con un error de  $\pm 6$  m en el proceso de interpolación y de  $\pm 7$  m en el proceso de validación.
- El MDE se obtuvo a partir de cartografía existente del IGAC en escala 1:25000, que había sido previamente digitalizada en Autocad y posteriormente sometida a un proceso de depuración y corrección mediante Autocad Map. Posteriormente se transformo a una base de datos mediante Spell Map para finalmente realizar el proceso de interpolación con el software Surfer.
- El proceso utilizado y los errores estimados suponían que el proceso de digitalización era óptimo, lo cual no es del todo cierto, pues para el caso se requirió corregir parte del proceso de digitalización con el fin de poder reflejar mejor la forma del terreno.
- La poca información que puede suministrar una cartografía en escala 1:25000 en zonas planas, hace que sea necesario la búsqueda de mayor información cartográfica, ya sea a través de levantamientos con estación, GPS u otra técnica que permitan ver con más detalle la Topografía del Terreno.
- De los 11 Interpoladores Surfer que se emplearon, el que mejor se ajusto en la generación del Modelo Digital de Elevaciones de la Mesa de Barichara es la FBR Thin Plate Spline, desde los 4 parámetros que se evaluaron que a saber fueron: el menor RMSE, el tiempo de Validación de los informes, el tiempo de generación y la calidad del relieve en el Modelo Generado.
- El interpolador que mejor ajuste presento a la información disponible de la zona correspondió a la Función Básica Radial Thin Plate Cúbica desde los parámetros evaluados, además de que su comportamiento fue el de un interpolador exacto.
- Los MDE día a día van adquiriendo mayor uso y aplicaciones, sin embargo debido a la topografía de la zona (plana) y a la poca información que suministra la cartografía en escala 1:25000 para la misma, se hace necesaria la restricción de su empleo hacia estudios hidrológicos y geológicos.

## RECOMENDACIONES

En futuros proyectos trabajar con información de mayor calidad (menor escala) con el fin de obtener mayor cantidad de datos que permitan una mejor representación de la realidad a través de los modelos.

A la hora de tomar los datos para la validación con el equipo GPS se debe tener muy en cuenta el tamaño de la celda generada, tomando un único punto por celda con el fin de ahorrar tiempo y capturar el mayor número de datos posible. Esto debido a que cuando se realice la búsqueda de los  $Z_{Residuales}$ , si se encuentran, dos o mas puntos dentro de una misma celda, Spell tomara el promedio de los puntos y solo calculara un  $Z_{Residual}$ . Produciendo un error diferente al esperado.

Emplear un equipo con mayor capacidad (velocidad del procesador y Memoria Ram) que permita la disminución de los tiempos de los informes de Validación cruzada, y de generación del modelo, con el fin de lograr buenos resultados en menores tiempos.

La morfología del planeta cambia constantemente y últimamente lo ha hecho de forma considerable gracias a los eventos naturales que se han venido presentando, por lo que se recomienda emplear planchas cartográficas de menor escala, o el uso de imágenes satelitales para conseguir mejores resultados.

La FBR Thin Spline Cúbica solo se acomoda en la generación del DEM de la mesa de Barichara, por lo que no se debe generalizar y extender su comportamiento a otra zona del Dpto. de Santander. Para ello se deben emplear nuevamente los pasos en la generación de un DEM.

## BIBLIOGRAFIA

- Aguilar F, et al *Efectos de la Morfología del Terreno, Densidad Muestral y Métodos de Interpolación en la Calidad de los Modelos Digitales de Elevaciones*. XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, Santander, España – 5-7 junio de 2002.
- Aguilar F, et al F. *Evaluación de Diferentes Técnicas de Interpolación Espacial para la Generación de Modelos Digitales del Terreno Agrícola*. Proyecto del Departamento de Ingeniería Rural. Universidad de Almería, España 2001.
- Band L. *Extraction of channels networks and topographic parameters from digital elevation data*. In K. Beven and M.J., editors, Channel network hydrology, chapter 2, pages 13—41. John Wiley and Sons, New York, 1st edition, 1993.
- Buenahora C, Osorio H. Desarrollo del Modelo Digital de Elevaciones de la Cuenca de Río Sucio Municipio de Tona. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander 2005 Tesis de Pregrado.
- Burrough P y MacDonnell R. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, New York, 1998.
- Correa P. Sistema de Información Geográfica para la gestión del recurso hídrico a nivel de cuenca. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2002.
- Cressie, N. A. C. (1991), *Statistics for Spatial Data*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 900 pp.
- Felicísimo, Ángel M. *Modelos Digitales del Terreno. Introducción y Aplicaciones en las ciencias Ambientales*. Oviedo (España) ,1994
- Fernández R y Geler T. *Modelo Digital de Elevación de la Zona Emergida del Ecosistema Sabana Camagüey, Cuba*. Proyecto del Instituto de Geografía Tropical de Cuba, Cuba 2004.
- Golden Software, Inc.; “Users’ manual of Surfer for Windows (version 6.04)”. Golden (USA): Golden Software Inc., 1997.

- Gómez J *Introducción a los SIG* Capitulo 4 Pág. 13 Universidad Industrial de Santander: Escuela de Ingeniería Civil. Profesor de Pregrado.
- González Carlos. *Seminario de la Investigación*. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander.
- Guzmán, J., 2003, SPELL Map. No publicado.
- IGAC, Planchas Cartográficas Digitalizadas, Escala 1:25000 1995
- IGAC, Planchas Cartográficas Restituidas Formato papel, Escala 1:25000 1972 - 1995
- INEGI. Modelos digitales de elevación escala 1:50 000. Generalidades y especificaciones. México 2006
- López W y Osorio R. Modelo Digital de Elevación para la Cuenca del Río de Oro. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander. 2005 Tesis de Pregrado
- Mantilla R. *Análisis multiescala de propiedades morfométricas y de caudales máximos de cuencas hidrográficas de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 1999.
- Maradei, Z., Rojas, J., Distribución espacial de variables hidrológicas en la Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL) utilizando geoestadística. Universidad Industrial de Santander 2002. Tesis de Pregrado.
- MARTÍNEZ R et al *Análisis de las metodologías habituales para la generación de Modelos digitales del terreno* Mapping nº 71, 2001
- Ramírez J M. *Extracción Automática de Redes de Drenaje a partir de Modelos Digitales de Terreno*. Universidad Nacional de Colombia 2002. Tesis de Pregrado.
- Serrano A y Balaguera G. *Separación de Flujo Base en la Estación Café Madrid C.S.R.L.* Universidad Industrial de Santander 2006. Tesis de Pregrado.
- Vélez. J *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de crecidas*. PhD tesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2001.
- Vélez J, Poveda G, y Mesa O *Balances hidrológicos de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2000.

ANEXO A

ANEXOS

Figura A 1 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador Distancia Inversa a una Potencia.

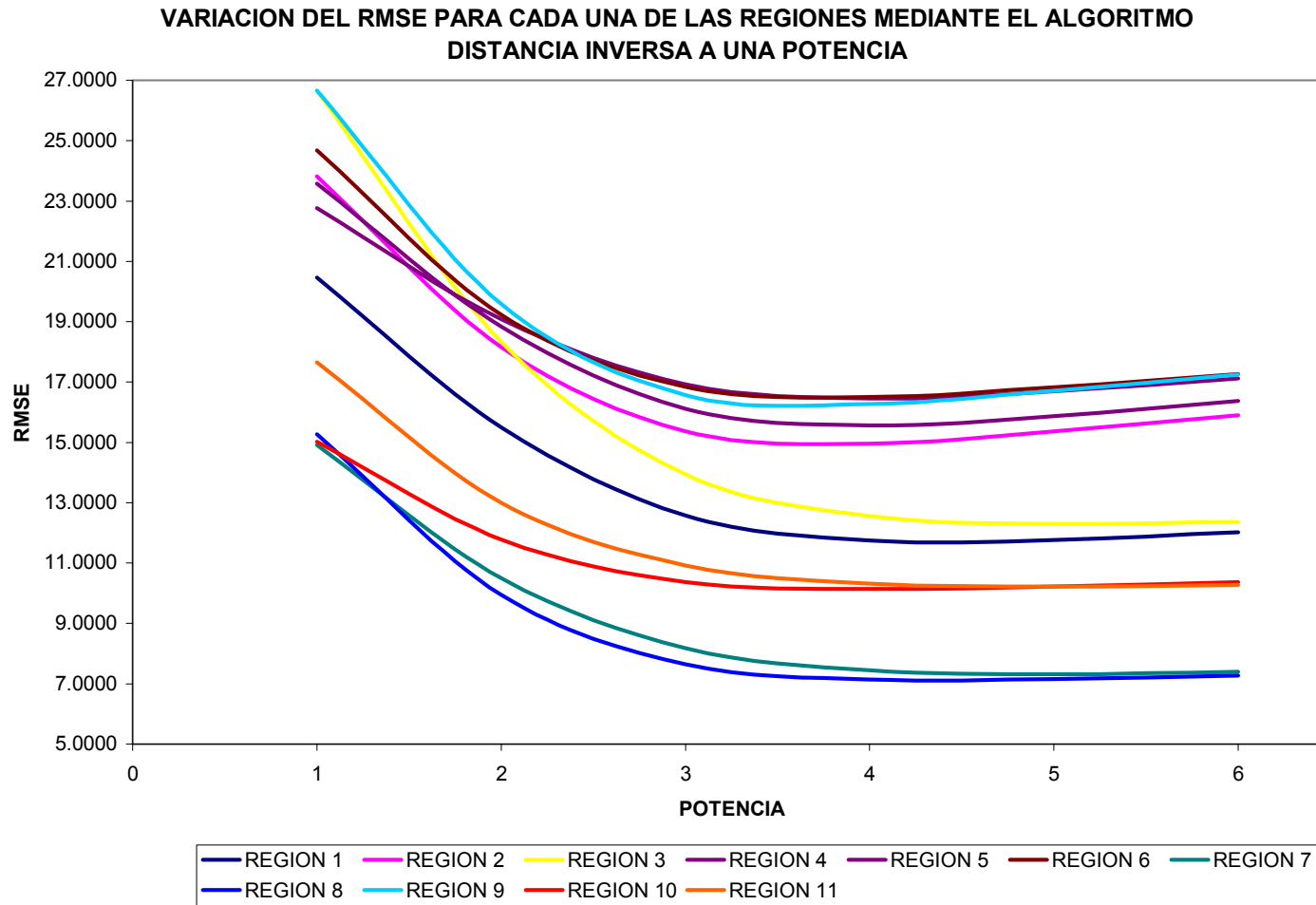


Figura A 2 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador Vecino más cercano.

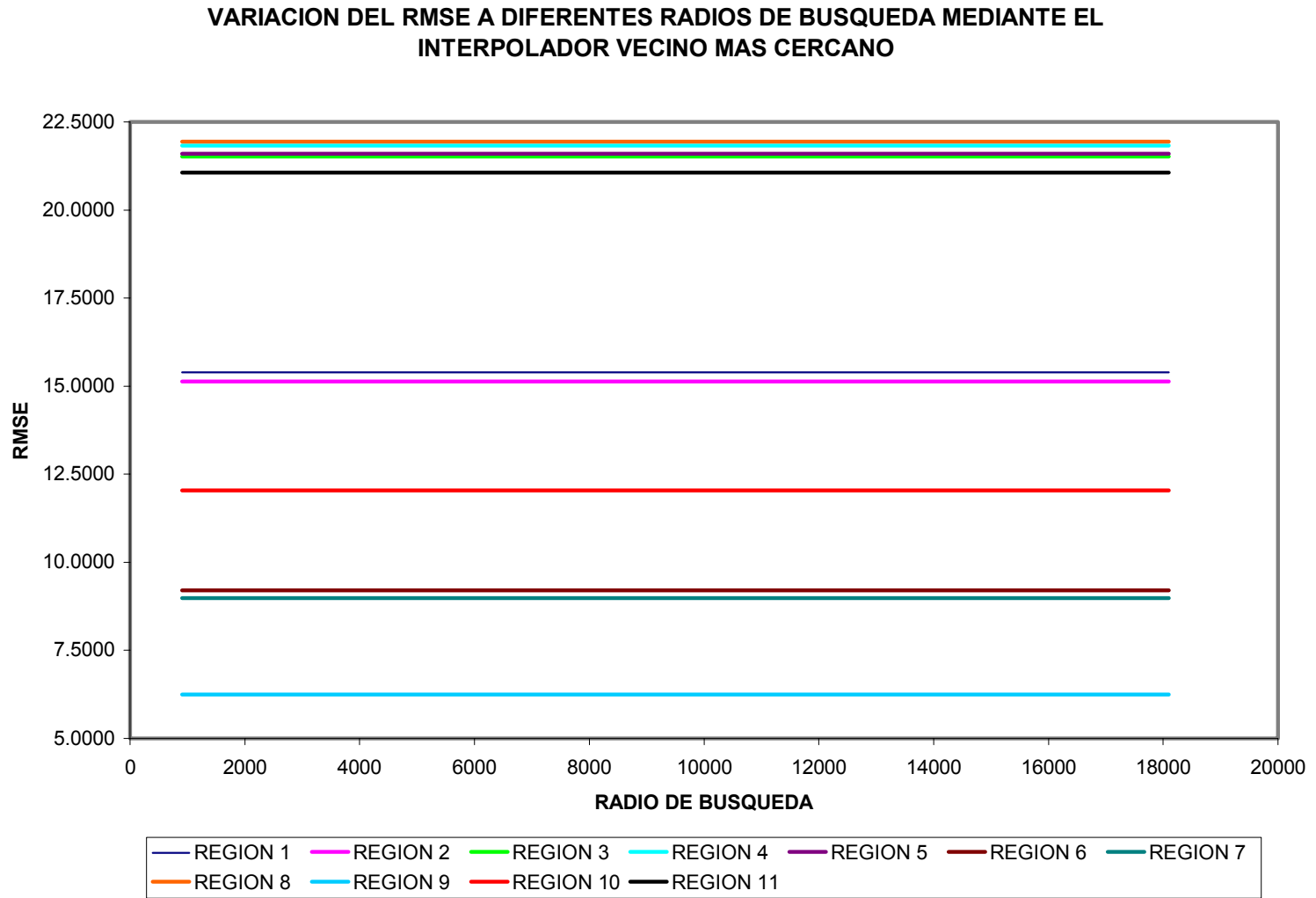


Figura A 3 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador Vecino Natural.

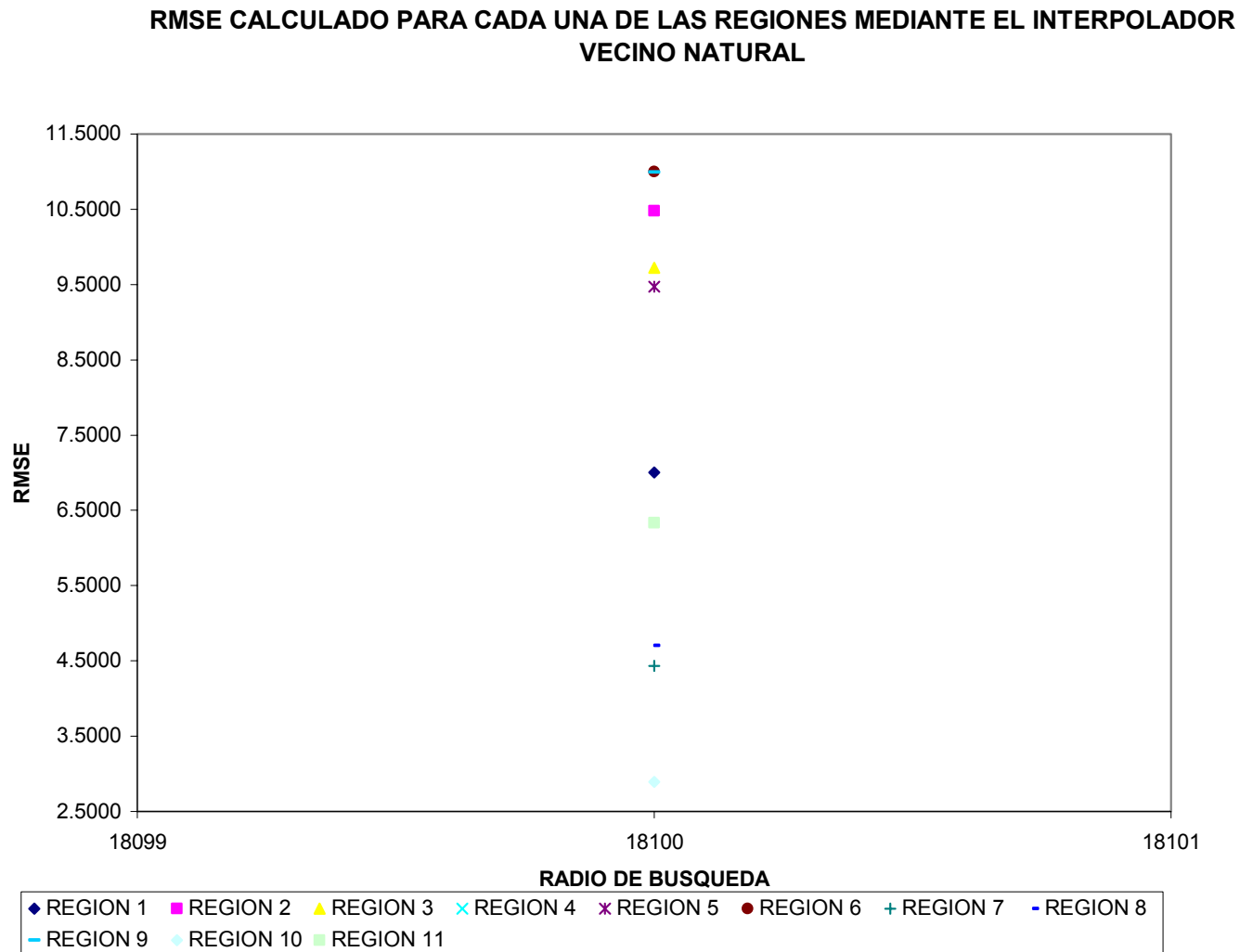


Figura A 4 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador Mínima Curvatura.

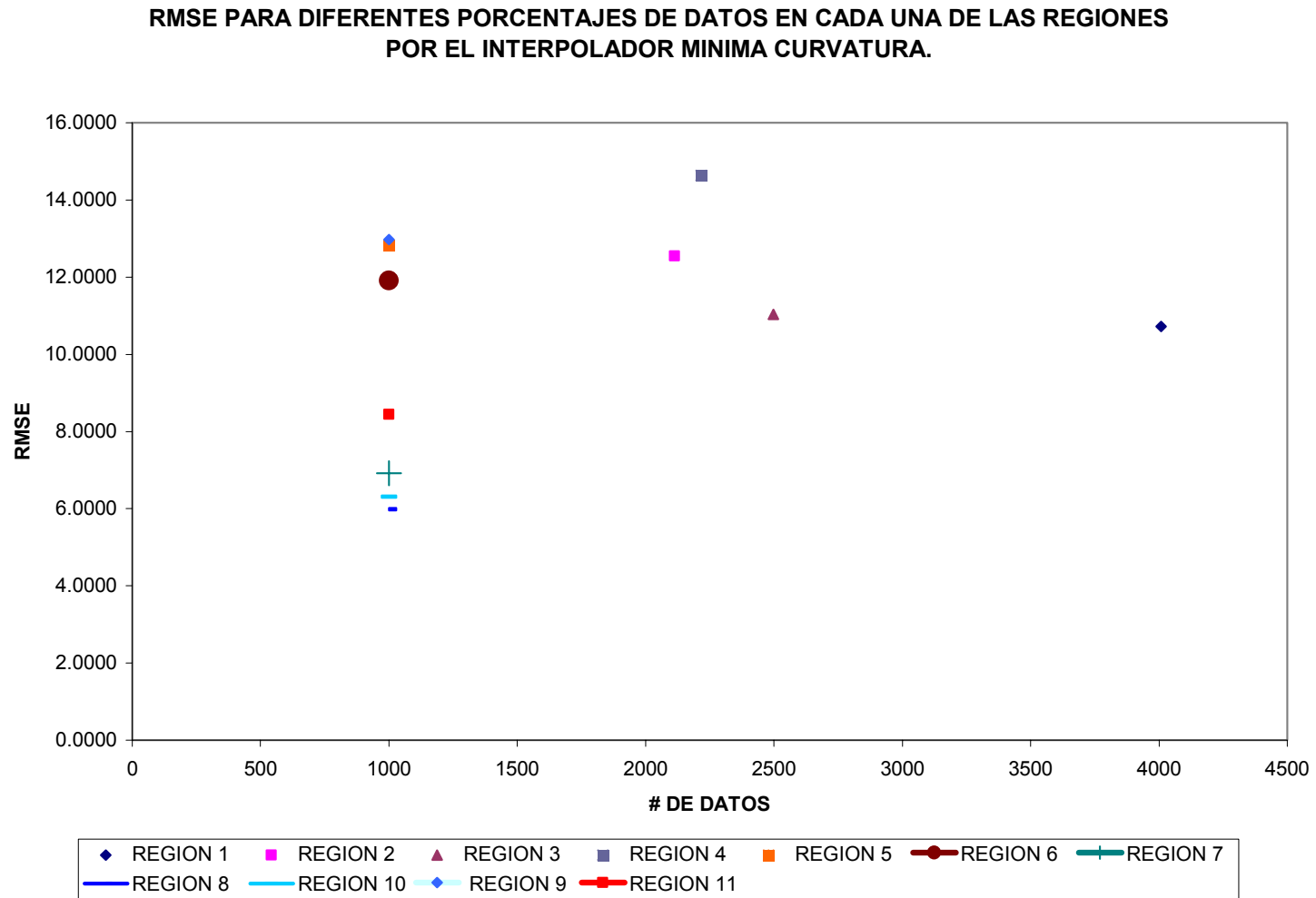


Figura A 5 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador Triangulación con Interpolación Lineal.

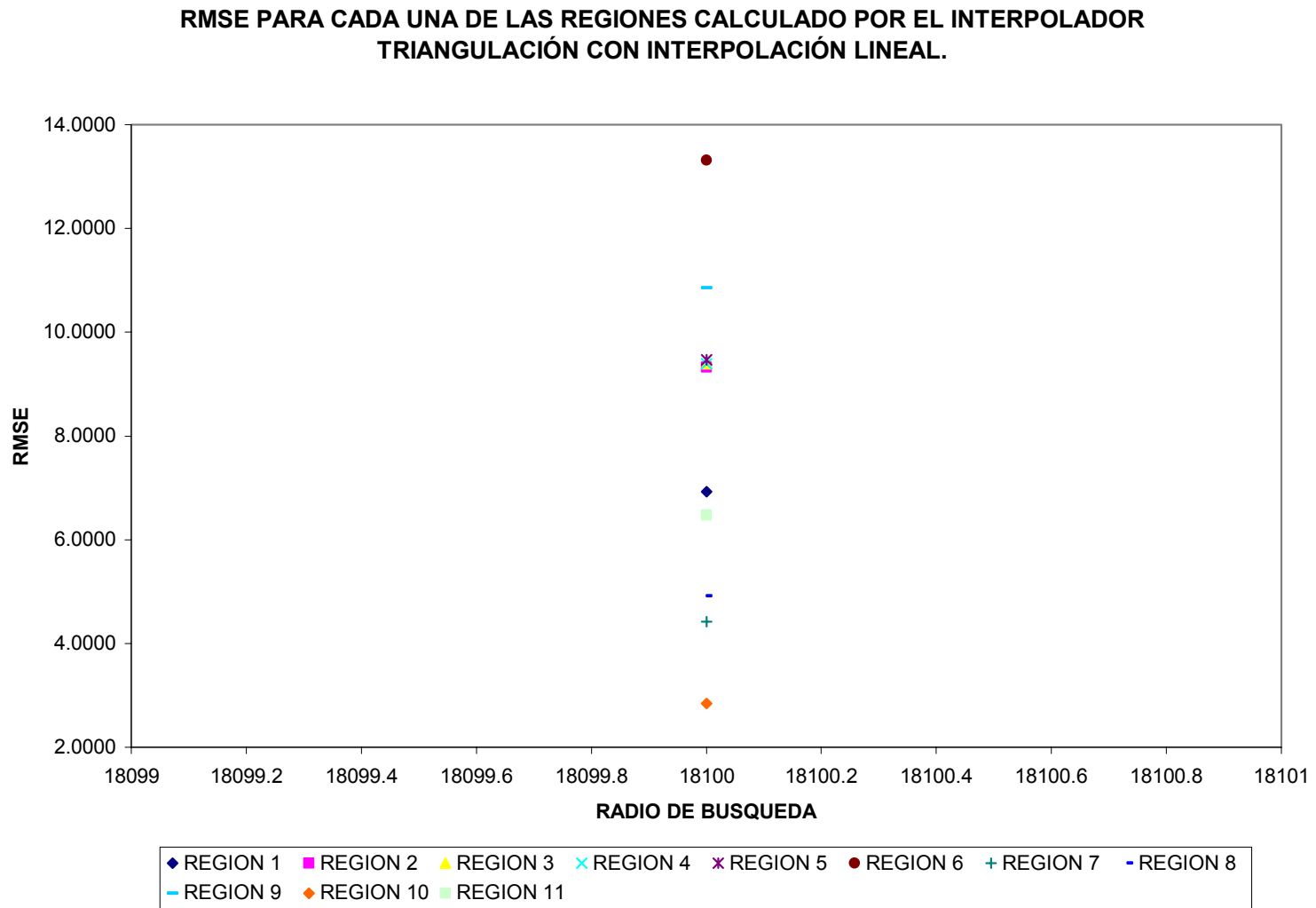


Figura A 6 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador FBR Inversa Multicuadratica.

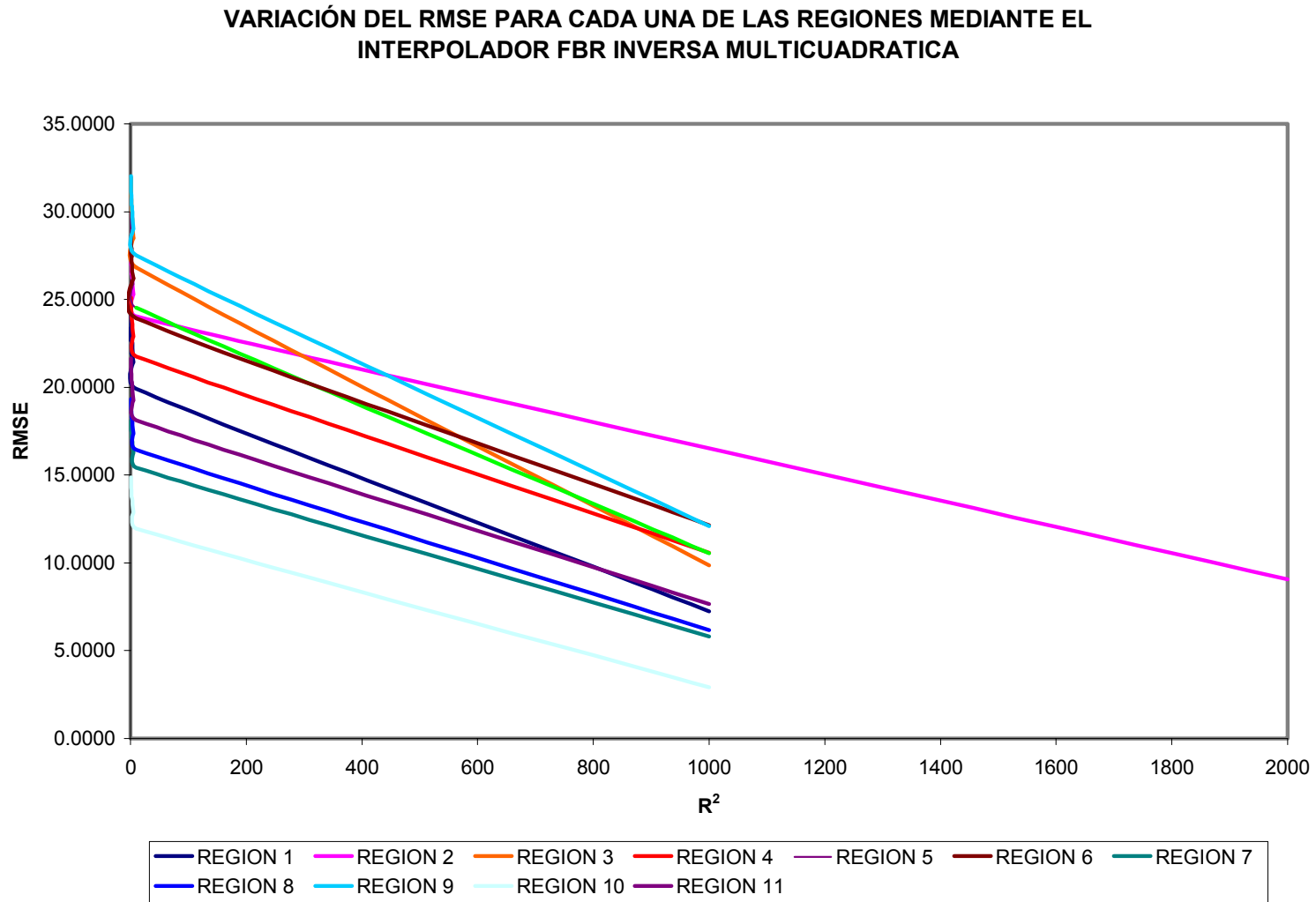


Figura A 7 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador FBR Multilogarítmica.

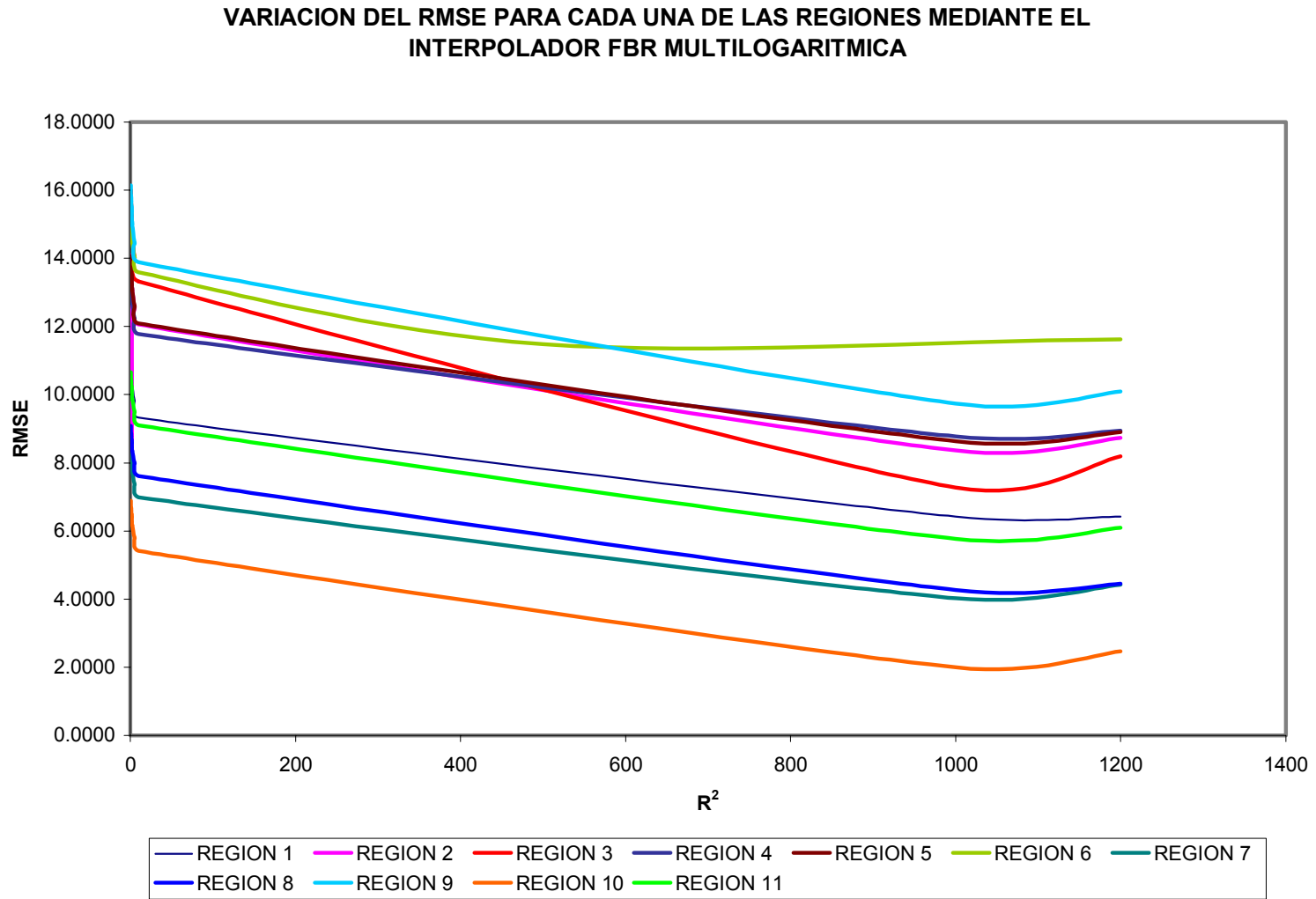


Figura A 8 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador FBR Multicuadrática.

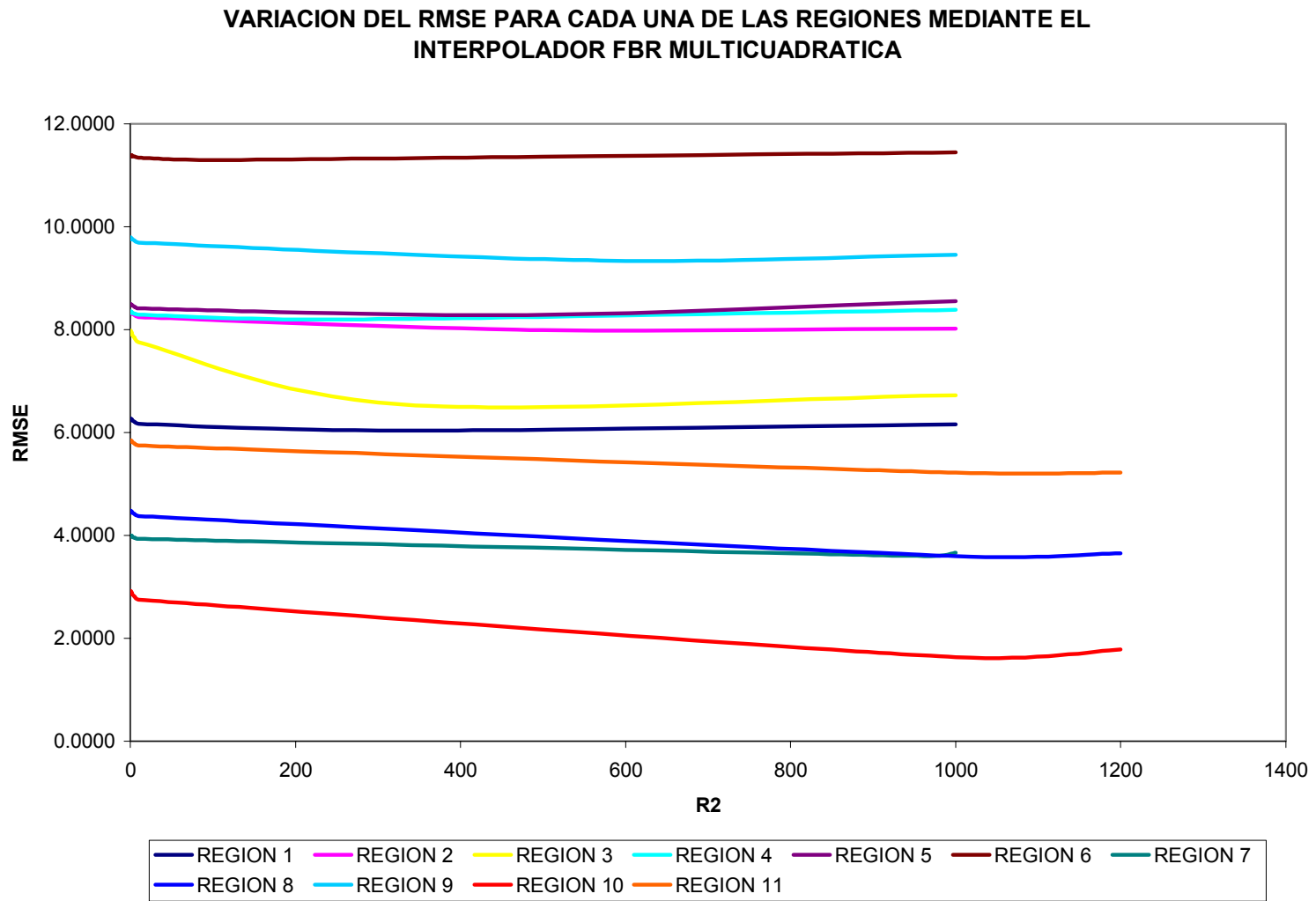


Figura A 9 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador FBR Spline Cúbica Natural.

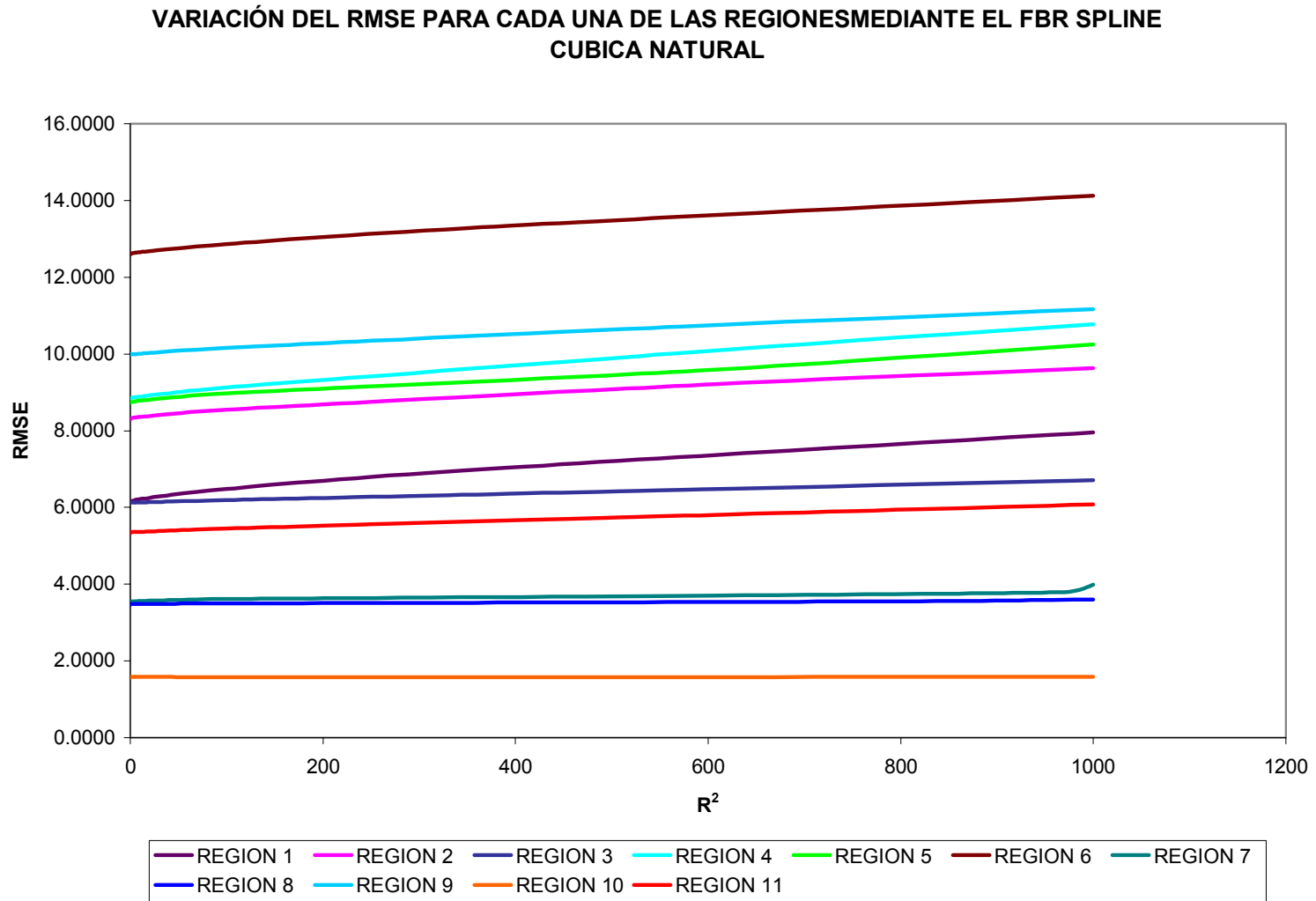


Figura A 10 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador FBR Thin Plate Spline.

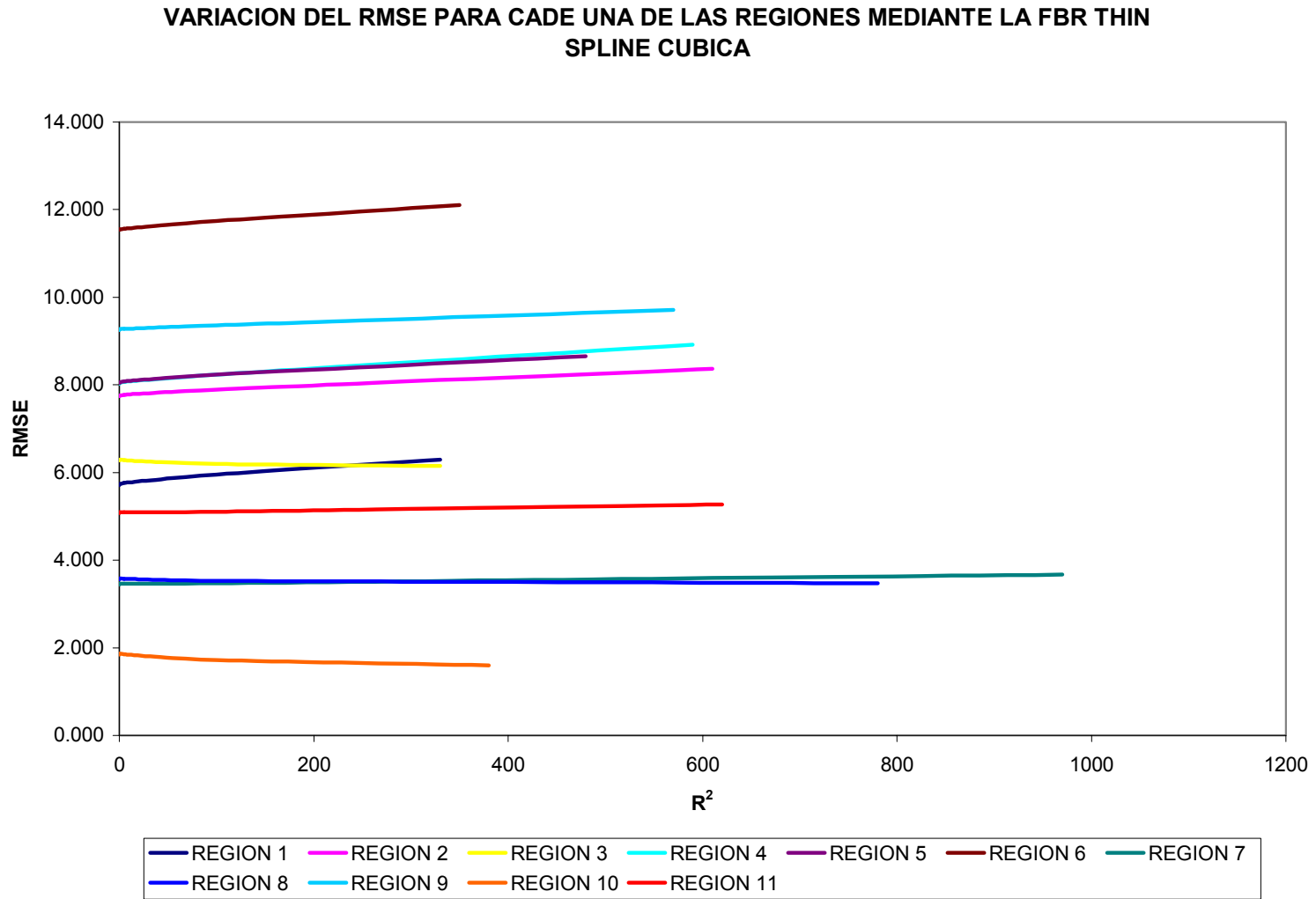
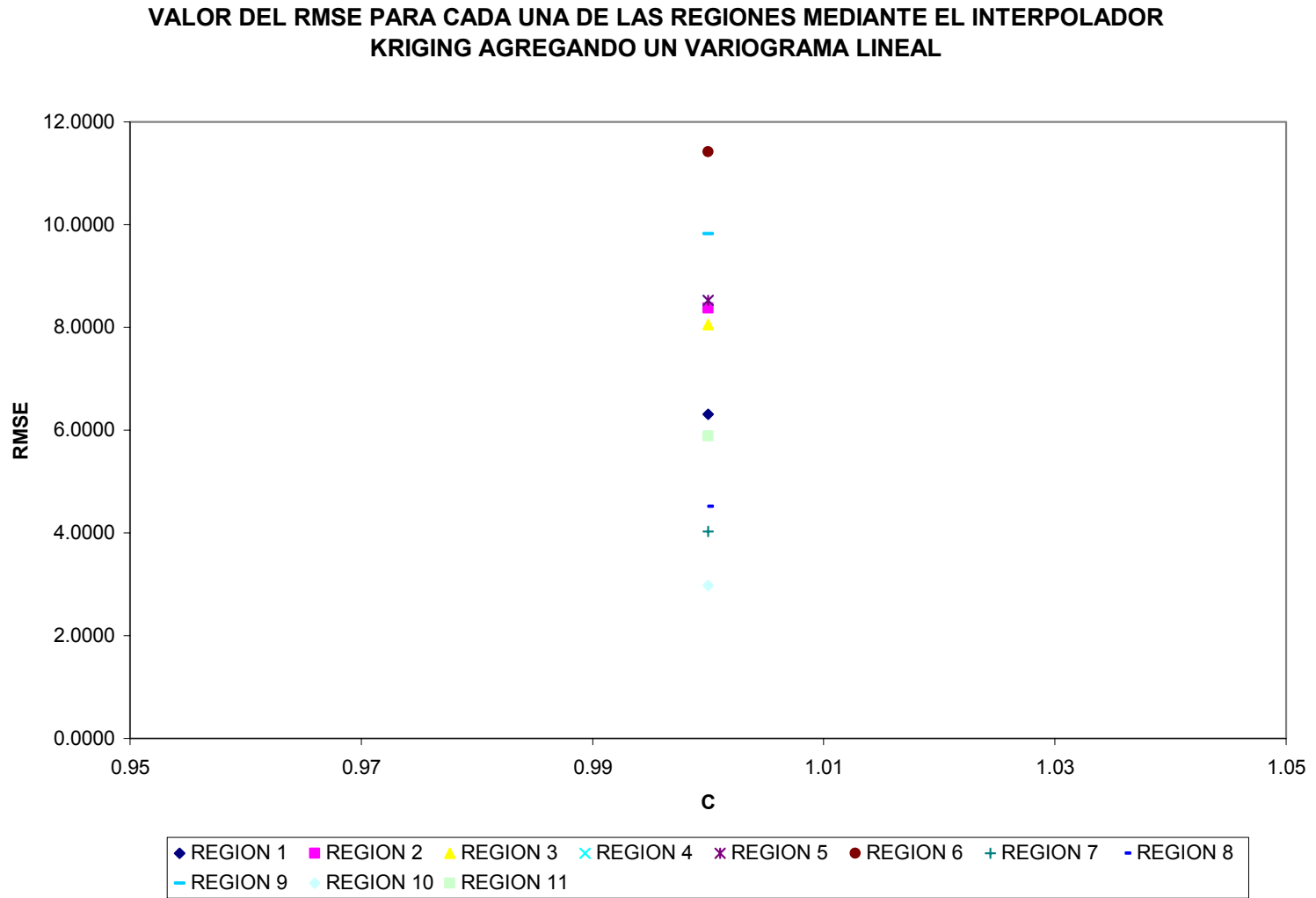
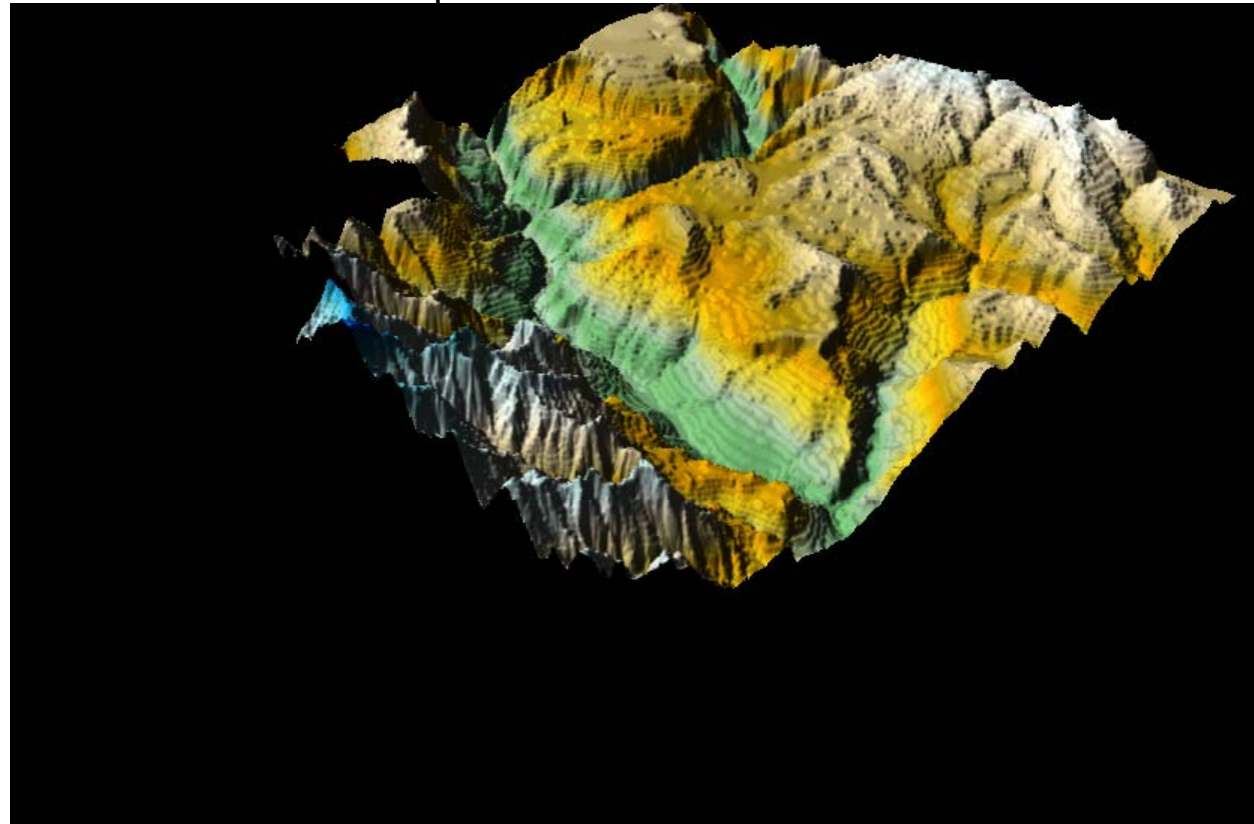


Figura A 11 Variación del RMSE en cada una de las regiones mediante el Interpolador Kriging Lineal.



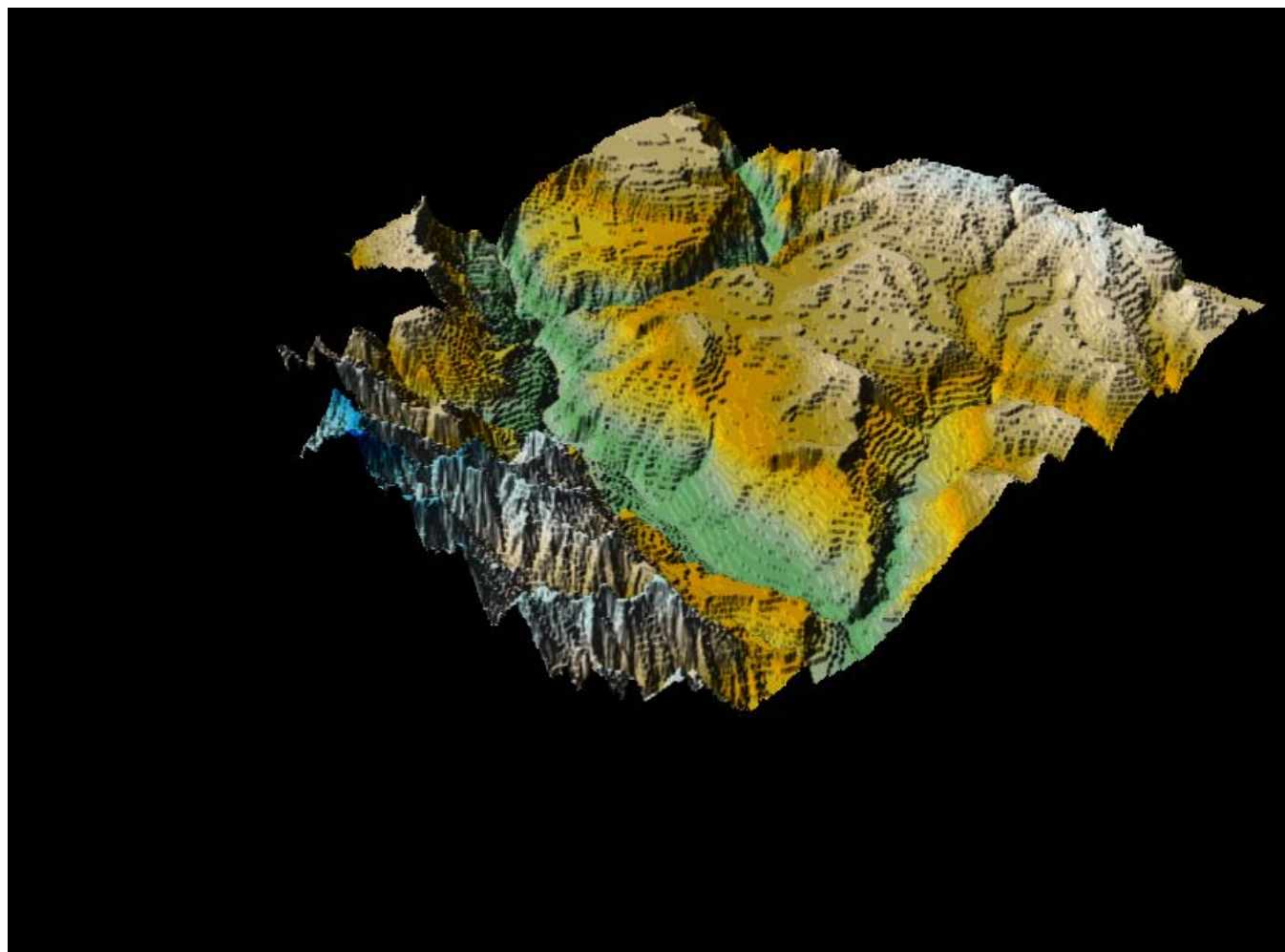
**ANEXO B**

**Figura B 1 Modelo Generado Mediante el Interpolador Distancia Inversa a una Potencia.**



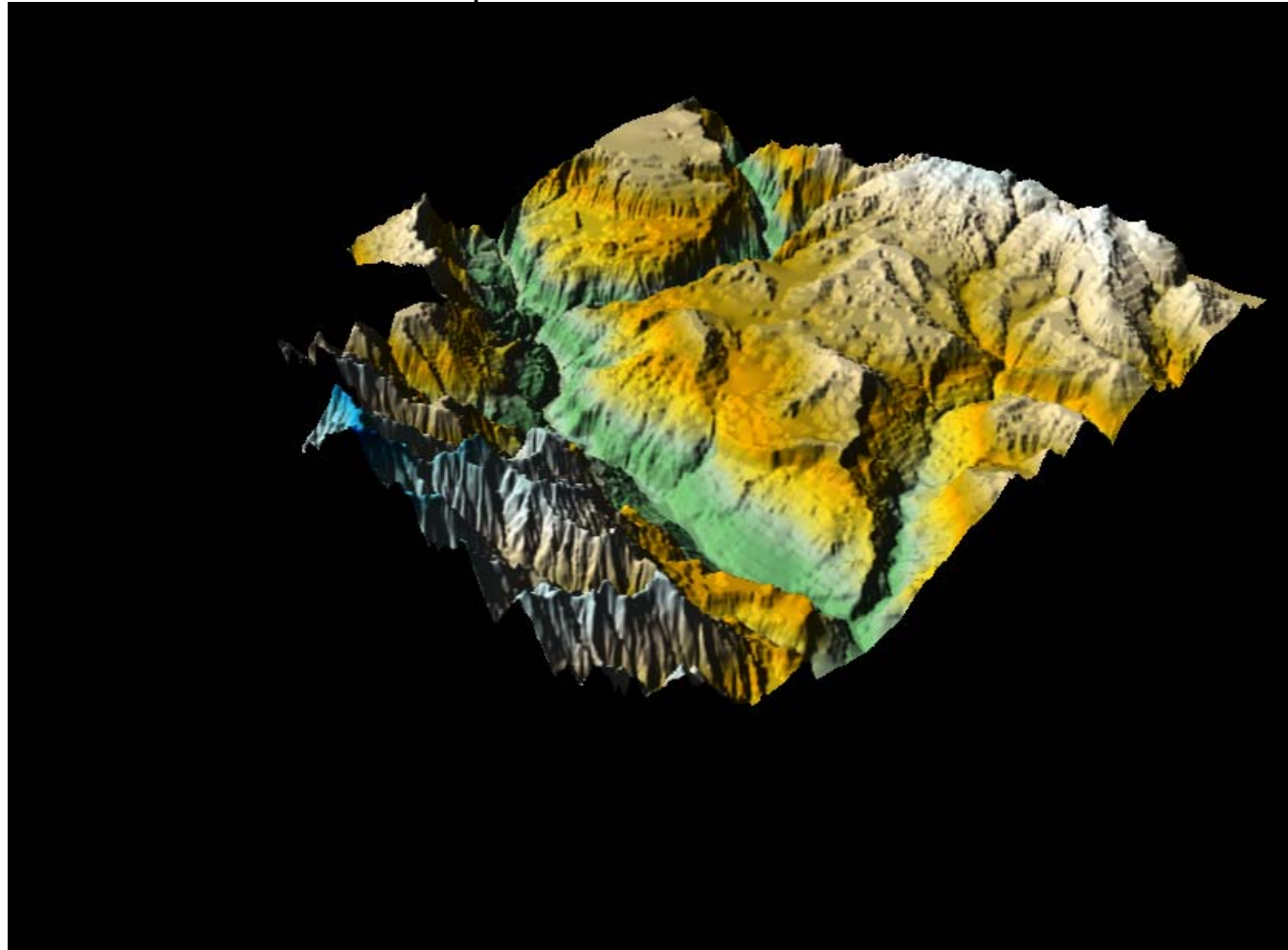
Fuente: Surfer 8

Figura B 2 Modelo Generado Mediante el Interpolador Vecino más Cercano.



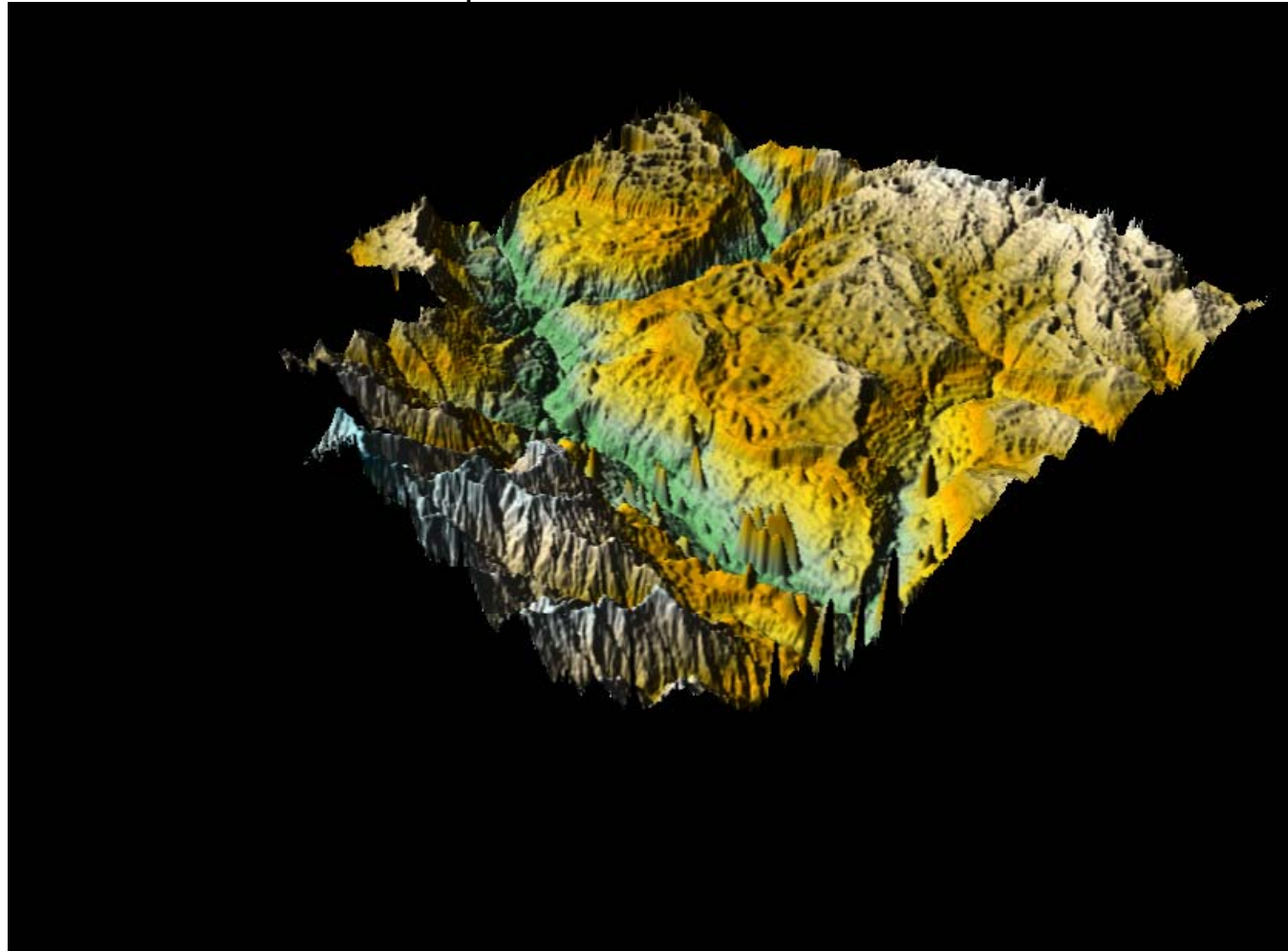
Fuente: Surfer 8

Figura B 3 Modelo Generado Mediante el Interpolador Vecino Natural.



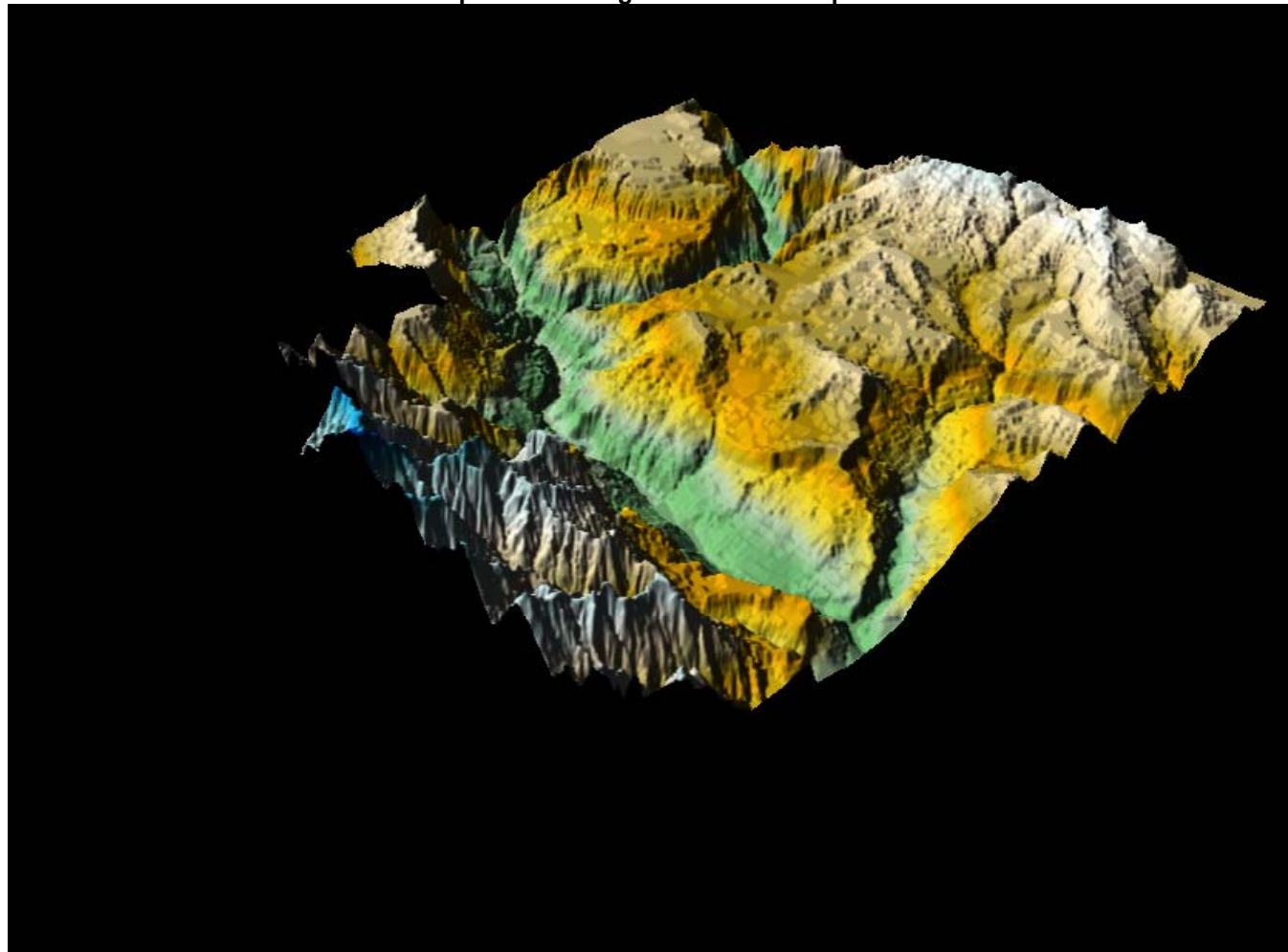
Fuente: Surfer 8

Figura B 4 Modelo Generado Mediante el Interpolador Minima Curvatura.



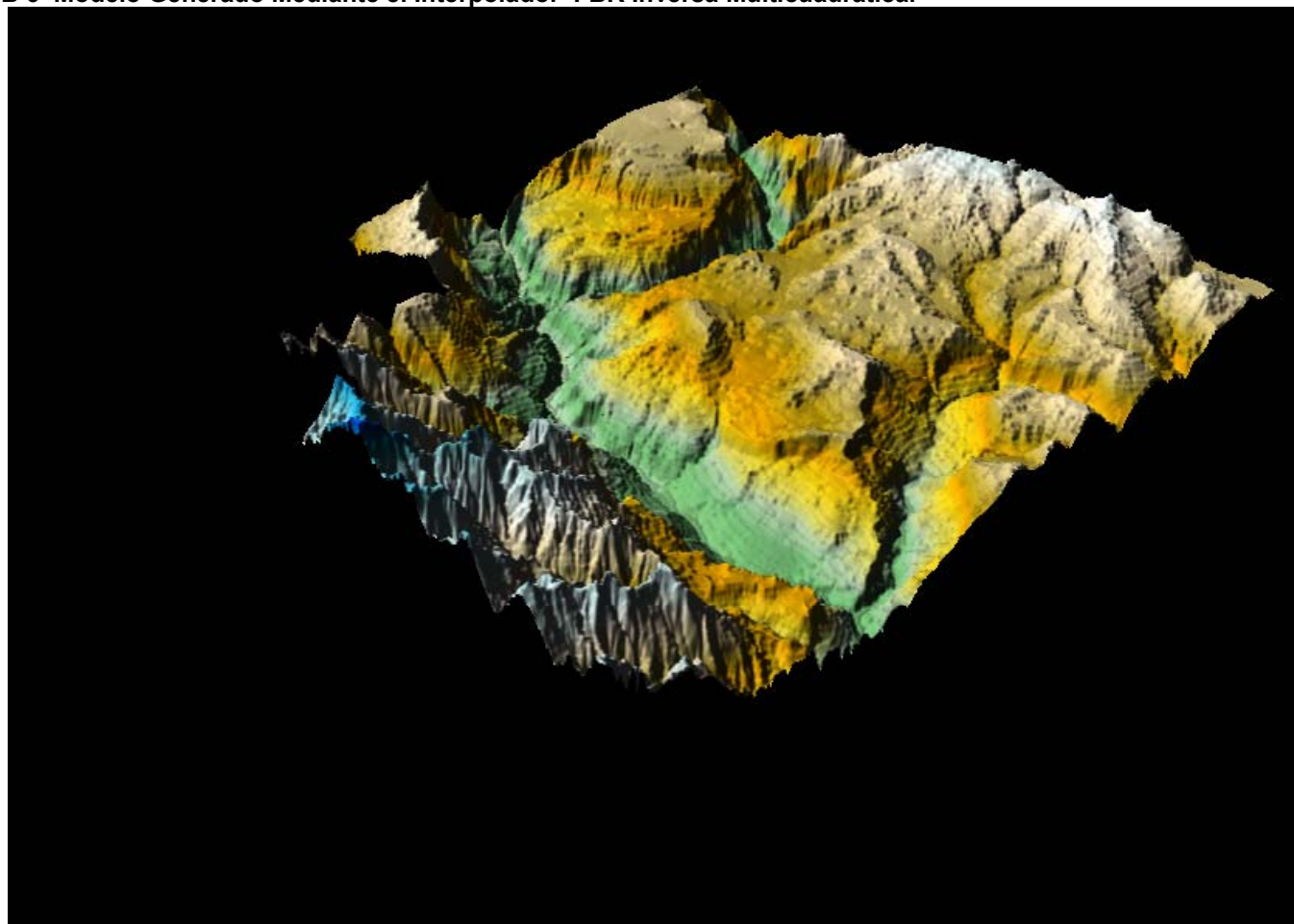
Fuente: Surfer 8

Figura B 5 Modelo Generado Mediante el Interpolador Triangulación con Interpolación Lineal



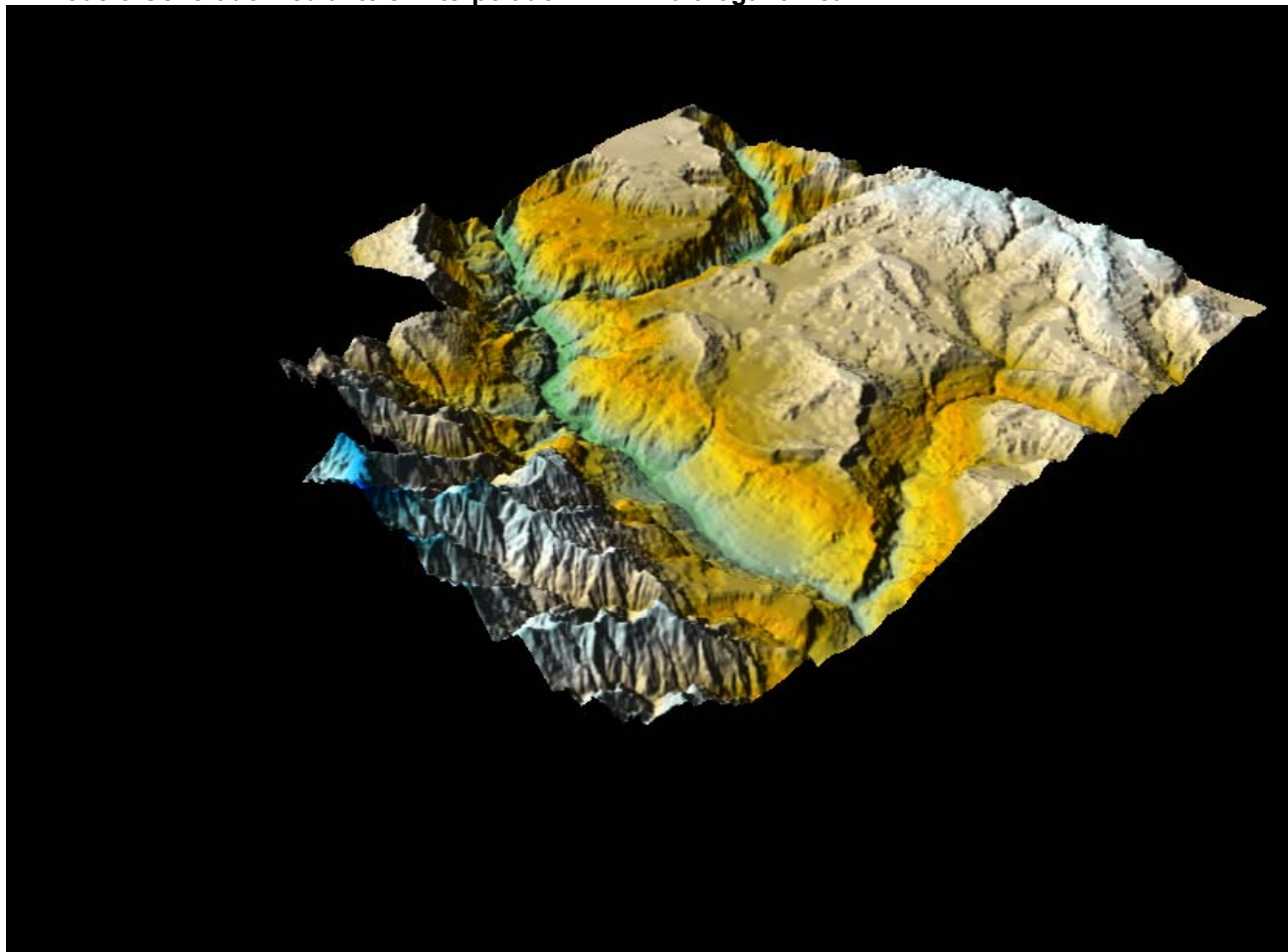
Fuente: Surfer 8

Figura B 6 Modelo Generado Mediante el Interpolador FBR Inversa Multicuadratica.



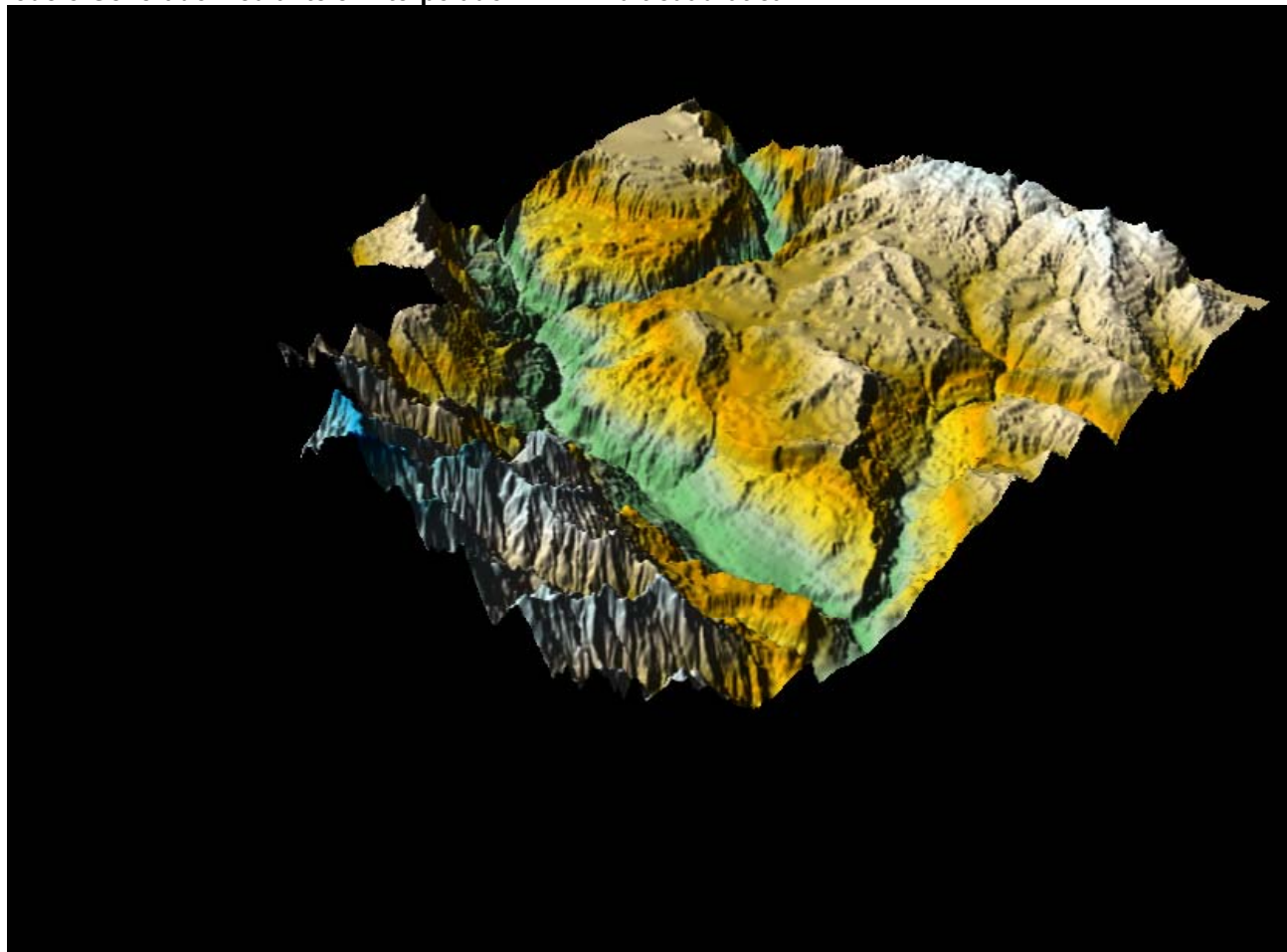
Fuente: Surfer 8

Figura B 7 Modelo Generado Mediante el Interpolador FBR Multilogaritmica.



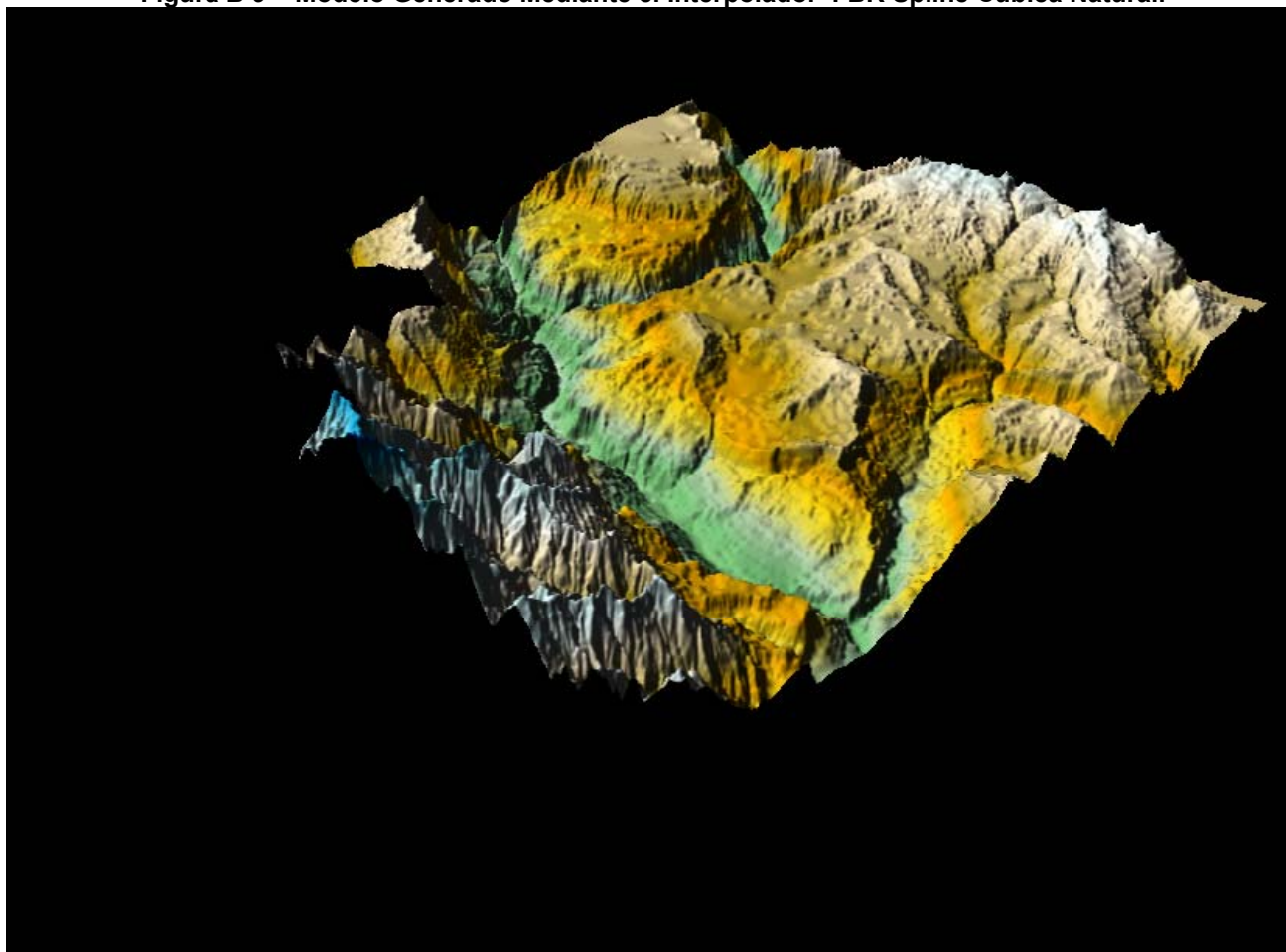
Fuente: Surfer 8

Figura B 8 Modelo Generado Mediante el Interpolador FBR Multicuadratica.



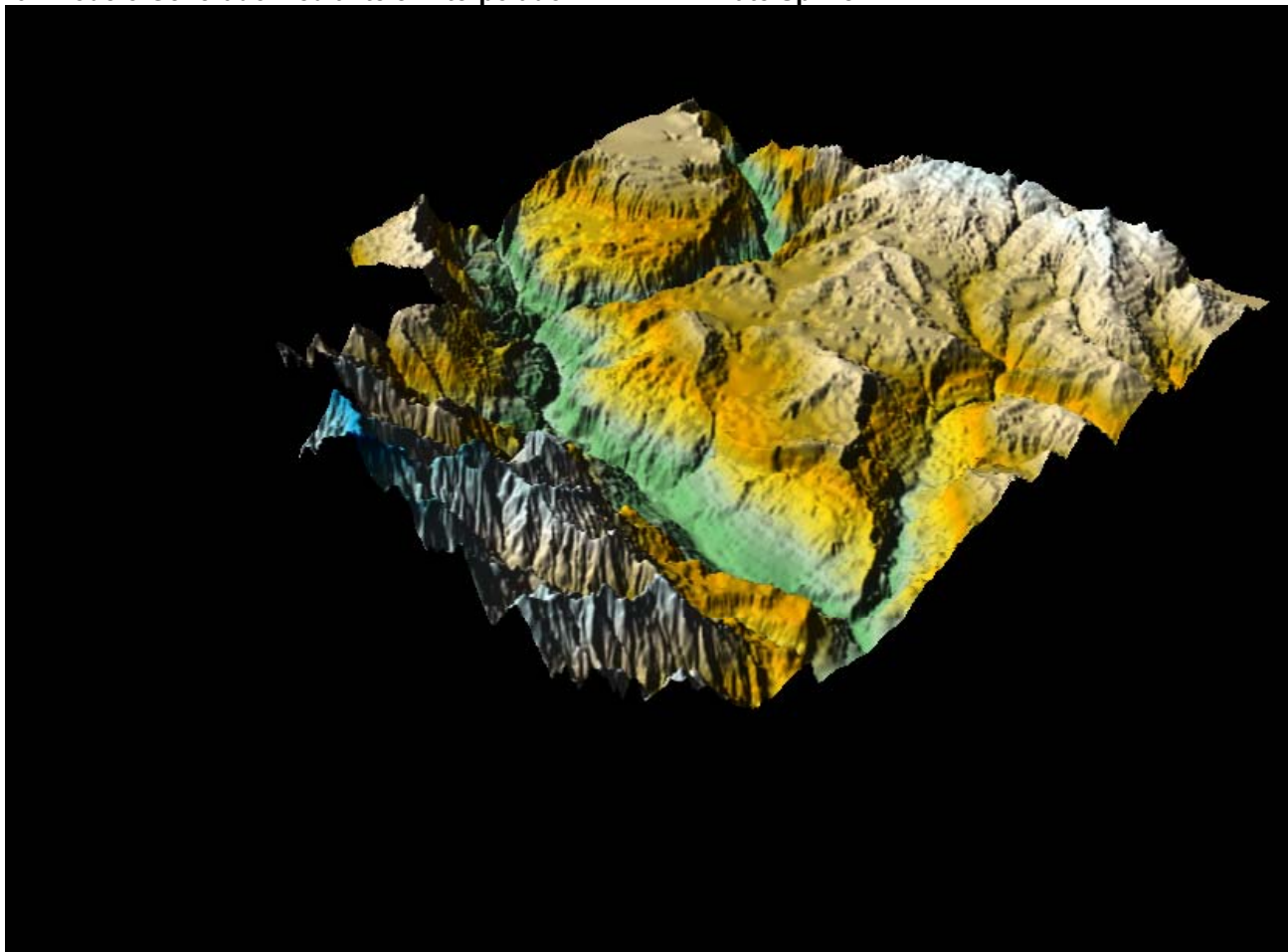
Fuente: Surfer 8

Figura B 9 Modelo Generado Mediante el Interpolador FBR Spline Cúbica Natural.



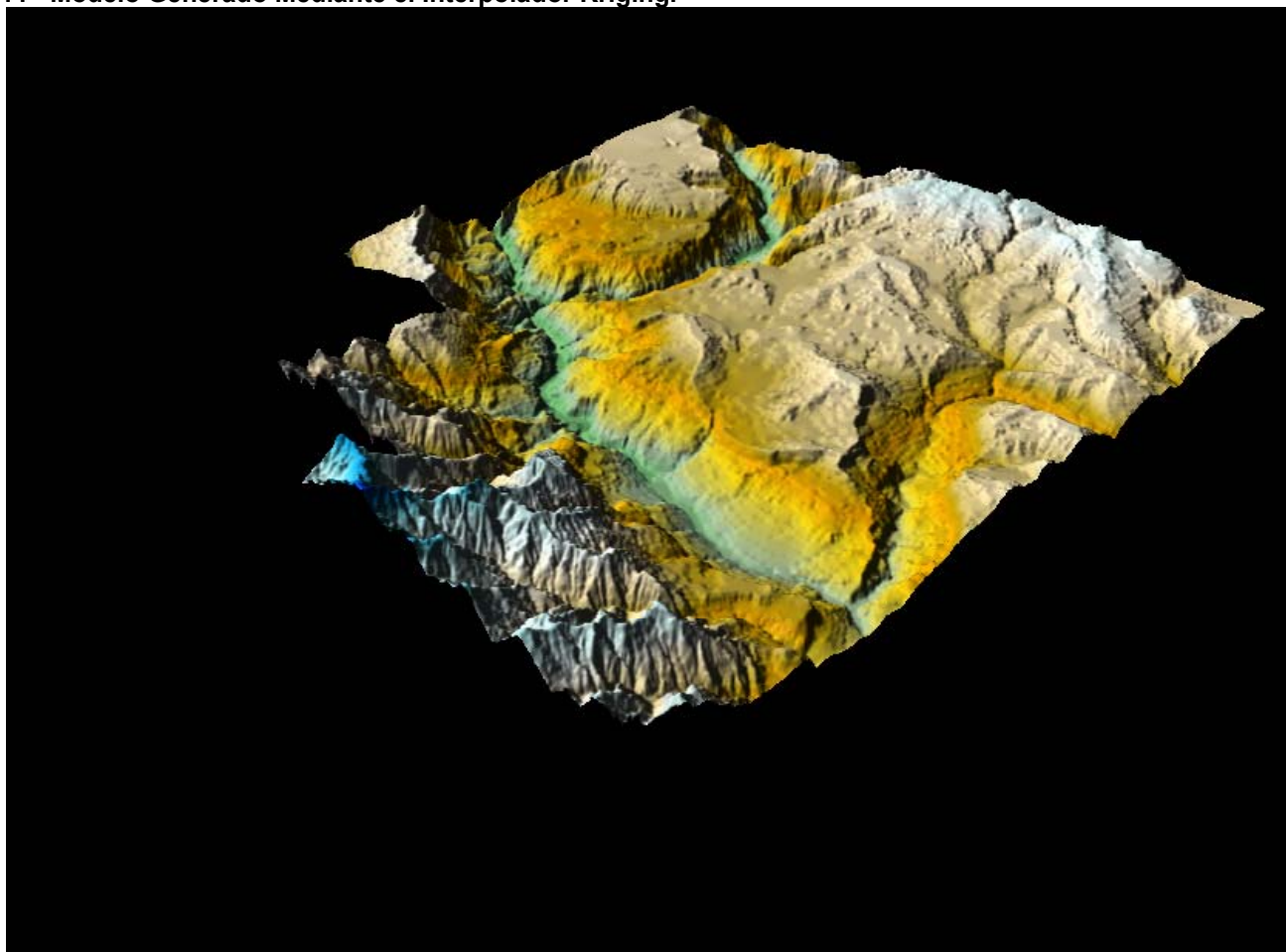
Fuente: Surfer 8

Figura B 10 Modelo Generado Mediante el Interpolador FBR Thin Plate Spline.



Fuente: Surfer 8

Figura B 11 Modelo Generado Mediante el Interpolador Kriging.



Fuente: Surfer 8

## ANEXO C

Tabla C 1 Puntos que se tomaron de la Zona con Ayuda de un GPS de precisión marca Trimble

<b>ARATOCA - SAN GIL</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
entrada a Aratoaca	1117563.29500	1232614.89900	1744.375
avs135061	1117556.98100	1232399.72800	1760.882
avs135062	1117385.065	1232215.849	1772.13
avs135063	1116762.3000	1231673.226	1888.05
avs135064	1108947.6200	1220932.562	1449.593
<b>BARICHARA GUANE</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
Entrada Cabrera	1091836.617	1220983.625	975.989
1er punto parque	1091959.157	1220935.276	984.226
2do punto parque cabrera	1091941.383	1220884.507	983.661
3er punto parque cabrera	1091880.531	1220895.533	978.759
4to punto parque cabrera	1091903.849	1220956.285	979.709
estación de policía cabrera	1091895.306	1220948.201	979.17
iglesia cabrera	1091925.334	1220880.628	984.004
<b>BARICHARA GUANE</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
extremo puente final hacia galán	1089587.888	1224232.352	516.39
bgc135051	1089710.388	1224231.31	500.493
cota del río Suárez	1089707.017	1224230.093	500.189
quebrada Barichara	1092351.766	1223991.101	682.778
bgc135049	1091956.065	1224280.85	707.061
bgc135048	1092029.67	1226107.831	830.053
bgc135047	1092092.99	1226645.071	868.889
bgc135044	1093905.068	1225424.421	1315.258
bgc135045	1094028.997	1225692.078	1268.673
bgc135046	1094345.315	1226753.348	1190.501
entrada guane	1092557.201	1230167.787	1032.66
1er punto parque guane	1092622.047	1230356.999	1019.803
2do punto parque guane	1092571.955	1230359.485	1019.95
3er punto parque guane	1092572.56	1230315.752	1018.615
iglesia guane	1092595.472	1230297.982	1017.561
museo paleontológico	1092628.89	1230329.263	1021.43
<b>CABRERA SAN GIL</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
bgs135022	1093375.501	1215432.125	1232.724
bgs135023	1094185.787	1215623.646	1272.098
bgs135052	1095073.7	1216038.919	1245.608
quebrada ojo de agua	1100744.721	1217508.536	1071.219
1er punto parque San Gil	1104380.691	1216744.432	1118.256
2do punto parque San Gil	1104341.298	1216681.993	1110.454
3er punto parque San Gil	1104414.023	1216631.15	1115.13
4to punto parque San Gil	1104456.735	1216707.743	1115.927

alcaldía San Gil	1104429.626	1216657.648	1113.411
iglesia San Gil	1104394.048	1216745.001	1116.742
<b>MINA UNO</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
aljibe	1101067.485	1230838.692	1451.803
avs135050	1099015.111	1234661.112	1216.014
avs135051	1099171.246	1234934.12	1136.83
avs135052	1097053.421	1238564.35	879.8
t kir kip	1097043.307	1238844.15	816.734
avs135053	1096985.951	1239200.925	751.256
a 400m unión ríos ch--su-so	1096724.759	1240185.645	394.232
ferry antiguo	1095954.471	1240388.126	342.678
<b>MINA ALMIRANTE</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
entrada mina almirante colon	1099368.086	1238230.309	575.656
avs 135 013	1099585.048	1237861.521	591.249
avs 135 055	1099578.438	1237614.319	634.391
Refugio Mina	1099333.294	1237500.735	713.438
avs135054	1098930.858	1237922.702	831.37
<b>VILLANUEVA JORDAN</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
avs135042	1103345.362	1229531.647	1545.243
avs135043	1103418.006	1229749.743	1558.096
escuela	1104910.486	1230355.866	1494.755
quebrada - macaregua	1105880.584	1229992.489	1461.427
quebrada - seca	1107289.24	1230802.531	1483.947
avs135044	1107922.84	1231032.301	1508.432
quebrada - la - laja	1110477.212	1229994.925	1568.917
avs135045	1110672.064	1230534.59	1586.917
quebrada - laja1	1110936.802	1231242.175	1475.152
avs135024	1109518.725	1232464.499	1369.997
avs13046	1109148.144	1232641.418	1346.961
avs135047	1108409.713	1233600.399	1221.95
avs135048	1108632.367	1233626.236	1202.054
Escuela jordán nuestra señora	1108550.307	1236344.328	444.472
Estación hidrométrica JORDAN	1108554.081	1236414.472	444.734
Iglesia - JORDAN	1108568.32	1236343.847	443.602
Registaduría - JORDAN	1108581.454	1236353.635	444.008
<b>VILLANUEVA BARICHARA</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
quebrada el junco	1098426.658	1228294.909	1457.673
escuela nueva rural cauchos	1097074.089	1227222.126	1409.804
iglesia Barichara	1094415.063	1225669.959	1291.193
1er punto parque barichara	1094480.414	1225653.036	1284.858
2do punto parque Barichara	1094487.389	1225593.184	1281.384
3er punto parque barichara	1094413.712	1225591.885	1283.358
4 punto parque barichara	1094411.601	1225647.482	1286.33

alcaldía barichara	1094399.935	1225624.637	1285.958
colegio barichara	1094425.744	1225579.055	1279.228
<b>VILLANUEVA ARATOCA</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
presa la laja	1112261.807	1229419.926	1644.582
escuela san Ignacio de la laja	1111787.972	1229728.379	1672.001
iglesia aratoca	1117081.176	1232139.826	1765.243
1er punto parque aratoca	1117095.991	1232204.97	1759.474
2do punto parque aratoca	1117040.233	1232193.939	1758.543
3er punto parque aratoca	1117050.926	1232148.832	1764.763
4 punto parque aratoca	1117104.308	1232158.634	1764.591
alcaldía aratoca	1117049.945	1232203.319	1756.394
<b>VILLANUEVA</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
iglesia Villanueva	1099756.654	1229669.237	1460.006
alcaldía Villanueva	1099667.991	1229641.919	1455.938
1er punto parque Villanueva	1099704.765	1229683.135	1459.319
2do punto parque Villanueva	1099667.59	1229620.227	1456.063
3er punto parque Villanueva	1099673.195	1229607.685	1456.954
4to punto parque Villanueva	1099727.113	1229578.483	1457.491
5to punto parque Villanueva	1099768.575	1229648.139	1462.459

DEM Definitivo Mesa de Barichara

