

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**REPRESENTACIÓN GEOGRÁFICA 3D DE LA CONTAMINACIÓN DEL  
AIRE EN ALGUNOS SECTORES DE LA CAPITAL GUATEMALTECA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR:

**KARLA MELISSA GARCÍA BARNEOND**  
ASESORADO POR EL ING. HECTOR ALBERTO H. MENDÍA ARRIOLA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERA EN CIENCIAS Y SISTEMAS**

GUATEMALA, FEBRERO DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortiz De León
VOCAL V	Br. José Alfredo Ortiz Herincx
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Floriza Ávila Pesquera de Medinilla
EXAMINADORA	Inga. Sonia Yolanda Castañeda Ramírez
EXAMINADOR	Ing. Marlon Antonio Pérez Türk
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**REPRESENTACIÓN GEOGRÁFICA 3D DE LA CONTAMINACIÓN DEL  
AIRE EN ALGUNOS SECTORES DE LA CAPITAL GUATEMALTECA,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas, con fecha abril de 2009.



**Karla Melissa García Bameond**

Guatemala, 03 de Noviembre de 2009

Ing. Carlos Azurdia  
Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Respetable Ingeniero:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que he revisado a detalle y apruebo el trabajo de graduación realizado por la estudiante **Karla Melissa García Barneond**, quien se identifica con el carnet número 2001-13091, y cuyo título es **“Representación geográfica 3D de la contaminación del aire en algunos sectores de la capital guatemalteca”**.

Sin otro particular, me suscribo atentamente,



Ing. Héctor Méndez  
Cel. 5509-3177



Universidad San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas

Guatemala, 11 de Noviembre de 2009

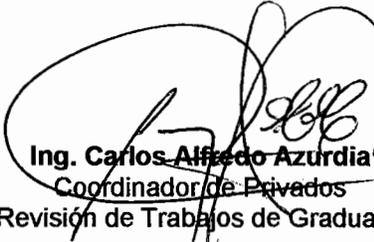
Ingeniero  
**Marlon Antonio Pérez Turk**  
Director de la Escuela de Ingeniería  
En Ciencias y Sistemas

Respetable Ingeniero Pérez:

Por este medio hago de su conocimiento que he revisado el trabajo de graduación del estudiante **KARLA MELISSA GARCIA BARNEOND**, titulado: **“REPRESENTACION GEOGRAFICA 3D DE LA CONTAMINACION DEL AIRE EN ALGUNOS SECTORES DE LA CAPITAL GUATEMALTECA”**, y a mi criterio el mismo cumple con los objetivos propuestos para su desarrollo, según el protocolo.

Al agradecer su atención a la presente, aprovecho la oportunidad para suscribirme,

Atentamente,

  
**Ing. Carlos Alfredo Azurdia**  
Coordinador de Privados  
y Revisión de Trabajos de Graduación



E  
S  
C  
U  
E  
L  
A  
  
D  
E  
  
C  
I  
E  
N  
C  
I  
A  
S  
  
Y  
  
S  
I  
S  
T  
E  
M  
A  
S

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE CIENCIAS Y SISTEMAS

TEL: 24767644

*El Director de la Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor con el visto bueno del revisor y del Licenciado en Letras, de trabajo de graduación titulado **“REPRESENTACIÓN GEOGRÁFICA 3D DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN ALGUNOS SECTORES DE LA CAPITAL GUATEMALTECA”**, presentado por la estudiante **KARLA MELISSA GARCÍA BARNEOND**, aprueba el presente trabajo y solicita la autorización del mismo.*

**“ID Y ENSEÑAD A TODOS”**

Ing. Marlon Antonio Pérez Turck  
Director, Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas



Guatemala, 05 de febrero 2010



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería en Ciencias y Sistemas, al trabajo de graduación titulado: **REPRESENTACIÓN GEOGRÁFICA 3D DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN ALGUNOS SECTORES DE LA CAPITAL GUATEMALTECA**, presentado por la estudiante universitaria **Karla Melissa García Barneond**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
DECANO



Guatemala, febrero de 2010

/gdech

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	V
<b>GLOSARIO</b> .....	IX
<b>RESUMEN</b> .....	XIII
<b>OBJETIVOS</b> .....	XV
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	XVII
<b>1 TERMINOLOGÍA BÁSICA</b> .....	1
1.1. Sistema de información geográfica (SIG).....	1
1.1.1. Definición.....	1
1.1.2. Vistas de un SIG.....	2
1.1.2.1. Vista como base de datos.....	2
1.1.2.2. Vista como mapa (Geovisualización).....	4
1.1.2.3. Vista como modelo.....	6
1.1.3. Importancia de SIG.....	7
1.1.4. ¿Qué se puede hacer con un SIG?.....	7
1.1.4.1. Mapear en dónde están las cosas.....	7
1.1.4.2. Mapear cantidades.....	8
1.1.4.3. Mapear densidades.....	8
1.1.4.4. Encontrar qué hay dentro.....	9
1.1.4.5. Encontrar qué esta cerca.....	9
1.1.4.6. Mapear los cambios.....	9
1.2. Datos georeferenciados.....	10
1.2.1. Datos vectoriales.....	10
1.2.2. Datos <i>raster</i> .....	12
1.2.3. Red de triángulos irregulares ( <i>TIN</i> ).....	14
1.3. Referencia espacial.....	14
1.3.1. Sistema de coordenadas.....	15
1.3.1.1. Sistema de coordenadas geográficas.....	15

1.3.1.2.	Sistema de coordenadas proyectadas.....	15
1.3.1.3.	Sistema de coordenadas verticales .....	16
1.3.2.	Resolución .....	17
1.3.3.	Tolerancia .....	18
<b>2.</b>	<b>GRÁFICAS PARA ANÁLISIS EN 3D .....</b>	<b>19</b>
2.1.	Diferentes conceptos entre 3D y 2D.....	19
2.1.1.	Tipos de capas 3D .....	19
2.1.1.1.	Capas flotantes .....	20
2.1.1.2.	Capas cubiertas .....	20
2.1.1.3.	Capas de elevación .....	20
2.2.	Visualización de elementos en 3D .....	21
2.3.	Creación de vistas 3D .....	22
2.3.1.	Prioridades de las capas en 3D .....	22
2.4.	Interpolación.....	23
2.4.1.	Métodos de interpolación .....	25
2.4.1.1.	<i>Inverse distance weighted (IDW)</i> .....	25
2.4.1.2.	<i>Spline</i> .....	26
2.4.1.3.	<i>Kriging</i> .....	27
2.4.1.4.	<i>Trend surface analysis</i> .....	28
2.4.1.5.	<i>Natural neighbors</i> .....	29
2.4.1.6.	Triangulación .....	29
<b>3.</b>	<b>CASO DE ESTUDIO: CONTAMINACIÓN DEL AIRE.....</b>	<b>31</b>
3.1.	Introducción.....	31
3.2.	Monitoreo del aire.....	31
3.3.	Herramienta a utilizar .....	33
3.4.	Carga de datos.....	34
3.5.	Interpolación de los datos.....	41
3.6.	Representación de resultados en 3D .....	56
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>65</b>
	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>67</b>

<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>69</b>
---------------------------	-----------



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1. Las tres vistas de un SIG .....	2
2. Terrenos y otras superficies.....	3
3. Capas temáticas .....	4
4. Geovisualización.....	5
5. Puntos.....	11
6. Línea.....	11
7. Polígono .....	12
8. Celda .....	12
9. Ejemplo <i>Raster</i> .....	13
10. TIN .....	14
11. Proyección .....	16
12. Resolución .....	18
13. Visualización de elementos 3D .....	22
14. Interpolación .....	24
15. Puntos interpolados .....	24
16. IDW .....	26
17. <i>Kriging</i> .....	28
18. Datos tabulados .....	34
19. Creando un nuevo mapa .....	35
20. Botón " <i>add data</i> " .....	36
21. Selección de datos a agregar .....	36
22. Opción " <i>display XY data</i> " .....	37
23. Especificación de coordenadas XY.....	38
24. Edición del sistema de coordenadas .....	38

25. Selección del sistema de coordenadas .....	39
26. Sistema "WGS 1984".....	39
27. Aceptando la selección.....	40
28. Puntos de muestreo georeferenciados .....	41
29. Opción "IDW" .....	42
30. Activación menú "spatial analyst" .....	42
31. IDW "input points".....	43
32. IDW "z value field".....	43
33. IDW "power" .....	43
34. IDW "search radius type".....	44
35. IDW "search radius settings" .....	44
36. IDW "use barrier polylines" .....	44
37. IDW "output cell size" .....	45
38. IDW "output raster" .....	45
39. Interpolación con visualización por clases.....	46
40. Interpolación con visualización continua.....	46
41. Botón "add data" .....	56
42. Ventana "add data".....	57
43. Ejemplo de perspectivas en "ArcScene".....	57
44. Accediendo las propiedades.....	58
45. Pestaña "base heights".....	58
46. Opción "obtain heights for layer from surface:".....	58
47. Opción "z unit conversion".....	59
48. Gráfica 3D generada .....	59
49. Promedios anuales año 2002 al 2008 .....	60
50. Promedios anuales año 1995 al 2001 .....	61
51. Valores mensuales año 2008 (julio – noviembre).....	62
52. Valores mensuales año 2008 (enero – junio) .....	63

## TABLAS

I.	Interpolación promedio anual .....	47
II.	Resultados interpolación año 2007 .....	50
III.	Resultados interpolación año 2008 .....	53



## GLOSARIO

<b>Ajuste de curvas</b>	Es el proceso de construir una curva o función matemática, que tiene el mejor ajuste para una serie de puntos de datos, posiblemente sujetos de restricciones.
<b>Capa</b>	En SIG, el término hace referencia a capa temática de datos vectorial o <i>raster</i> .
<b><i>Datum</i></b>	Especificaciones de referencia de un sistema de medidas, usualmente un sistema de posiciones de coordenadas sobre una superficie.
<b><i>Datum geodésico</i></b>	<i>Datum</i> que es la base para calcular posiciones en la superficie de la tierra o alturas por encima o debajo de la superficie de la tierra.
<b>Esferoide</b>	Figura tridimensional obtenida al rotar una elipse sobre su eje menor, resultando en una esfera achatada por los polos o su eje mayor, resultando en una esfera alargada.
<b>Georeferenciación</b>	Alineación geográfica de datos a un sistema de coordenadas conocido para que puedan ser vistos, consultados y analizados con otros datos geográficos.

<b>Mapa planimétrico</b>	Un mapa que muestra únicamente ubicaciones X, Y de las características y representa únicamente distancias horizontales.
<b>Meridiano</b>	Círculo imaginario que pasa alrededor de la tierra a través de sus polos. Conocido también como longitud.
<b>Método de interpolación determinista</b>	Basado directamente en los valores medidos alrededor o en una fórmula matemática específica que determina la suavidad de la superficie resultante.
<b>Método de interpolación geoestadístico</b>	Basado en un modelo estadístico que incluye autocorrelación.
<b>Planimétrico</b>	Bidimensional; que no muestra relieve.
<b>Proyección de mapa</b>	Método por el cual la superficie curva de la tierra es proyectado a una superficie plana.
<b><i>Raster</i></b>	Modelo de datos geográfico que representa la información a través de una malla regular de tipo mosaico, donde cada celda (píxel) es la unidad mínima de información que lleva asociado un valor.
<b><i>Spline</i></b>	Función polinomial utilizada para aproximar una curva suave a una línea o superficie.

<b>Vector</b>	Modelo de datos basados en coordenadas que representa características geográficas como puntos, líneas y polígonos.
<b>Variograma</b>	Función de la distancia y la dirección de separación de dos ubicaciones que es utilizada para cuantificar la dependencia. Es definido como la varianza de la diferencia entre dos variables en dos ubicaciones. Generalmente aumenta con la distancia y es descrito por un rango de parámetros. Si los datos son estacionarios, entonces el variograma y la covarianza están teóricamente relacionados entre sí.



## **RESUMEN**

Los sistemas de información geográficos permiten visualizar, consultar y analizar datos representados en sus ubicaciones geográficas reales, haciendo más sencillo percibir patrones o características de dichos datos que estando simplemente tabulados no eran evidentes.

La representación geográfica de los fenómenos continuos, tal como la contaminación ambiental, ayuda a visualizar de forma sencilla el estado de dicho fenómeno para determinadas ubicaciones.

Al comprender con mayor facilidad los datos representados geográficamente, se facilita y mejora la toma de decisiones, tanto para tomar acciones preventivas o correctivas.

El presente trabajo evidencia la mejora en la percepción y la comprensión de los datos tabulados, comparados con la representación geográfica tridimensional de los mismos. Y hace notar la importancia que tienen los sistemas de información geográficos para el análisis de datos a través del tiempo.



## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Describir el proceso de cómo generar la representación geográfica 3D de datos que describan la concentración de la contaminación del aire en algunos sectores de la capital guatemalteca. De igual forma, generar dicha representación geográfica.

### **ESPECÍFICOS:**

1. Proporcionar una guía de la terminología básica y procesos de los Sistemas de Información Geográfica y la generación de superficies georeferenciadas.
2. Evidenciar la facilidad que proporcionan las gráficas geográficas para la comprensión de datos en diferentes áreas de la ciencia a través de un caso de estudio del medio ambiente.
3. Representar geográficamente a través de gráficas tridimensionales la contaminación del aire, debido a la concentración de NO<sub>2</sub> en algunos sectores de la capital guatemalteca de al menos un año.



## INTRODUCCIÓN

La interpretación de datos se facilita enormemente si dichos datos son representados en una gráfica. En esto radica la importancia de representar los datos a través de gráficas que expresen toda la información que de otra manera ocuparía un buen espacio en redacción o tablas de datos que requiere más tiempo para entender e interpretar.

Las densidades poblacionales, los índices de violencia, las concentraciones de vegetación o la densidad de la contaminación, son ejemplos de datos cuya representación geográfica favorece y facilita su comprensión, manipulación y consulta.

Los sistemas de información geográficos proveen las herramientas necesarias para realizar la representación geográfica de datos; permitiendo localizarlos en su ubicación real a través de sus coordenadas.

El presente trabajo de graduación explica la terminología básica de un sistema de información geográfica, los métodos de interpolación (utilizados para predecir valores a partir de puntos de muestra) y el proceso para generar gráficas tridimensionales que brinden una mejor visualización de los datos, permitiendo así comprenderlos más fácilmente y en menor tiempo.



# 1 TERMINOLOGÍA BÁSICA

## 1.1. Sistema de información geográfica (SIG)

### 1.1.1. Definición

Un SIG (Sistema de Información Geográfica) o GIS (Geographic Information System, de sus siglas en inglés) es un sistema que integra hardware computacional, software y datos geográficos para capturar, administrar, analizar y mostrar todas las formas de la información geográficamente referenciada.<sup>1</sup>

SIG permite ver, entender, preguntar, interpretar y visualizar datos en muchas formas que revelan relaciones, patrones y tendencias en la forma de mapas, globos terráqueos, reportes y gráficos.

Utilizando un sistema de información geográfica (SIG) es posible enlazar información (atributos) con datos localizados. Por ejemplo, personas con direcciones, construcciones con parcelas o las calles dentro de una ciudad.

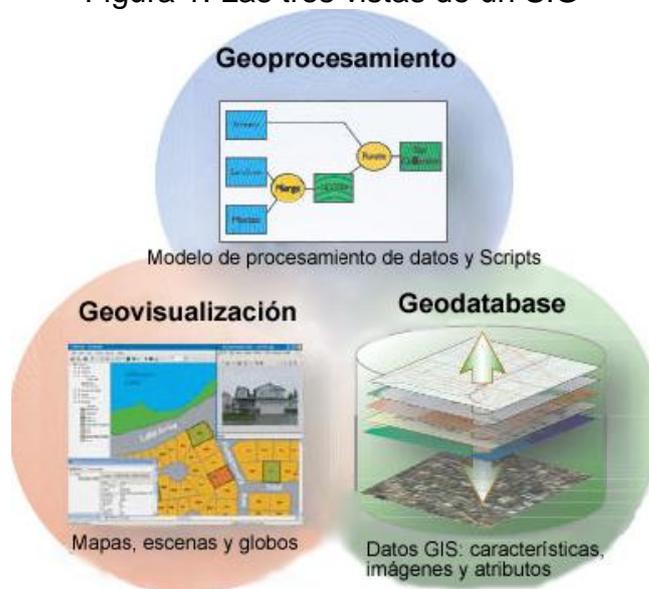
---

<sup>1</sup> GIS Web Site, *What is GIS*, <http://www.gis.com>, abril 2009

## 1.1.2. Vistas de un SIG

Un SIG es regularmente asociado con un mapa. Sin embargo, un mapa es únicamente una de las formas de trabajar con datos geográficos en SIG. Un SIG puede ser visto de tres formas: como base de datos, como mapa y como modelo.

Figura 1. Las tres vistas de un SIG<sup>2</sup>



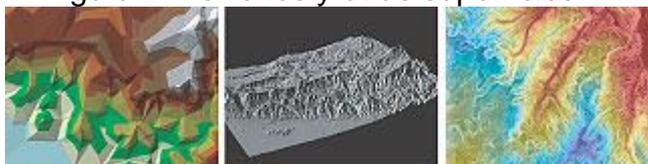
### 1.1.2.1. Vista como base de datos

La vista de base de datos es representada por medio de una base de datos geográfica llamada geodatabase. Un SIG es un tipo único de base de datos en el mundo basado en una base de datos estructurada que describe el mundo en términos geográficos.

<sup>2</sup> ESRI Web Help for ArcGIS Desktop 9.3, *Three GIS views*, <http://webhelp.esri.com>, abril 2009

Cada conjunto de datos en un SIG provee una representación geográfica de algún aspecto del mundo incluyendo: colecciones ordenadas de características basadas en vector tales como conjuntos de puntos, líneas y polígonos (las parcelas comúnmente son representadas como polígonos y las calles como líneas); conjuntos de datos *Raster* como modelos digitales de elevaciones y conjuntos de imágenes; terrenos y otras superficies; redes geométricas; conjuntos de datos de mediciones; y otra información geográfica como direcciones, nombres de lugares, modelos de geoprocésamiento e información cartográfica.

Figura 2. Terrenos y otras superficies<sup>3</sup>



Además de las representaciones geográficas, el conjunto de datos de un SIG incluye atributos tabulares tradicionales que describen los objetos geográficos.

Las relaciones espaciales tales como topologías y redes geométricas son también parte importante de las bases de datos de los SIG.

La topología es utilizada para administrar los límites comunes entre características, definir y hacer cumplir las reglas de integridad de los datos, y soportar las consultas topológicas y la navegación.

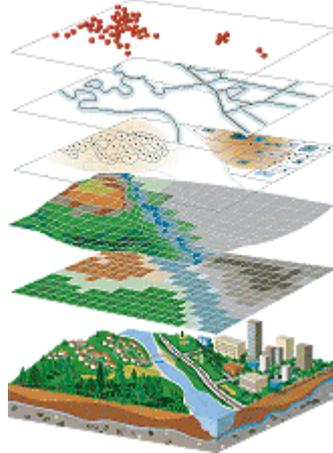
Las redes geométricas describen un gráfico conectado de objetos SIG que pueden ser atravesados. Esto es importante para poder modelar patrones de caminos y navegación para transportación, oleoductos, hidrología y muchas otras aplicaciones basadas en redes geométricas.

---

<sup>3</sup> ESRI Concepts, *GIS data*, <http://www.esri.com>, abril 2009

Un SIG organiza los datos geográficos en una serie de capas temáticas y tablas. Las colecciones homogéneas de objetos geográficos son organizadas en capas. Por ejemplo, parcelas, construcciones, conjuntos de imágenes ortográficas y modelos digitales de elevación basados en datos *Raster*.

Figura 3. Capas temáticas <sup>4</sup>



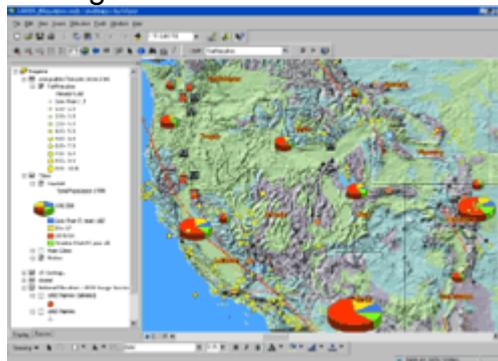
### 1.1.2.2. Vista como mapa (Geovisualización)

SIG es un conjunto de mapas inteligentes y otras vistas que muestran características y sus relaciones en la superficie de la tierra. Varias vistas de mapa con información geográfica relevante, pueden ser construidas y utilizadas para observar la información de la base de datos por medio de consultas, análisis y edición de la información. Esto es llamado geovisualización.

---

<sup>4</sup> GIS Website, *Why to use GIS*, <http://gis.com>, abril 2009

Figura 4. Geovisualización<sup>5</sup>



La geovisualización trata sobre trabajar con mapas y otras vistas de la información geográfica. Incluidos los mapas interactivos, las escenas 3D, gráficos y tablas, vistas basadas en el tiempo, y vistas esquemáticas de relaciones de redes geométricas.

Los mapas son utilizados para transmitir información geográfica tanto así como realizar varias tareas incluyendo compilación avanzada de datos, cartografía, análisis, consultas y recopilación de datos de campo.

Los mapas SIG en comparación con los mapas impresos, proveen la ventaja de poder interactuar con ellos. Es posible acercarse y alejarse en los mapas interactivos en los cuales las capas se activan y desactivan dependiendo de la escala. También, aplicar símbolos a una capa de un mapa basándose en cualquier conjunto de atributos. Por ejemplo, se pueden sombrear las parcelas con colores basados en su zona o en su nivel de producción. Así mismo, apuntar a objetos geográficos en los mapas interactivos para obtener más información acerca de los objetos y realizar consultas y análisis espacial.

Además de los mapas existen otras vistas interactivas. Tales como temporales, globos y dibujos esquemáticos. Estos son utilizados como vistas dentro de las bases de datos SIG.

---

<sup>5</sup> <http://www.esri.com/software/arcgis/concepts/geovisualization.html>

### **1.1.2.3. Vista como modelo**

SIG es un conjunto de herramientas de transformación de información que derivan nuevos conjuntos de datos geográficos a partir de conjuntos de datos existentes. Estas funciones de geoprocésamiento toman información de conjuntos de datos existentes, aplican funciones analíticas y escriben los resultados dentro de nuevos conjuntos de datos derivados. Combinando datos y aplicando algunas reglas analíticas se puede crear un modelo que ayude a obtener respuestas a preguntas dadas.

El geoprocésamiento se refiere a las herramientas y procesos utilizados para generar conjuntos de datos derivados. Los conjuntos de datos pueden representar mediciones sin procesar, información interpretada y compilada por analistas o información derivada de otras fuentes de datos utilizando algoritmos de análisis y modelado.

SIG incluye un conjunto de herramientas para trabajar con y procesar información geográfica. Esta colección de herramientas es utilizada para operar en objetos de información SIG tales como conjuntos de datos, campos de atributos, y elementos cartográficos para mapas impresos. Juntos, estos comandos y los objetos de datos forman la base para un enriquecido framework de geoprocésamiento.

El framework de geoprocésamiento en un SIG es utilizado para mantener juntas una serie de operaciones que derivan nuevos datos de datos existentes. Mantener juntas las secuencias de operaciones forma un modelo de procesos que es utilizado para automatizar y registrar numerosas tareas de geoprocésamiento en el SIG. La aplicación y construcción de dichos procesos es lo que llamamos geoprocésamiento.

### **1.1.3. Importancia de SIG**

La integración de datos geográficos permite analizar la información generada, para hacer negocios críticos y tomar decisiones relacionadas con la planificación.

SIG puede integrar y relacionar cualquier conjunto de datos con un componente espacial sin importar la fuente de los datos. Por ejemplo, se puede localizar la ubicación de los trabajadores ambulantes, localizados en tiempo real por medio de dispositivos GPS, en relación de las casas de los clientes, localizados por dirección y derivados de la base de datos de clientes. SIG mapea estos datos dando a los despachadores o mensajeros una herramienta visual para la mejor ruta para movilizarse o enviar al trabajador más cercano al cliente. Esto ayuda a ahorrar una gran cantidad de tiempo y dinero.

Además de proveer información importante del estado actual de las cosas, SIG puede proveer información de cómo las cosas estarán en el futuro. Esto basándose en los cambios que se hayan aplicado.

### **1.1.4. ¿Qué se puede hacer con un SIG?**

Un SIG puede ser utilizado para realizar distintos propósitos. Estos se listan a continuación:

#### **1.1.4.1. Mapear en dónde están las cosas**

Mapear en dónde están las cosas permite encontrar lugares que tienen las características que se buscan y ver en dónde tomar determinada acción.

Se pueden buscar características y patrones:

- ✓ Encontrar una característica: los mapas pueden ser utilizados para ver cuál es una característica o ver en dónde está.
  
- ✓ Encontrando patrones: a través de la observación de la distribución de las características en el mapa en vez de únicamente observar una característica de forma individual, se puede encontrar patrones.

#### **1.1.4.2. Mapear cantidades**

El mapeo de cantidades sirve para encontrar lugares que cumplen con un criterio y poder tomar una acción o para ver las relaciones entre lugares. Esto provee un nivel adicional de información que va más allá de simplemente la ubicación de ciertas características. Por ejemplo, mapear el número de doctores que hay por cada mil personas en determinadas regiones para poder analizar en que áreas hace falta incrementar algún tipo de servicio.

#### **1.1.4.3. Mapear densidades**

Un mapa de densidades permite medir el número de características utilizando una unidad uniforme por área, tales como acres o millas cuadradas. Esto permite ver claramente la distribución de las características cuando estas son muchas.

Mapear densidades es especialmente útil cuando se mapean áreas, tales como conteos de censos.

#### **1.1.4.4. Encontrar qué hay dentro**

SIG permite controlar qué está pasando y tomar acciones específicas para mapear qué hay dentro de un área específica.

#### **1.1.4.5. Encontrar qué está cerca**

Mapear lo que está cerca permite encontrar que está ocurriendo dentro de un conjunto de distancias de alguna característica.

#### **1.1.4.6. Mapear los cambios**

Mapear los cambios en un área para anticipar las condiciones futuras, decidir el curso de una acción, o evaluar los resultados de una acción o política.

Al mapear dónde y cómo las cosas se mueven en un período de tiempo se puede comprender su comportamiento. Por ejemplo, un meteorólogo puede estudiar los patrones de los huracanes para predecir dónde y cuándo podrían ocurrir en el futuro.

Mapear los cambios puede anticipar las necesidades futuras. Por ejemplo, un policía puede estudiar cómo cambian los patrones del crimen mes a mes para poder decidir en dónde son necesarios otros oficiales.

Mapear condiciones antes y después de una acción o evento para ver el impacto. Por ejemplo, un analista de ventas puede mapear los cambios en las ventas de la tienda antes y después de una campaña de avisos publicitarios para ver dónde fueron más efectivos los anuncios publicitarios.

## 1.2. Datos georeferenciados

SIG maneja diferentes tipos de datos para representar las diferentes características del mundo real. A continuación se describen dichos tipos de datos.

### 1.2.1. Datos vectoriales

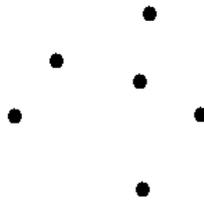
Son utilizados para representar características geográficas que pueden ser cosas ubicadas cerca de la tierra o sobre la superficie de la tierra. Ésta representación es comúnmente realizada a partir de puntos, líneas y polígonos.

Las características geográficas pueden ser naturales (ríos, vegetación), construcciones (camino, tuberías, edificios) o subdivisiones de tierra (ciudades, divisiones políticas, parcelas).

La principal característica de los datos vectoriales es el almacenamiento de coordenadas en dos o tres dimensiones, a través de un formato de números decimales de alta precisión.

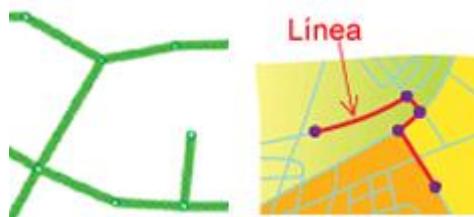
- ✓ **Punto:** Es la representación más elemental. Corresponde a un solo grupo de coordenadas que describen una posición única en el espacio. Define ubicaciones discretas de características geográficas muy pequeñas como para ser representadas con líneas o áreas (pozos, postes telefónicos, direcciones, coordenadas GPS, o picos de montañas).

Figura 5. Puntos<sup>6</sup>



- ✓ **Línea:** Se representa con las coordenadas de un punto inicial, vértices intermedios y un punto final. Representa la forma y ubicación de objetos geográficos que son muy estrechos como para representar un área (calles y ríos). La línea también representa características geográficas que tienen longitud pero no tienen área (líneas de contorno y límites administrativos).

Figura 6. Línea<sup>7</sup>

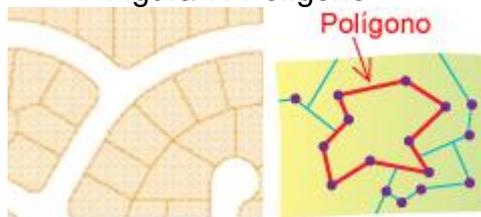


- ✓ **Polígono:** Es un conjunto de puntos continuos que describen una superficie cerrada. Su principal característica es que el punto inicial tiene las mismas coordenadas del punto final. Los polígonos representan formas y ubicaciones de características homogéneas tales como estados, ciudades, parcelas, tipos de tierra, y zonas de uso de la tierra.

<sup>6</sup> ESRI Web help, *Elements of geographic information*, <http://webhelp.esri.com>, abril 2009

<sup>7</sup> ESRI Dictionary, *Line*, <http://support.esri.com>, abril 2009

Figura 7. Polígono<sup>8</sup>

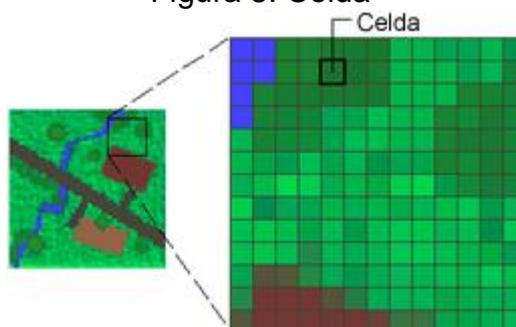


### 1.2.2. Datos *raster*

Un *Raster* consiste en una matriz de celdas o píxeles organizados en filas y columnas (o un cuadrículado) donde cada celda contiene un valor que representa información, tal como temperatura.

Los datos *Raster* son fotografías digitales aéreas, conjuntos de imágenes satelitales, imágenes digitales e incluso mapas escaneados.

Figura 8. Celda<sup>9</sup>



Los datos Raster representan fenómenos del mundo real, tales como: datos temáticos o discretos, representan características tales como el uso de la tierra; datos continuos, representan fenómenos tales como temperatura, elevación o datos espectrales tales como imágenes satelitales o fotografías aéreas; imágenes tales como mapas escaneados o dibujados y fotografías de edificios.

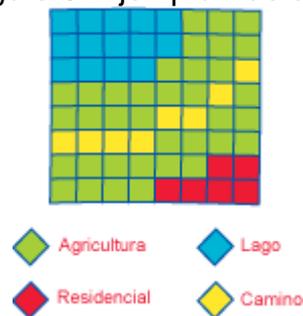
<sup>8</sup> ESRI Dictionary, *Polygon*, <http://support.esri.com>, abril 2009

<sup>9</sup> ESRI Web help, *What is Raster data*, <http://webhelp.esri.com>, mayo 2009

Los valores de la celda en los datos *Raster* pueden ser positivos o negativos, enteros o de punto flotante. Los valores enteros son utilizados para representar datos discretos, y los valores de punto flotante para representar superficies continuas. Las celdas pueden tener incluso un valor *NoData* para representar la ausencia de datos.

El área o superficie representada por cada celda consiste en el mismo ancho y alto, y es una porción igual de la superficie completa representada por el *Raster*. Las dimensiones de las celdas pueden ser tan grandes o tan pequeñas como sea necesario para representar una superficie dada y sus características.

Figura 9. Ejemplo *Raster*<sup>10</sup>



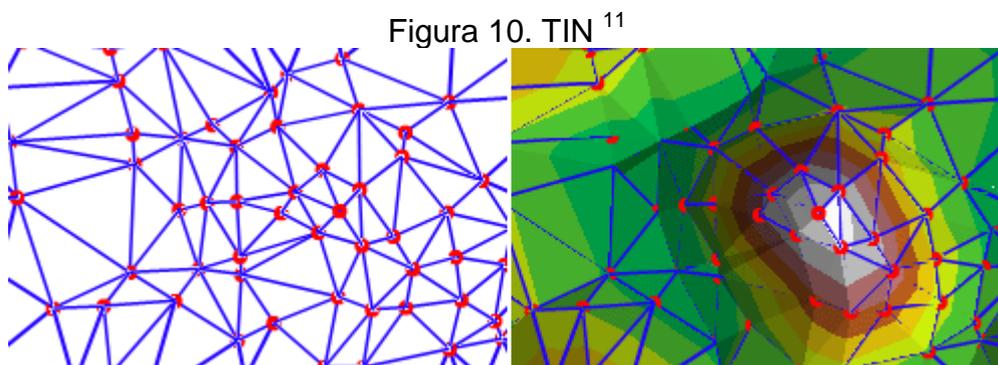
El tamaño de las celdas determina que tan grueso o fino aparecerán los patrones o características del *Raster*. Mientras más pequeño sea el tamaño de la celda más detallada será el *Raster*. Sin embargo, a mayor número de celdas mayor procesamiento e incremento de la demanda de espacio de almacenamiento.

El consumo de memoria de los datos *Raster* es proporcional al tamaño de la matriz que los representa y no a la diversidad y distribución de los datos dentro de ella. Esta propiedad los hace adecuados para representar características que varían suavemente en el espacio.

<sup>10</sup> ESRI Dictionary, *Raster*, <http://support.esri.com>, mayo 2009

### 1.2.3. Red de triángulos irregulares (*TIN*)

Las *TINs* (*Triangle Irregular Network*, por sus siglas en inglés) son datos geográficos digitales basados en vector y contruidos a través de la triangulación de un conjunto de vértices o puntos (nodos). Los vértices son unidos por medio de líneas para formar la red de triángulos. Dichos vértices además de poseer un valor en *X*, *Y* deben tener un valor en *Z*.



Una *TIN* almacena por cada triángulo que lo forma una serie de datos: el número de triángulo, el número de cada triángulo adyacente, los tres nodos que definen el triángulo, las coordenadas *X*, *Y* de cada nodo, el valor *Z* de cada nodo, y el tipo de borde de cada borde del triángulo (suave o duro).

### 1.3. Referencia espacial

Una referencia espacial describe en dónde están localizadas las características en el mundo real. La referencia espacial incluye un sistema de coordenadas para los valores *X*, *Y*, *Z* tanto como la tolerancia y la resolución de los valores *X*, *Y*, *Z* y *M*.

---

<sup>11</sup> ESRI Web help, *Working with TIN surfaces*, <http://webhelp.esri.com>, mayo 2009

### **1.3.1. Sistema de coordenadas**

Un sistema de coordenadas es un sistema de referencia utilizado para representar la ubicación de las características geográficas, conjuntos de imágenes, y observaciones tales como ubicaciones *GPS* dentro de un marco geográfico en común.

Las coordenadas  $X$ ,  $Y$  son georeferenciadas con un sistema de coordenadas geográficas o con un sistema de coordenadas proyectadas.

#### **1.3.1.1. Sistema de coordenadas geográficas**

Un sistema de coordenadas geográficas (*GCS*, Geographic Coordinate System) es un sistema global o esférico tal como latitud y longitud.

Está definido por un *datum*, una unidad angular de medida (usualmente grados), y un meridiano principal.

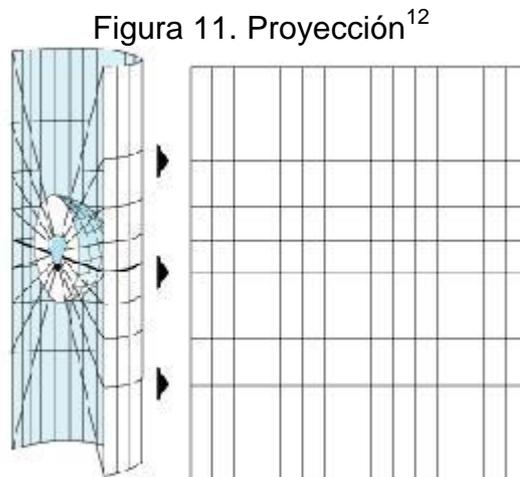
#### **1.3.1.2. Sistema de coordenadas proyectadas**

Un sistema de coordenadas proyectadas (*PCS*, Projected Coordinate System) está basado en una proyección de mapa que provee varios mecanismos para representar los mapas de la superficie esférica de la tierra en un plano de coordenadas cartesianas de dos dimensiones.

Consiste en varios elementos: una unidad lineal de medida (usualmente metros o pies), una proyección de mapa, los parámetros específicos utilizados por la proyección de mapa, y un sistema de coordenadas geográficas.

Una proyección de mapa proyecta sistemáticamente ubicaciones de la superficie de un esferoide a posiciones representativas en una superficie plana utilizando algoritmos matemáticos. Utiliza fórmulas matemáticas para relacionar las coordenadas esféricas de la tierra a coordenadas planas.

La representación de la superficie de un globo en dos dimensiones causa distorsión en la forma, área, distancia o dirección de los datos. Diferentes proyecciones causan diferente tipos de distorsiones.



Las proyecciones de mapa están diseñadas con propósitos específicos. Algunas proyecciones están diseñadas para minimizar la distorsión de una o dos características de los datos. Una proyección podría mantener el área de una característica pero alterar su forma.

### 1.3.1.3. Sistema de coordenadas verticales

Un sistema de coordenadas verticales es una propiedad opcional que puede tener un sistema de coordenadas geográficas o proyectadas.

---

<sup>12</sup> ESRI Web help, *About map projections*, <http://webhelp.esri.com>, mayo 2009

Un sistema de coordenadas verticales (VCS, Vertical Coordinate System) georeferencia valores  $Z$ , comúnmente utilizados para denotar elevaciones. Incluye un *geodetic* o *datum* vertical, una unidad lineal de medida, una dirección de eje y un cambio vertical.

### **1.3.2. Resolución**

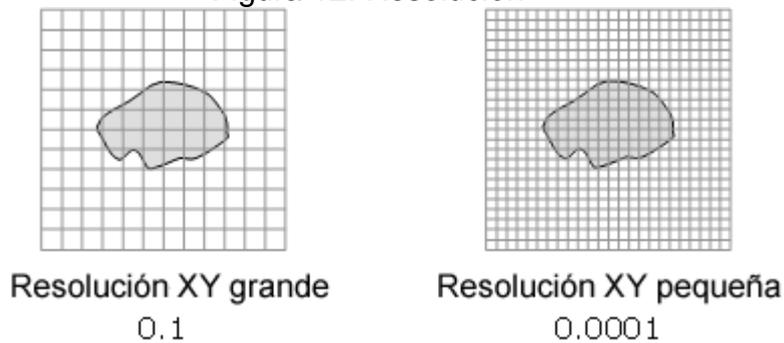
El valor de resolución representa el detalle o precisión con el que una clase de características registra la ubicación y forma de las características geográficas. Es la distancia mínima, en unidades de mapa, que separa valores únicos  $X$ ,  $Y$  en las coordenadas de la característica.

Por ejemplo, si una referencia espacial tiene una resolución  $XY$  de 0.01, entonces las coordenadas  $X$  1.22 y 1.23 pueden ser almacenadas como valores de coordenadas distintas; pero las coordenadas  $X$  1.222 y 1.223 son ambas almacenadas como 1.22. Los dígitos finales del segundo par de coordenadas  $X$  son truncados debido a que la diferencia del valor es menor a la resolución  $XY$ .

El valor de resolución utiliza las mismas unidades de medida que el sistema de coordenadas al que está asociado. Por ejemplo, si una referencia espacial está utilizando un sistema de coordenadas proyectadas con unidades de metros, el valor de resolución es definido en metros.

Las resoluciones  $XY$  con más dígitos de precisión almacenan las características de un polígono con mayor precisión y conservan su forma. Pero pueden tener un impacto en el desempeño en términos de uso excesivo de almacenamiento en disco e incremento de acceso al mismo.

Figura 12. Resolución <sup>13</sup>



### 1.3.3. Tolerancia

El valor de tolerancia es la distancia mínima entre coordenadas. Si una coordenada está dentro del valor de tolerancia de otra, se interpreta que están dentro de la misma ubicación.

Este valor es utilizado en operaciones relacionales y topológicas para determinar cuando dos puntos están lo suficientemente cerca para tener la misma coordenada o si están lo suficientemente separados para tener cada uno una coordenada diferente.

Diferentes valores de tolerancia pueden producir diferentes soluciones a las operaciones relacionales y topológicas. Por ejemplo, dos puntos pueden ser clasificados como no comunes si se tiene una tolerancia muy pequeña, pero una tolerancia mayor puede provocar que sean clasificados como coincidentes y asignados a la misma ubicación de coordenadas.

---

<sup>13</sup> ESRI Web help, *The properties of a spatial reference*, <http://webhelp.esri.com>, mayo 2009

## **2. GRÁFICAS PARA ANÁLISIS EN 3D**

Una gráfica 2D o bidimensional es aquella que posee dos dimensiones: X, Y. Por tanto, al agregar una dimensión más se tiene una gráfica 3D o tridimensional en la que se manejan tres dimensiones: X, Y, Z.

### **2.1. Diferentes conceptos entre 3D y 2D**

Algunos conceptos válidos en el ambiente 2D no aplican en 3D:

Las capas en una vista 3D no son únicamente para visualización, estas pueden ser utilizadas para describir la superficie. Esto significa que las capas pueden tener diferentes roles dentro de una vista 3D, lo cual define diferentes tipos de capas 3D.

#### **2.1.1. Tipos de capas 3D**

Las capas de una vista 3D deben contener información de su altura (Z) para que sean visualizadas de forma tridimensional. Las capas pueden obtener la información de su altura de ellas mismas o de otras capas. Es posible tener capas que provean únicamente información de altura para otras capas. Al agregar datos a una vista 3D es necesario estar consciente del rol que tendrá cada capa.

Existen 3 tipos diferentes de capas dentro de una vista 3D, estos se describen a continuación.

#### **2.1.1.1. Capas flotantes**

Definen su propio lugar en el espacio 3D al contener valores  $Z$ , en función de la geometría, los atributos, o ajustes a nivel de la capa.

#### **2.1.1.2. Capas cubiertas**

Son colocadas en la parte alta de la superficie de una capa conocida, obteniendo sus valores  $Z$  de ésta.

#### **2.1.1.3. Capas de elevación**

Proveen una superficie 3D para otras capas que serán colocadas.

El formato de los datos puede ser también utilizado para clasificar los tipos de datos. Una vista 3D puede contener características (tales como geodatabases y datos shapefile), imágenes y Rasters (tales como fotografías aéreas y DEMs), datos de elevación, conjuntos de datos de terreno (Terrain datasets) y datos TIN.

El área de visualización de un mapa 3D no puede ser descrita como una forma simple rectangular, como en el caso 2D, porque los datos 3D se pueden observar desde un ángulo oblicuo. Esto significa que el manejo de su navegación y extensiones es distinto al de una vista 2D.

El punto de observación es una cámara que permite navegar a través de las ubicaciones 3D. La ubicación 3D a la que la cámara está orientada es la posición objetivo. El observador y las posiciones objetivo pueden estar localizados en cualquier lugar en una vista 3D, permitiendo gran flexibilidad.

La utilización del objeto cámara, en vez de una extensión rectangular, también significa que una escala tradicional 2D no aplica a 3D. Los datos vistos desde un ángulo oblicuo 3D cambiarán la escala progresivamente a través de la vista 3D, en base a la distancia de los datos y el observador. Los datos en primer plano se encontrarán en una mayor escala que los datos en segundo plano.

Una forma rectangular no puede ser utilizada para almacenar extensiones 3D.

## **2.2. Visualización de elementos en 3D**

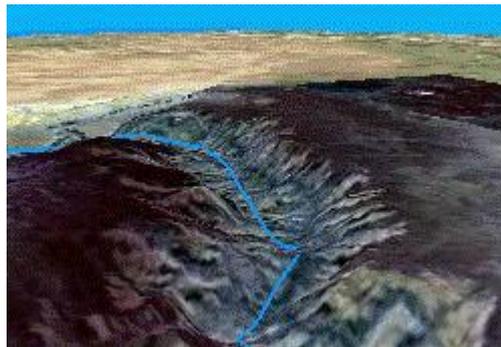
La visualización en una vista en perspectiva puede ser tanto para datos de características como para superficies. Los datos de características difieren de los datos de superficies debido a que representan objetos discretos en lugar de fenómenos continuos. Las características generalmente tienen una forma (geometría) y atributos.

Algunas características geométricas típicas son puntos, líneas o polígonos. Los puntos podrían representar picos de montañas, postes telefónicos o ubicaciones. Las líneas pueden representar caminos o arroyos. Los polígonos pueden representar construcciones, lagos o áreas administrativas.

Los atributos de las características pueden almacenar valores referentes a su elevación o altura. Algunas características de SIG almacenan valores de elevación dentro de la geometría de la característica. Es posible utilizar valores z en la geometría o atributos de las características para mostrar dichas características en un escenario 3D.

Algunas características carecen de valores de altura o elevación, aún así dichas características pueden ser visualizadas en un escenario 3D. Es posible utilizar los valores Z de un modelo de superficie para la característica del área de la superficie.

Figura 13. Visualización de elementos 3D <sup>14</sup>



### 2.3. Creación de vistas 3D

La visualización de datos en tres dimensiones provee nuevas perspectivas. Dicha visualización 3D puede proporcionar una perspectiva que podría no ser evidentemente en un mapa planimétrico de los mismos datos.

#### 2.3.1. Prioridades de las capas en 3D

Al desarrollar una vista 3D se puede necesitar definir el orden de prioridades entre 2 o más capas de características para dibujarlas. Un ejemplo puede al crear los datos de polígonos que representen parcelas y construcciones, si el orden de prioridades no es el correcto, el polígono de parcelas puede obstruir la visibilidad del polígono de construcciones.

---

<sup>14</sup> ESRI Web help, *About displaying features in 3D*, <http://webhelp.esri.com>, mayo 2009

Los datos en una vista 3D pueden ser mostrados como capas flotantes o capas cubiertas. Las capas flotantes usualmente definen sus fuentes de datos de altura de forma separada de otras capas en la vista 3D. Las capas cubiertas usualmente comparten la misma superficie de datos de otras capas.

La prioridad de las capas toma importancia en los siguientes casos:

- ✓ Se utiliza transparencia parcial
- ✓ Varias capas comparten la misma ubicación 3D
- ✓ Varias capas están cubiertas en la misma superficie

## 2.4. Interpolación

La interpolación es la estimación de los valores de puntos no muestreados de una superficie basada en una fórmula matemática que utiliza los valores de los puntos que los rodean.

Puede ser utilizada para estimar elevaciones, precipitaciones, temperaturas, dispersiones químicas u otros fenómenos que se basan en el espacio.<sup>15</sup>

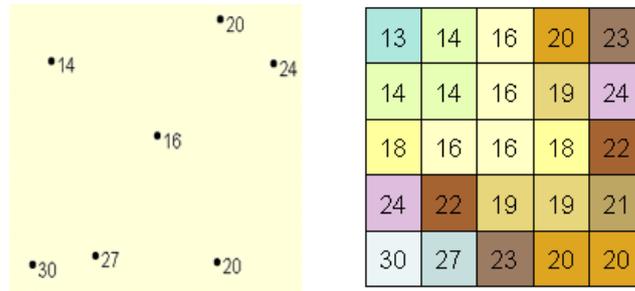
Los puntos de datos conocidos son obtenidos a través de muestreo o experimentación. La interpolación es un ajuste de curvas que intenta construir una función que se ajuste exactamente a los puntos de datos.

La interpolación es comúnmente una operación *Raster*, pero también puede ser aplicada en un ambiente de vector por medio de la utilización de un modelo de superficie *TIN*. Permite predecir valores para las celdas en un *Raster* a partir de un número limitado de puntos de datos de muestra.

---

<sup>15</sup> ESRI Dictionary, *Interpolation*, <http://support.esri.com>, agosto 2009

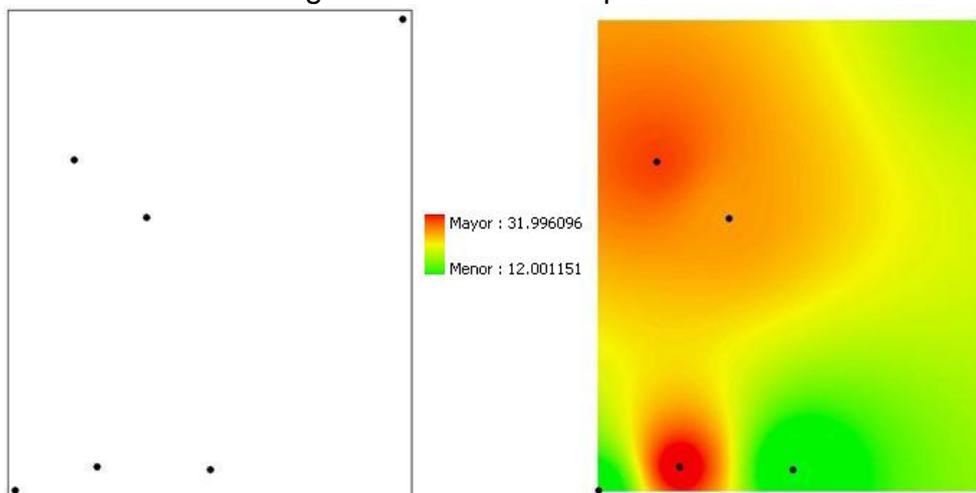
Figura 14. Interpolación<sup>16</sup>



Lo que hace a la interpolación una opción viable es que los objetos espacialmente distribuidos están espacialmente correlacionados, es decir, las cosas que están cerca tienden a tener características similares. Por ejemplo, si está lloviendo de un lado de la calle se puede predecir con un alto porcentaje de confiabilidad que está lloviendo del otro lado de la calle, pero lo contrario pasaría para una ubicación lejana a la calle donde está lloviendo.

Por tanto, los valores de puntos cercanos a los puntos de muestra tienden a ser más similares que los que están lejos siendo ésta la base de la interpolación.

Figura 15. Puntos interpolados



<sup>16</sup> ESRI Web help, *Understanding interpolation analysis*, agosto 2009

### 2.4.1. Métodos de interpolación

Los diferentes métodos de interpolación hacen ciertas suposiciones sobre cómo determinar los mejores valores estimados. Dependiendo del fenómeno que los valores representen y de la distribución de los puntos de muestra, las diferentes interpolaciones producirán mejores estimaciones en relación a los valores actuales.<sup>17</sup>

Sin importar que método de interpolación se elija, al tener mayor número de puntos de muestra y mayor distribución de los mismos más confiables serán los resultados.

La elección de un método de interpolación dependerá de las características del conjunto de datos tanto como de los objetivos de estudio.<sup>18</sup>

#### 2.4.1.1. *Inverse distance weighted (IDW)*

Este método de interpolación determinista estima los valores de las celdas a través de promediar los valores de los puntos de datos de muestra vecinos a cada celda de procesamiento. Los puntos más cercanos al centro de la celda que se estima tienen mayor influencia o peso en el proceso de estimación.<sup>19</sup>

Este método asume que cada punto de entrada tiene una influencia local que disminuye con la distancia. Los puntos más cercanos al punto de procesamiento pesan más que los más alejados.

---

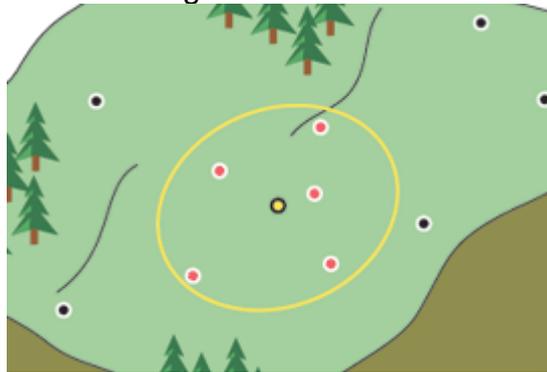
<sup>17</sup> Using ArcGIS Spatial Analyst, ArcGiS 9; ESRI; 2001; pág. 135

<sup>18</sup> ESRI Proceedings, *Methods of generating surfaces in environmental GIS applications*, <http://proceedings.esri.com>, septiembre 2009

<sup>19</sup> Using ArcGIS Spatial Analyst, ArcGiS 9; ESRI; 2001; pág.136

Por ejemplo, en las compras de una tienda tienen más peso las personas que viven más cerca dado que la gente prefiere comprar cerca de sus casas.

Figura 16. IDW <sup>20</sup>



#### 2.4.1.2. *Spline*

El método de interpolación determinista *Spline* estima los valores utilizando una función matemática que minimiza la totalidad de la curvatura de una superficie, resultando en una superficie suavizada que pasa exactamente a través de los puntos de entrada. <sup>21</sup>

Los puntos de muestra son alzados a la altura de su magnitud; encaja una función matemática a un número específico cercano de puntos mientras pasa por los puntos de muestra.

Este método es mejor para la generación de superficies que varían suavemente como elevaciones, altura del agua y concentraciones de contaminación.

<sup>20</sup> ESRI Web help, *Implementing Inverse Distance Weighted*, <http://webhelp.esri.com>, septiembre 2009

<sup>21</sup> ESRI Web help, *Applying a spline interpolation*, <http://webhelp.esri.com>, septiembre 2009

No es apropiado si los cambios en la superficie son grandes para distancias horizontales cortas porque puede exceder los valores estimados.<sup>22</sup>

Existen dos métodos de interpolación *Spline*: regularizado y de tensión.

El regularizado crea un superficie suave que cambia gradualmente con valores que pueden estar fuera del rango de los datos de muestra. El método de tensión afina la rigidez de la superficie conforme al carácter del fenómeno modelado. Crea una superficie menos suavizada con valores limitados por el rango de datos de la muestra.<sup>23</sup>

#### **2.4.1.3. Kriging**

Es un método de interpolación geoestadístico. Asume que la distancia o dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede ser utilizada para explicar la variación en la superficie. Encaja una función matemática a un número específico de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico, para determinar los valores de salida para cada ubicación.<sup>24</sup>

*Kriging* es un proceso de varios pasos; incluye análisis estadístico exploratorio de datos, modelado con variograma, creación de superficie y exploración de superficie de varianza.

---

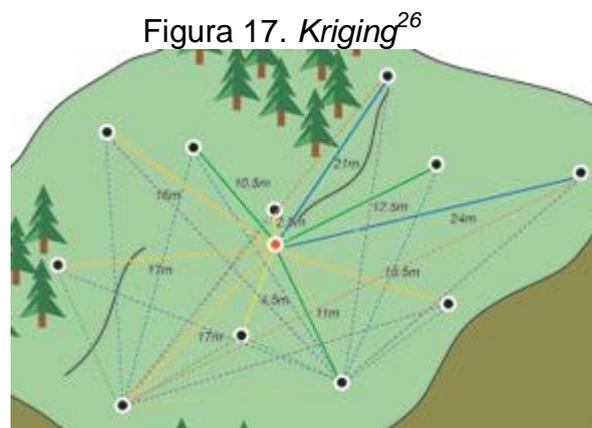
<sup>22</sup> GIS Development, *Surface approximation of point data using different interpolation techniques*, <http://www.gisdevelopment.net>, septiembre 2009

<sup>23</sup> Using ArcGIS Spatial Analyst, ArcGIS 9; ESRI; 2001; page 139

<sup>24</sup> ESRI Web help, *Using kriging*, <http://webhelp.esri.com>, octubre 2009

Este método es más apropiado si se tiene datos con una distancia espacialmente correlacionada o sesgo direccional. Es utilizado en ciencia y geología del suelo.

No es un método adecuado para los conjuntos de datos que tienen pozos o cambios bruscos, tales como quiebres.<sup>25</sup>



#### 2.4.1.4. *Trend surface analysis*

*Trend* es una interpolación polinomial global que encaja una superficie suavizada definida por una función matemática (un polinomio) a los puntos de muestra de entrada. Esta superficie de tendencia cambia gradualmente y captura patrones secundarios y de escala en los datos.<sup>27</sup>

<sup>25</sup> ESRI Proceedings, *Methods of generating surfaces in environmental GIS applications*, <http://proceedings.esri.com>, octubre 2009

<sup>26</sup> ESRI Web help, *Using kriging*, <http://webhelp.esri.com>, octubre 2009

<sup>27</sup> ESRI Web help, *Performing trend analysis*, <http://webhelp.esri.com>, octubre 2009

La interpolación *Trend* resulta en una superficie suavizada que representa las tendencias graduales en la superficie sobre un área de interés.

Esta interpolación es utilizada para encajar una superficie en los puntos de muestra cuando la superficie varía gradualmente de región a región sobre un área de interés; por ejemplo, el número de asesinatos en una zona roja.

Otro uso de *Trend* es la evaluación o eliminación de los efectos de rangos grandes o tendencias globales, conocido como análisis de tendencias en superficies.

#### **2.4.1.5. *Natural neighbors***

La interpolación de vecinos naturales encuentra el subconjunto de muestras de entrada más cercano a un punto de consulta y les aplica pesos basados en áreas proporcionales.<sup>28</sup>

Este método es también conocido como *Sibson* o interpolación de robo de área. Es una interpolación local y garantiza que las alturas interpoladas están dentro del rango de la muestra utilizada.

#### **2.4.1.6. Triangulación**

La triangulación (*Triangulation*) es un método de interpolación muy flexible. Permite generar superficies interpoladas de muchas diferentes fuentes de datos como puntos, líneas, quiebres y polígonos.<sup>29</sup>

---

<sup>28</sup> ESRI Web help, *Natural Neighbor works*, <http://webhelp.esri.com>, octubre 2009

El método de triangulación tiene varias ventajas: si las superficies tienen características de relieve significativas se generan superficies más precisas y es un método exacto.

La triangulación es un método más rápido en tiempo de procesamiento debido a que puede representar una superficie utilizando menor número de puntos de datos en comparación con otros métodos.

Una de sus desventajas es que las superficies no son lisas o suavizadas y pueden dar una apariencia dentada. Además, no es adecuada para extrapolar más allá del dominio de los puntos de muestra.

---

<sup>29</sup> ESRI Proceedings, *Methods of generating surfaces in environmental GIS applications*, <http://proceedings.esri.com>, octubre 2009

### **3. CASO DE ESTUDIO: CONTAMINACIÓN DEL AIRE**

#### **3.1. Introducción**

El presente caso de estudio tiene como finalidad representar geográficamente la densidad de la contaminación del aire en algunos sectores de la capital guatemalteca.

Para realizar dicha representación se hará uso de herramientas de software SIG, pues facilitan la manipulación geográfica de los datos. Se utilizarán datos históricos de la contaminación del aire. Esto permitirá visualizar el cambio de la concentración de la contaminación a través del tiempo.

Se detallarán paso a paso cada una de las actividades a realizar para obtener como resultado una representación tridimensional de la concentración de la contaminación.

#### **3.2. Monitoreo del aire**

Los datos a utilizar en este caso de estudio han sido recopilados por el Laboratorio de Monitoreo del aire de la Escuela de Química de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Dicho laboratorio posee puntos de muestreo en la capital guatemalteca en donde se toman datos de algunos de los contaminantes del aire. En este estudio se tomará en cuenta únicamente el índice de contaminación del dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).

La ubicación de los puntos de muestreo fue elegida tomando en cuenta factores representativos de la calidad del aire. Los principales factores son: tráfico vehicular, densidad poblacional, densidad industrial, flujo del viento y la seguridad para colocar el equipo de muestreo.<sup>30</sup>

Los puntos de muestreo ubicados en zona urbana poseen mayor tráfico vehicular, siendo éstos: INCAP (Calzada Roosevelt 6-25 zona 11), EFPEM (Ciudad Universitaria Avenida Petapa zona 12), SAN JUAN (Motores Hino S.A, Calzada San Juan zona 7) y MUSAC (9av y 10 calle zona 1).

Por el contrario, los puntos de muestreo ubicados en zona residencial poseen menor tráfico vehicular, siendo éstos: INSIVUMEH (7av 14-57 zona 13) y USAC (Edificio T-10 Facultad de CCQQ y Farmacia, Ciudad Universitaria zona 12).

La contaminación del aire por NO<sub>2</sub> se origina por procesos de combustión de fuentes industriales, domésticas y por transporte. Este es un gas color pardo o rojizo no inflamable y venenoso. Es precursor del ozono y la lluvia ácida (al combinarse con el agua del aire).

Las exposiciones directas al NO<sub>2</sub> aumentan la probabilidad de susceptibilidad a infecciones respiratorias. De igual forma, disminuye la eficiencia respiratoria y la función pulmonar en asmáticos.

---

<sup>30</sup> Informe anual 2008 monitoreo del aire en la ciudad de Guatemala, Laboratorio de monitoreo del aire USAC, abril 2009, pág. 7.

Las exposiciones cortas al NO<sub>2</sub> causan problemas respiratorios principalmente en niños. Los síntomas más comunes son: tos, resfriados e irritación de garganta.

El NO<sub>2</sub> causa daños a bosques y sistemas acuáticos. Así mismo, a edificios y monumentos históricos. También provoca corrosión de metales a través de la lluvia ácida.

El valor guía sugerido para este contaminante, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) en su guía 2005, es de 40 µg/m<sup>3</sup> para un promedio anual. Por tanto, el índice de contaminación por NO<sub>2</sub> no debería de exceder el valor guía para considerarse dentro del rango aceptado por la OMS.

El Laboratorio de Monitoreo del aire ha medido la densidad del NO<sub>2</sub> desde el año 1995 de forma mensual.

### **3.3. Herramienta a utilizar**

La herramienta de trabajo a utilizar debe tener las cualidades que permitan manipular los datos de forma geográfica y cumplir el objetivo de este caso de estudio.

Uno de dichos objetivos es representar la contaminación del aire en gráficas 3D. Por tanto, la utilización de una herramienta 3D podría ser útil para generar dichas gráficas. Pero esto generaría dificultades para localizar los puntos de muestreo en las ubicaciones geográficas reales. Por ello se hace necesaria la utilización de un software especializado en SIG.

*ArcGIS* es un conjunto de aplicaciones que permiten manipular datos de forma geográfica. Es un software especializado en SIG. Su aplicación *ArcMap* permite ubicar geográficamente los puntos de muestreo. Y su aplicación *ArcScene* permite visualizar superficies 3D. Provee la extensión 3D Analyst, entre otras, que será utilizada para la generación de superficies.

Por tanto, *ArcGIS* se ha seleccionado como herramienta de trabajo en su versión *ArcEditor 9.3.1 and Extensions*, versión educativa de uso exclusivo par la educación y licenciamiento de un año.

### 3.4. Carga de datos

El informe anual del monitoreo del aire proporciona los datos de los índices de contaminación de NO<sub>2</sub> en tomas mensuales para cada uno de los puntos de muestreo del año correspondiente. Así mismo, los valores de los promedios anuales a partir del año 1995.

Para cargar los datos en la extensión *ArcMap* de *ArcGIS* se ha creado un archivo en *Excel* con los datos de muestra para cada uno de los puntos de muestreo. Dichos datos correspondientes al promedio anual del año 1995 hasta el 2008 y los valores mensuales para los años 2007 y 2008.

La siguiente figura muestra un fragmento del archivo de *Excel* con los datos correspondientes a los promedios anuales desde el año 2001 hasta el año 2008.

Figura 18. Datos tabulados

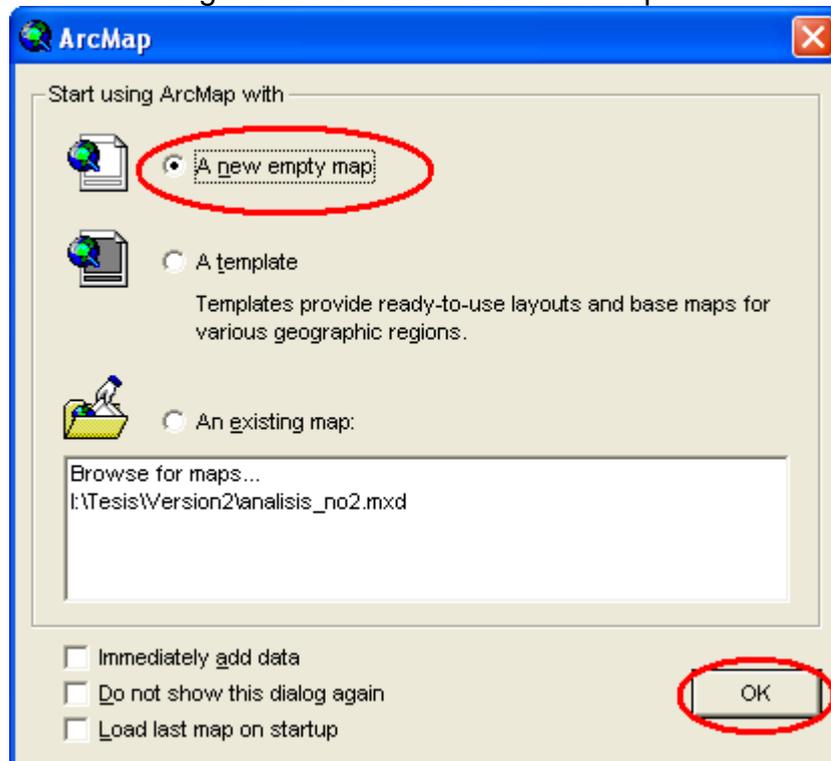
COD	X	Y	NOMBRE	NO2_2001	NO2_2002	NO2_2003	NO2_2004	NO2_2005	NO2_2006	NO2_2007	NO2_2008
1	-90.53988333	14.61613333	INCAP	43	38	35	41	41	41	38	38
2	-90.54551667	14.58773333	EFPEM	36	38	47	45	46	45	36	32
3	-90.54808333	14.6227	SAN JUAN	38	39	44	40	47	43	37	41
4	-90.51095	14.63876667	MUSAC	39	25	34	30	31	28	25	37
5	-90.53265	14.58738333	INSIVUMEH	20	17	23	23	24	21	19	21
7	-90.55473333	14.58501667	USAC	20	21	27	22	31	17	20	19

Como se puede observar en la figura anterior, cada uno de los puntos de muestreo tiene relacionado un valor  $X$  y un valor  $Y$ . Estos valores corresponden a las coordenadas geográficas de la ubicación del punto de muestreo. Fueron proporcionados en grados y transformados a grados decimales.

Los valores mostrados en los datos tabulados mayores a 40, son los valores que sobrepasan el valor guía sugerido para el  $\text{NO}_2$  correspondiente a  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Teniendo creado el archivo en *Excel* se cargarán en la aplicación *ArcMap*. Para ello es necesario acceder a *ArcMap* y crear un nuevo mapa seleccionando la opción "A new empty map" como se muestra en siguiente figura.

Figura 19. Creando un nuevo mapa



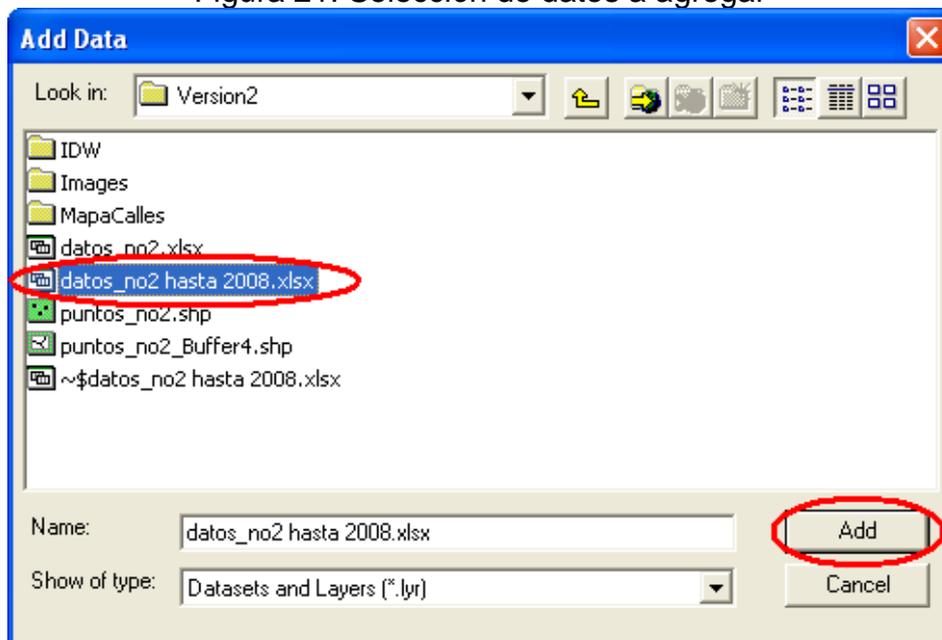
El botón “Add Data” del menú de herramientas permite agregar datos al nuevo mapa.

Figura 20. Botón "add data"



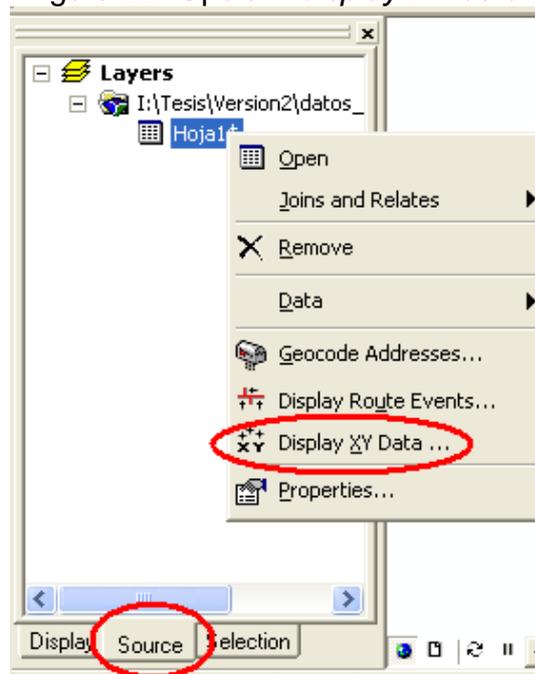
En la ventana “Add Data” se debe seleccionar el archivo correspondiente a los datos que se desean cargar. En este caso el archivo de Excel que contiene los índices de contaminación de NO<sub>2</sub>, como se muestra en la siguiente figura. Es necesario seleccionar la hoja del archivo en que encuentran los datos tabulados.

Figura 21. Selección de datos a agregar



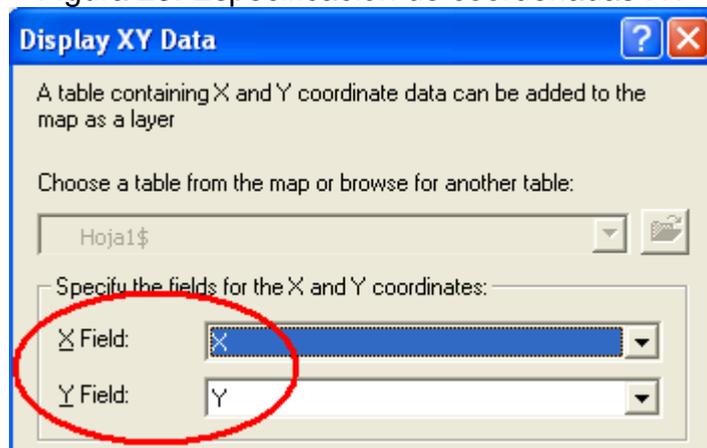
La hoja agregada del archivo de *Excel* es visible en la pestaña “Source” del cuadro de datos. Al hacer clic derecho sobre ella es posible ver el menú de la misma. La opción “*Display XY Data*” permite configurar el sistema de coordenadas para posicionar los datos geográficamente.

Figura 22. Opción “*display XY data*”



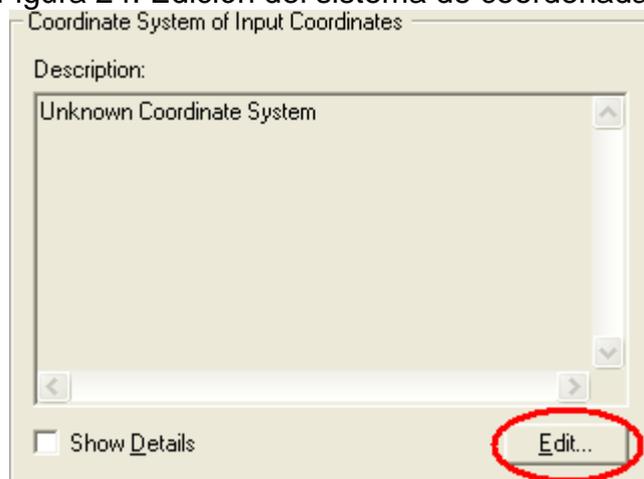
La ventana “*Display XY Data*” permite especificar qué datos corresponden a las coordenadas X y Y. En este caso, las columnas X y Y de los datos tabulados, las cuales corresponden en nombre a las coordenadas a especificar.

Figura 23. Especificación de coordenadas XY



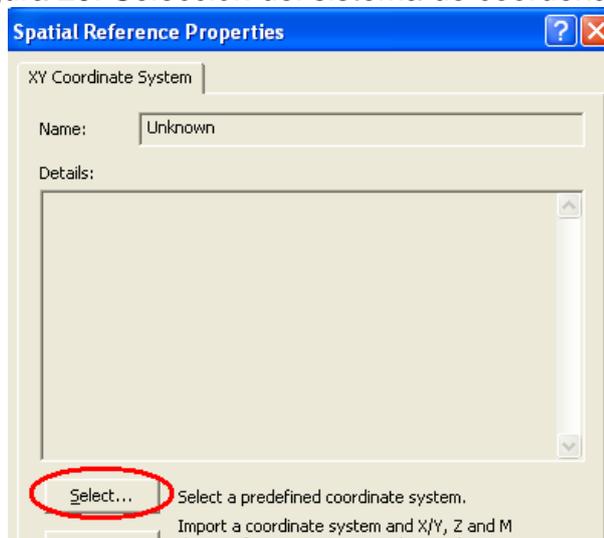
Se debe seleccionar el sistema de coordenadas correspondiente a los valores de coordenadas XY de los puntos de muestreo. Esto a través de la ventana “*Spatial Reference Properties*” que se despliega al editar el sistema de coordenadas.

Figura 24. Edición del sistema de coordenadas



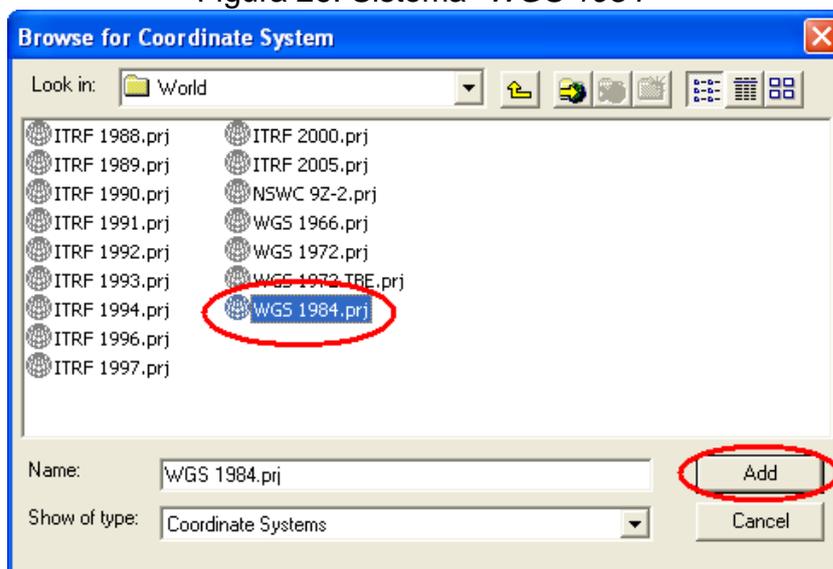
En la ventana de propiedades de referencia espacial al seleccionar el botón “*Select*” se puede visualizar los sistemas de coordenadas soportados por la aplicación.

Figura 25. Selección del sistema de coordenadas



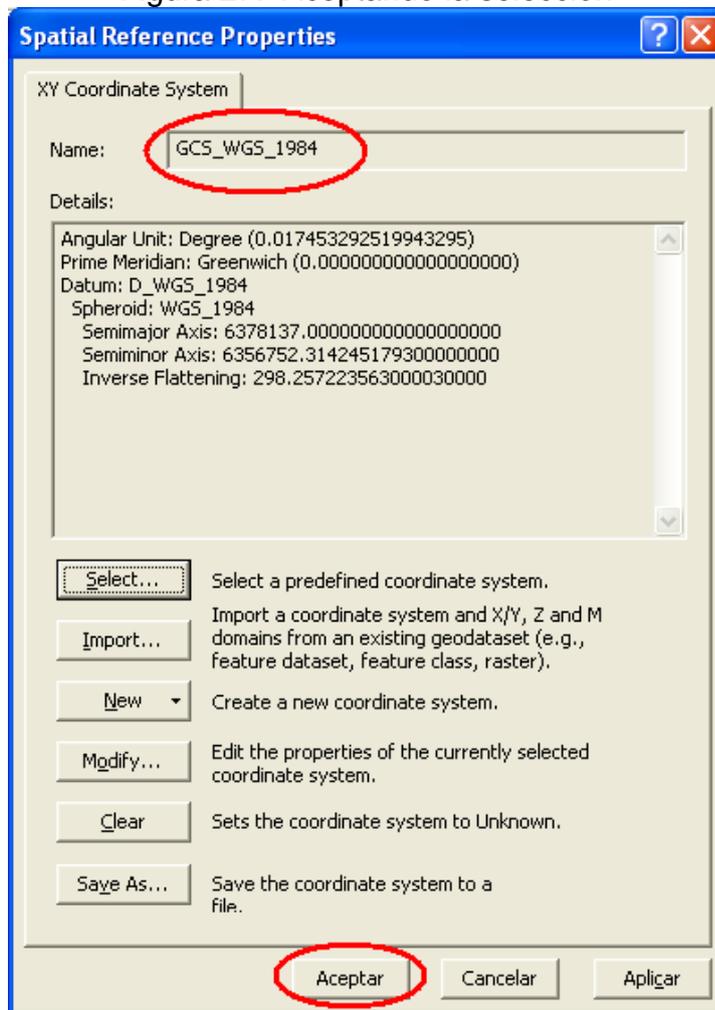
Se debe seleccionar el sistema de coordenadas correspondiente a las coordenadas que se tienen cargadas de la hoja de *Excel*. En este caso el sistema correcto es el sistema de coordenadas geográficas mundiales “WGS 1984”.

Figura 26. Sistema “WGS 1984”



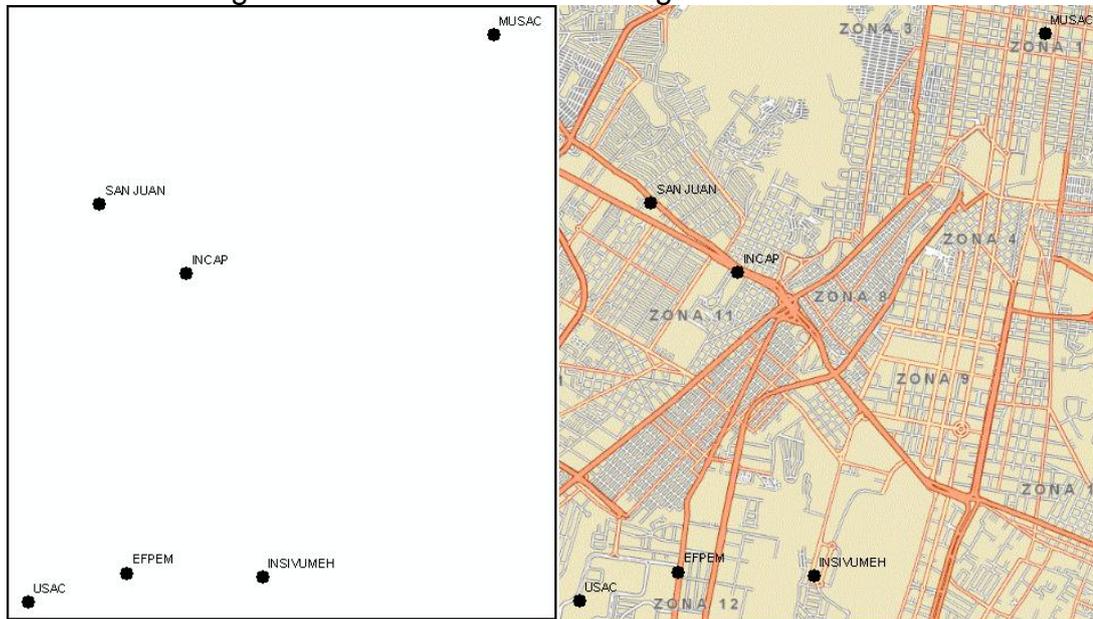
Ya seleccionado el sistema de coordenadas se debe de “Aceptar” la selección para hacer válido el cambio.

Figura 27. Aceptando la selección



Los puntos de muestreo son ahora visibles y están posicionados en su ubicación geográfica real.

Figura 28. Puntos de muestreo georeferenciados



### 3.5. Interpolación de los datos

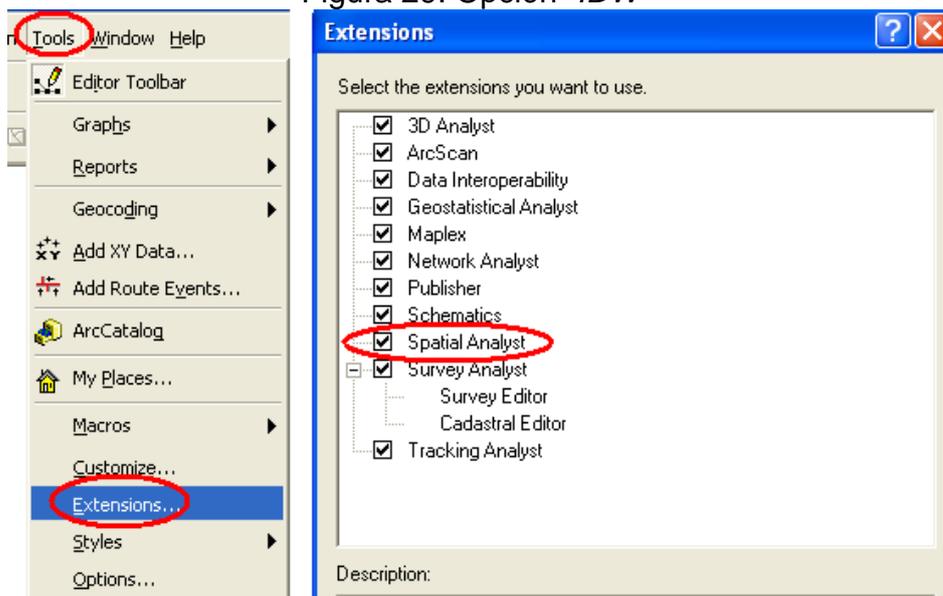
Para cada uno de los puntos de muestreo se tienen cargados los datos correspondientes a la densidad de  $\text{NO}_2$  en el aire. Dichos datos se tienen por promedio anual de los años 1995 al 2008 y valores mensuales de los años 2007 y 2008.

La interpolación de los datos cargados en cada uno de los puntos de muestreo, permite predecir los valores del índice de contaminación por  $\text{NO}_2$  de los puntos cercanos no muestreados. Es decir, se puede conocer el valor de contaminación por  $\text{NO}_2$  de un punto no muestreado en base a los valores de los puntos muestreados.

Como se vio en el capítulo 2, existen varios métodos de interpolación. Se ha decidido utilizar el método *Inverse Distance Weighted (IDW)* ya que éste basa la estimación del valor de un punto promediando los valores de los puntos vecinos. Se asume que la variable mapeada decrece con la distancia.

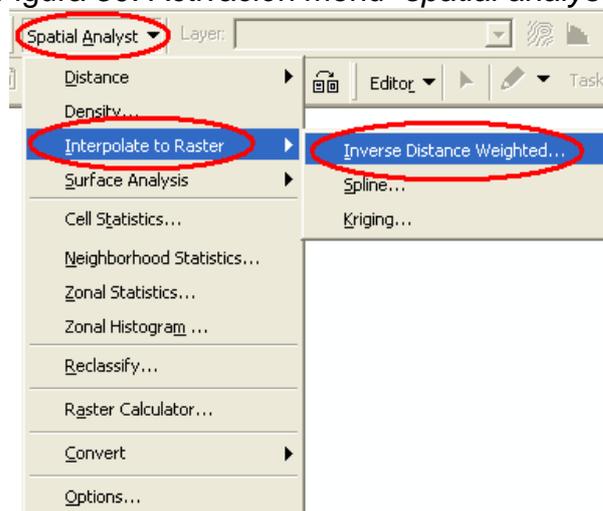
La interpolación de los datos se realizará utilizando la aplicación *ArcMap*. Es posible que el menú de acceso no esté visible, entonces es necesario activarlo. En el menú *Tools*, submenú *Extensions* se debe marcar la opción *Spatial Analyst*.

Figura 29. Opción "IDW"



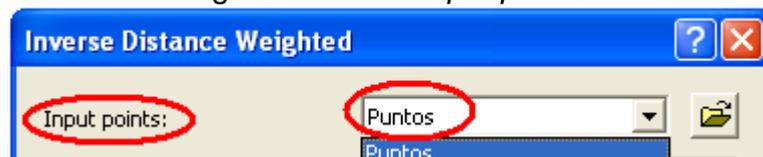
Para poder utilizar la extensión es necesario acceder a la opción *Inverse Distance Weighted* del menú *Spatial Analyst* y submenú *Interpolate to Raster*.

Figura 30. Activación menú "spatial analyst"



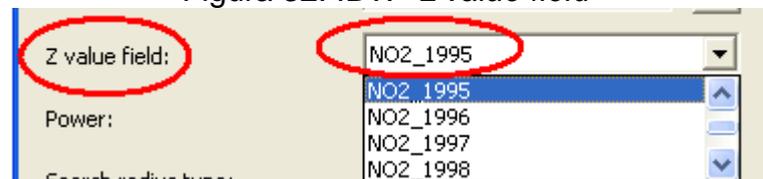
La ventana "Inverse Distance Weighted" tiene varios campos. En el primer campo "Input points" se debe de seleccionar el conjunto de puntos que se desea interpolar, en este caso los puntos de muestreo cargados anteriormente.

Figura 31. IDW "input points"



En el campo "Z value field" se debe seleccionar el atributo que se desea interpolar. En este caso se realizará una interpolación para cada uno de los promedios anuales de los años 1995 al 2008 y los valores mensuales de los años 2007 y 2008.

Figura 32. IDW "z value field"



El valor predeterminado para el campo "Power" es 2. Un valor alto de poder significa mayor énfasis en los puntos cercanos resultando una figura con más detalle. Por el contrario, un valor bajo de poder dará más influencia a los puntos más lejanos resultando una superficie más suavizada.

Figura 33. IDW "power"



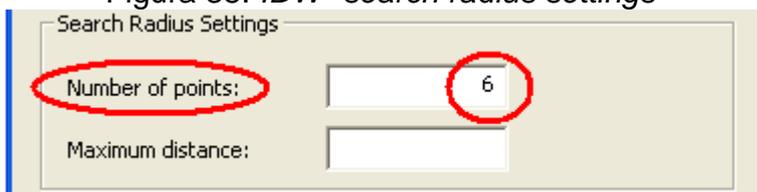
El radio de búsqueda para el cálculo de la interpolación puede ser variable o fijo. El tipo de radio fijo se utiliza si los puntos de muestra son abundantes y regularmente espaciados. En cambio, un radio variable se utiliza si los puntos de muestra son escasos y están colocados aleatoriamente. Como se tienen pocos puntos de muestra se ha elegido el tipo variable.

Figura 34. IDW "search radius type"



Para un radio de tipo variable es necesario proveer información sobre el número de puntos y la distancia máxima. El número de puntos especifica cuántos puntos serán utilizados en el cálculo del valor interpolado; esto hace que el radio sea variable. La distancia máxima especifica la distancia que el radio de búsqueda no puede exceder.

Figura 35. IDW "search radius settings"



El campo "Use barrier polylines" permite especificar una barrera que simula un corte que limita la búsqueda de puntos de muestra. Este campo es opcional. Para este caso no se ha seleccionado.

Figura 36. IDW "use barrier polylines"



Es posible modificar el valor del tamaño de la celda de salida. En este caso se ha utilizado el valor sugerido por la aplicación.

Figura 37. IDW "output cell size"



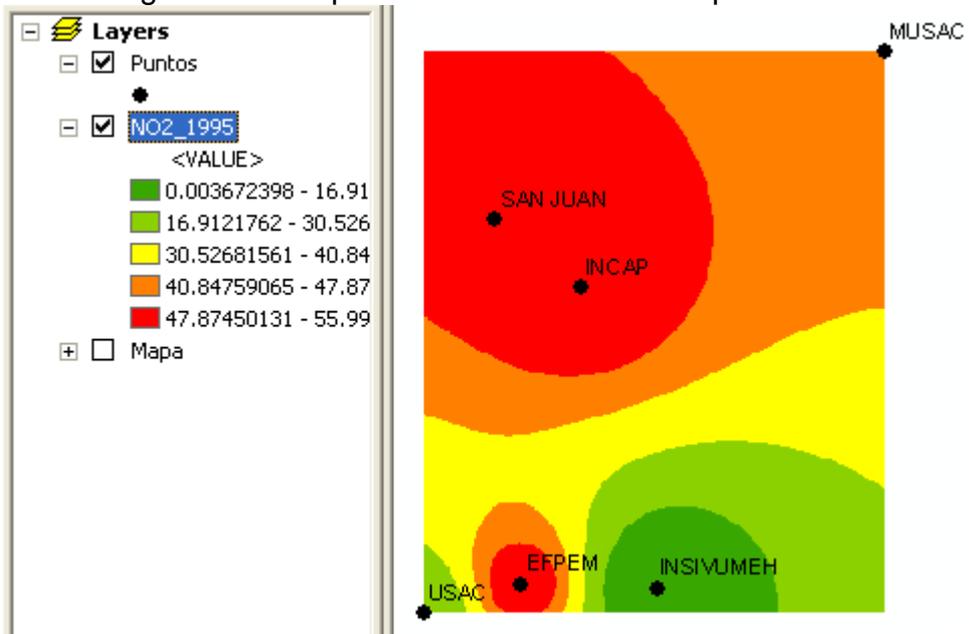
El campo "Output raster" permite seleccionar el directorio para crear la interpolación y darle un nombre a la misma. Para el promedio anual del año 1995, por ejemplo, se ha dado el nombre "NO2\_1995" que corresponde al nombre de la columna originaria del archivo de *Excel*.

Figura 38. IDW "output raster"



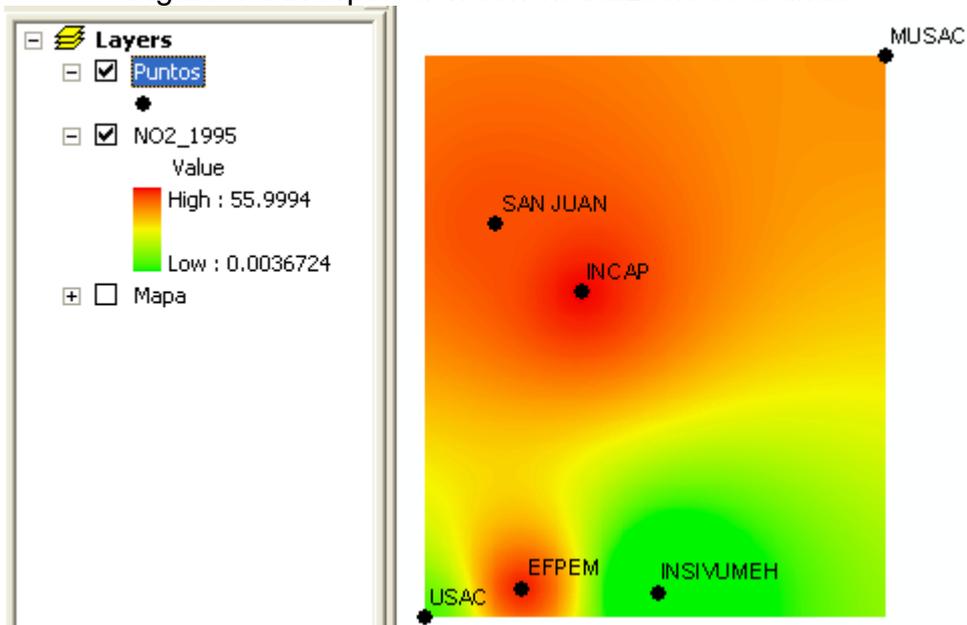
Al presionar el botón "OK" se generará la interpolación. La rampa de colores en que se muestran los rangos de los datos puede ser modificada. De igual forma, se puede seleccionar el número de rangos o clases que se quieran ver.

Figura 39. Interpolación con visualización por clases



También, si se prefiere, es posible visualizar la rampa de colores de forma continua.

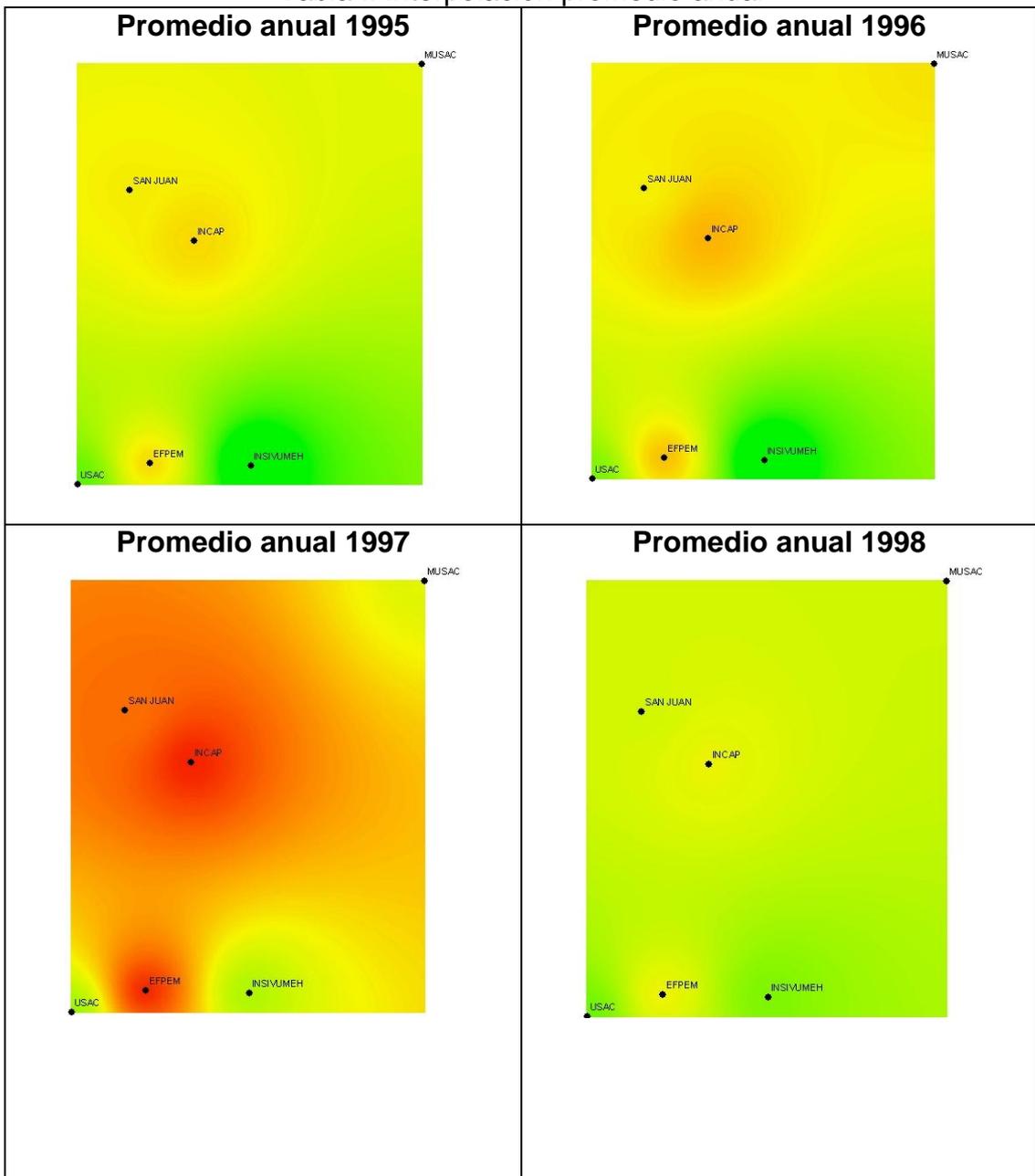
Figura 40. Interpolación con visualización continua

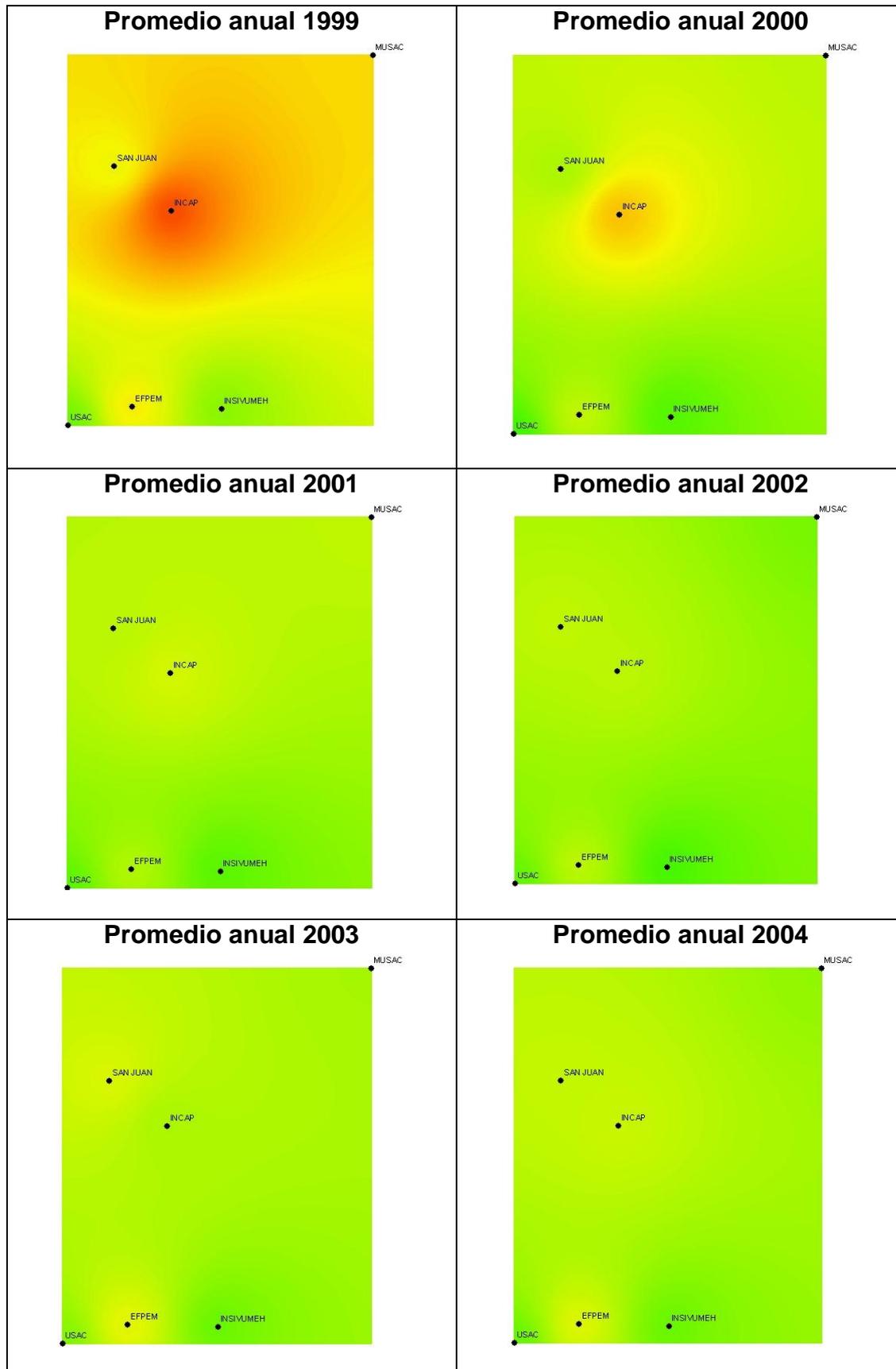


Para este caso de estudio se utilizó la visualización continua para las interpolaciones generadas, correspondientes a los promedios anuales del año 1995 al 2008 y los valores mensuales para los años 2007 y 2008.

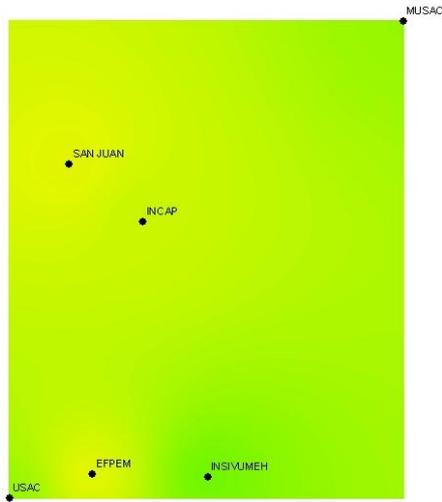
La siguiente tabla muestra el resultado de las interpolaciones correspondientes a los promedios anuales de los años 1995 a 2008.

Tabla I. Interpolación promedio anual

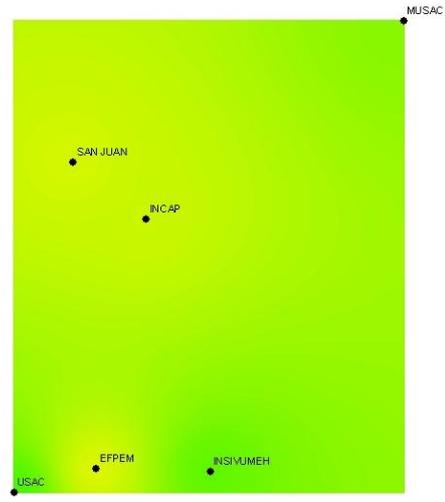




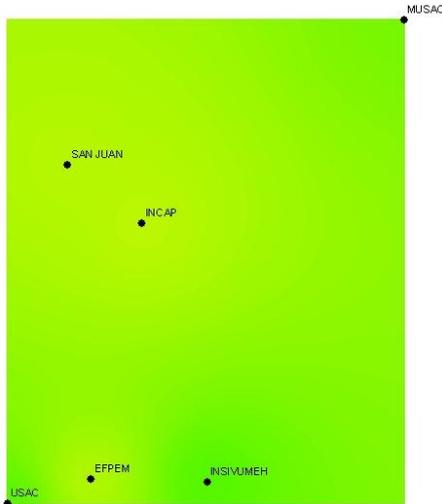
**Promedio anual 2005**



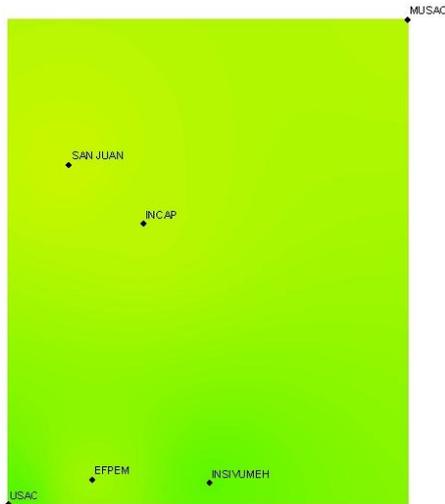
**Promedio anual 2006**



**Promedio anual 2007**

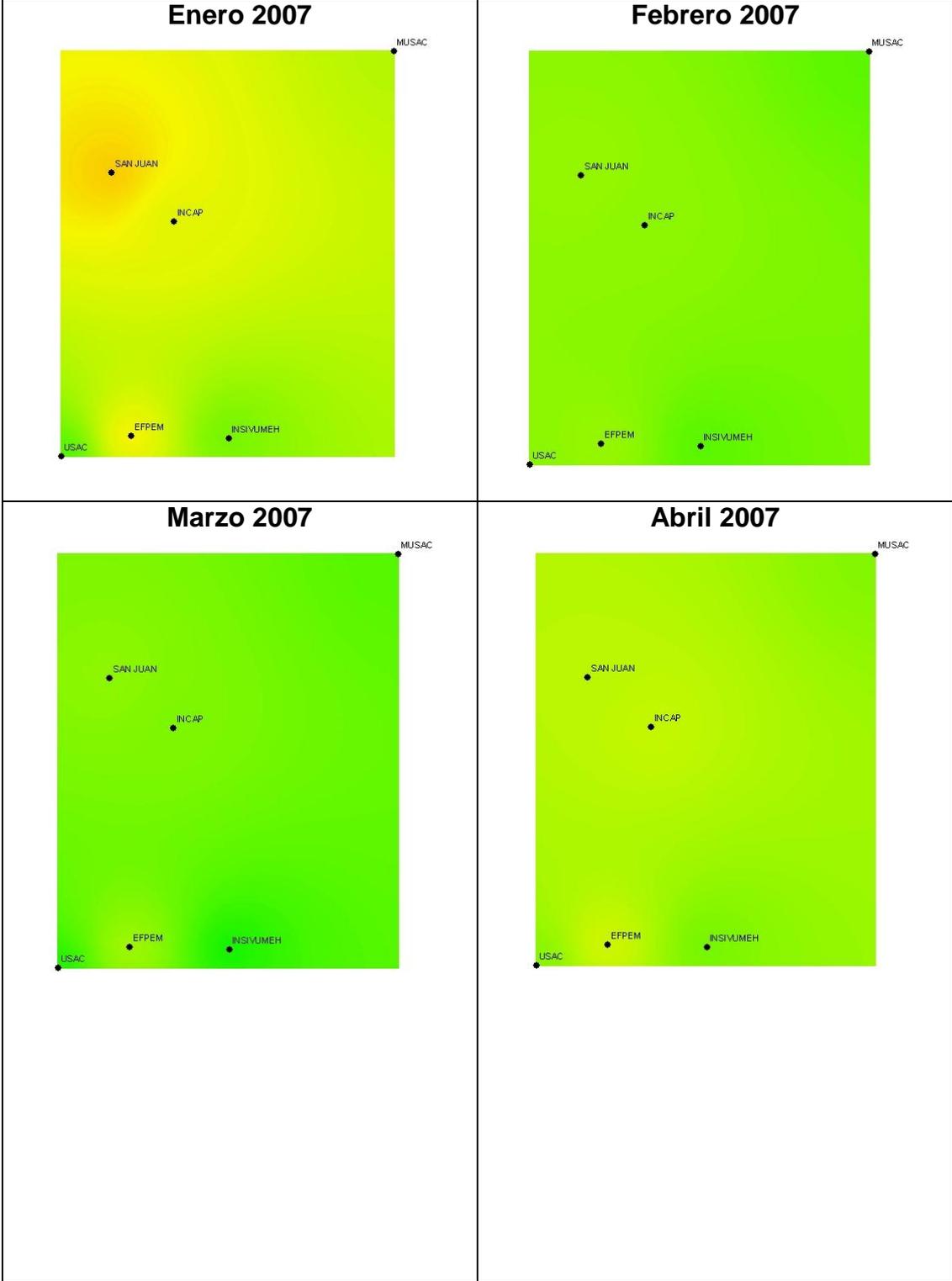


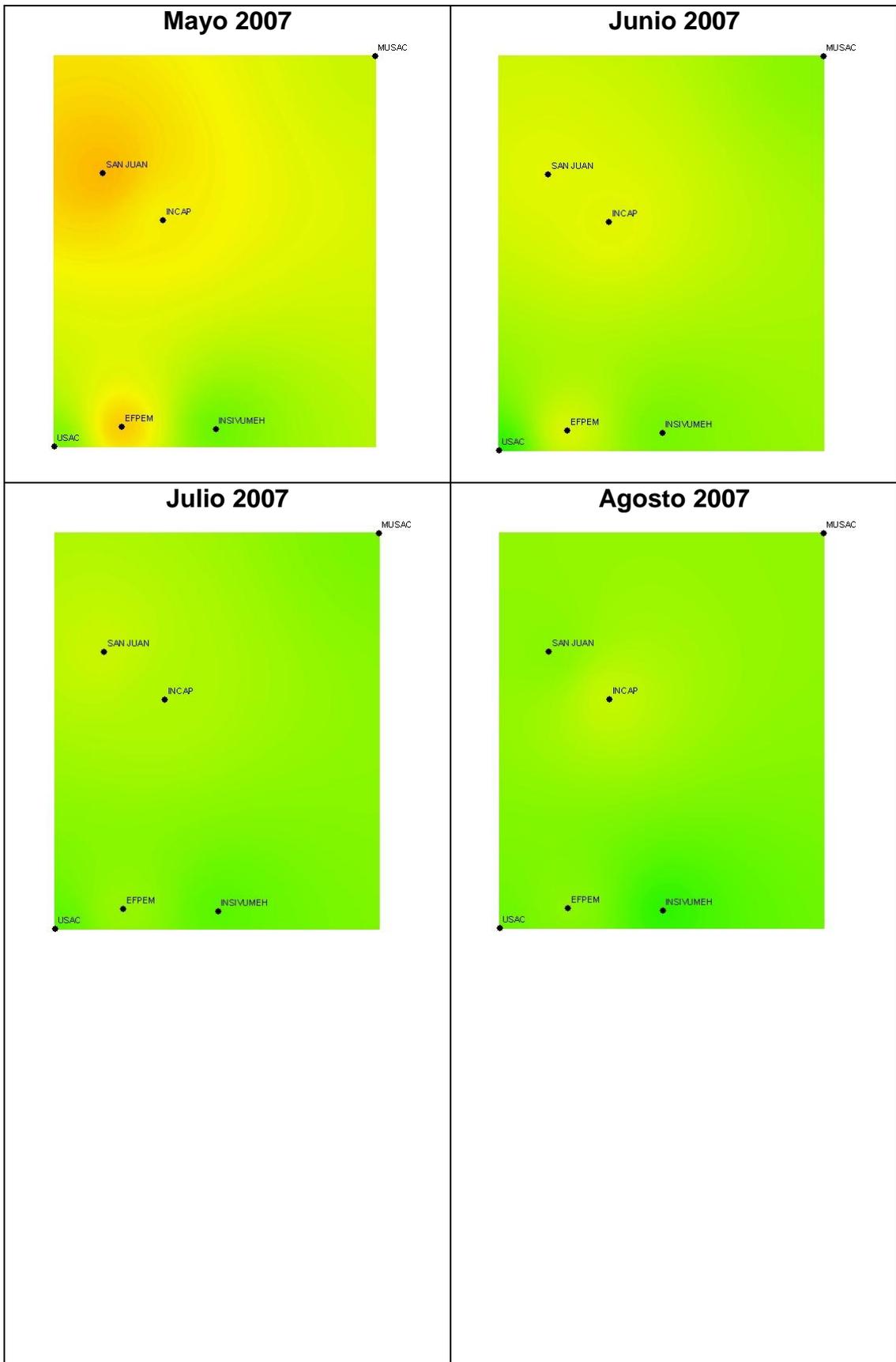
**Promedio anual 2008**

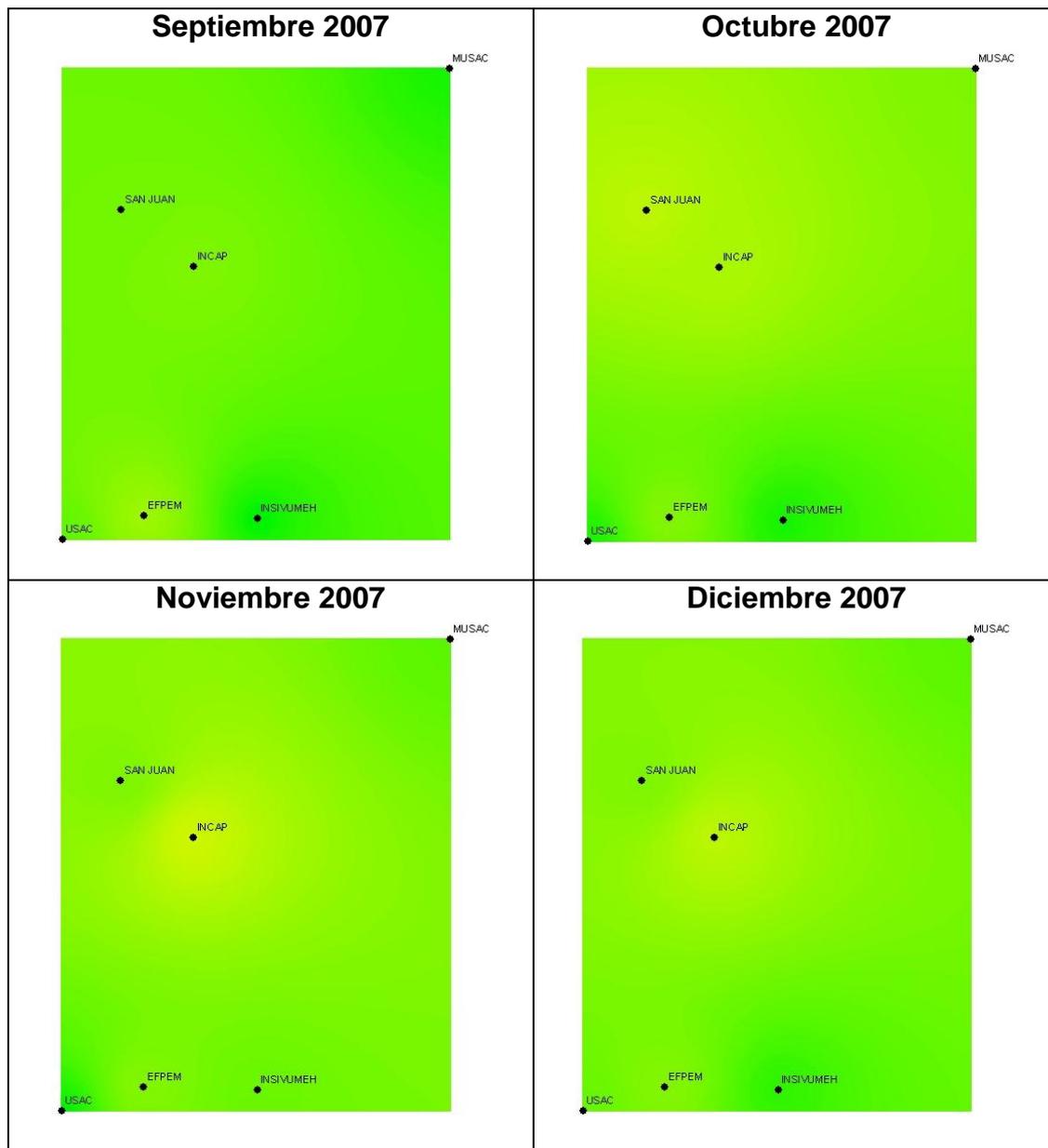


Los resultados de los valores mensuales para el año 2007 se muestran en la siguiente tabla.

Tabla II. Resultados interpolación año 2007

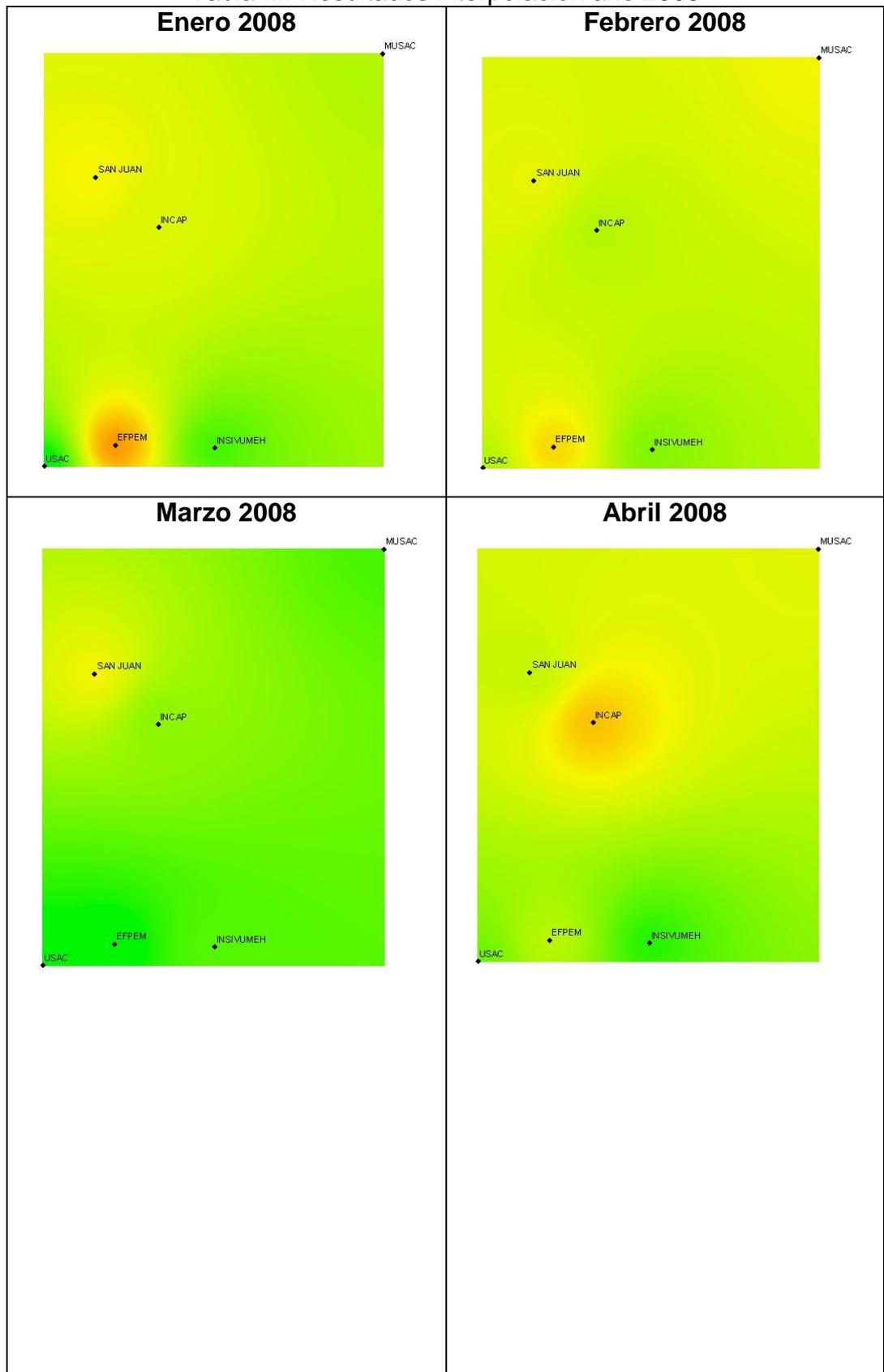




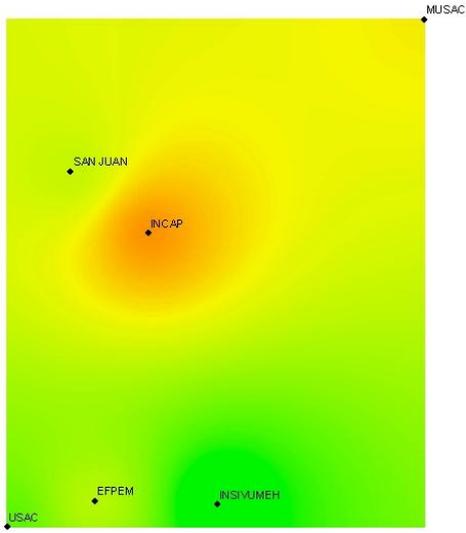


La siguiente tabla muestra el resultado de las interpolaciones de los puntos muestreados mensualmente en el año 2008 y su promedio anual. En el informe anual 2008 del monitoreo del aire no existen valores para el mes de diciembre.

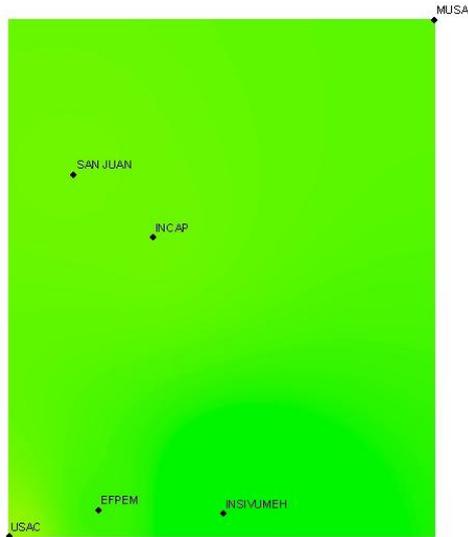
Tabla III. Resultados interpolación año 2008



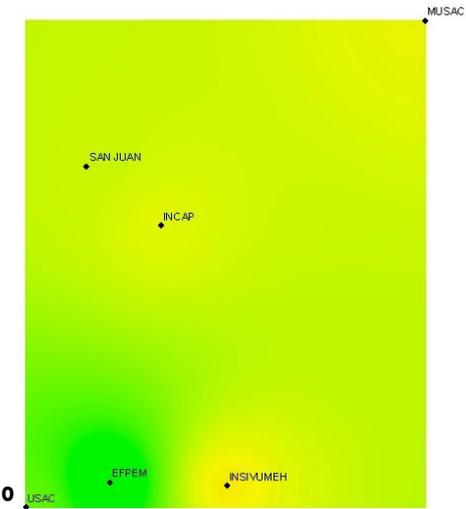
**Mayo 2008**



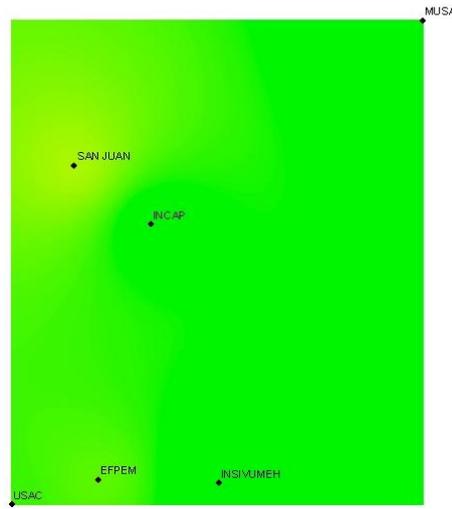
**Junio 2008**

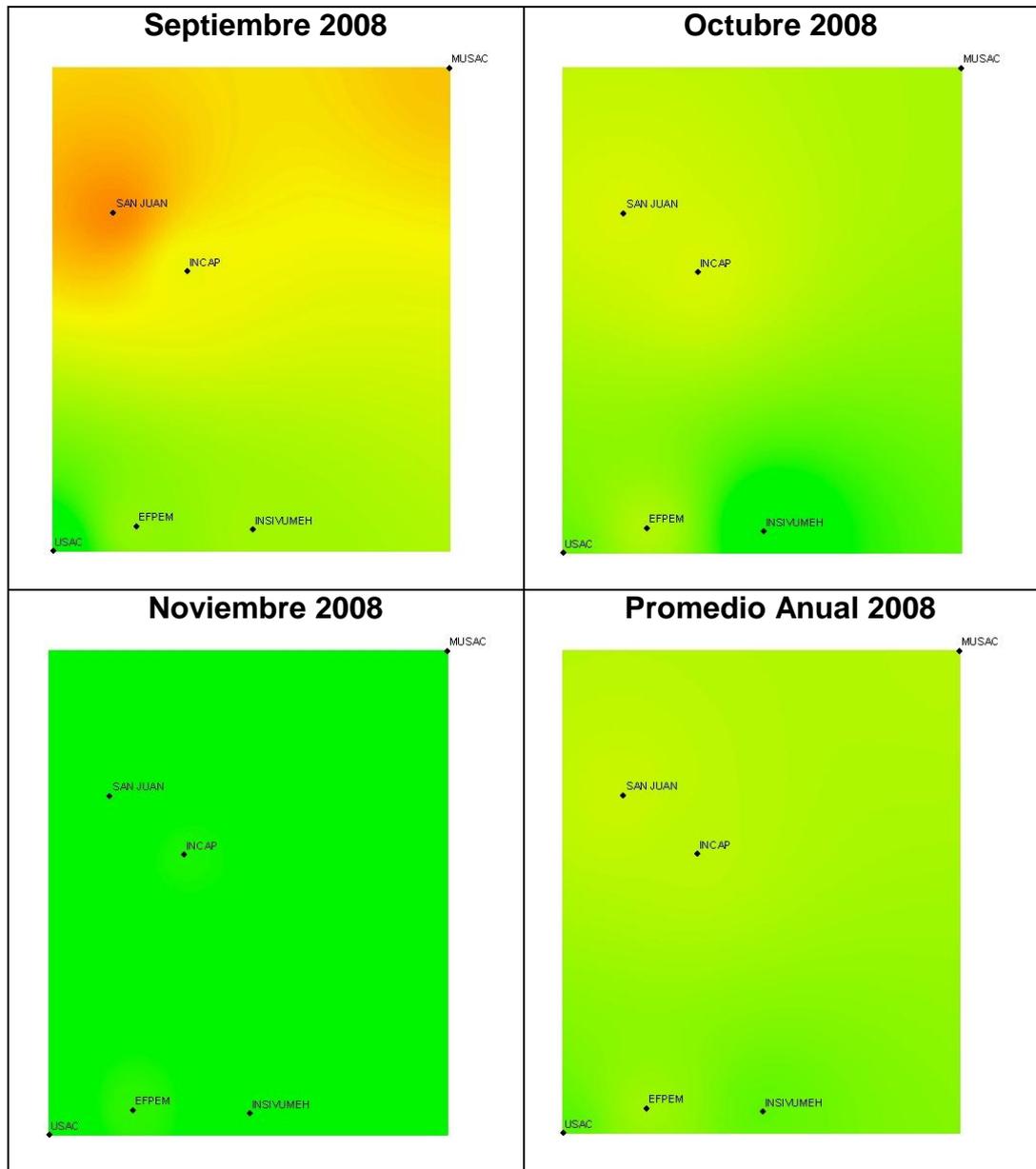


**Julio 2008**



**Agosto 2008**





Las interpolaciones generadas de los datos muestreados facilitan la visualización del cambio del índice de contaminación por NO<sub>2</sub> en el tiempo. A su vez, sirven de base para crear las vistas 3D.

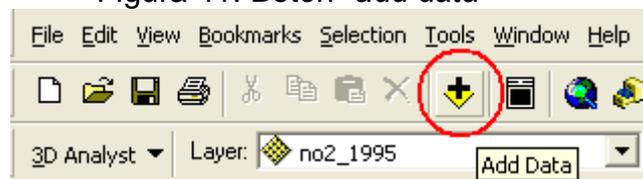
### 3.6. Representación de resultados en 3D

La representación 3D de las interpolaciones generadas anteriormente permitirá visualizar con facilidad en dónde los valores son más altos o bajos, haciendo más evidente las áreas con mayor y menor índice de contaminación por NO<sub>2</sub>.

Para generar la transformación de las interpolaciones 2D a una vista 3D se utilizará la aplicación *ArcScene* de *ArcGIS*. Esta aplicación permite manipular y visualizar elementos geográficos tridimensionales.

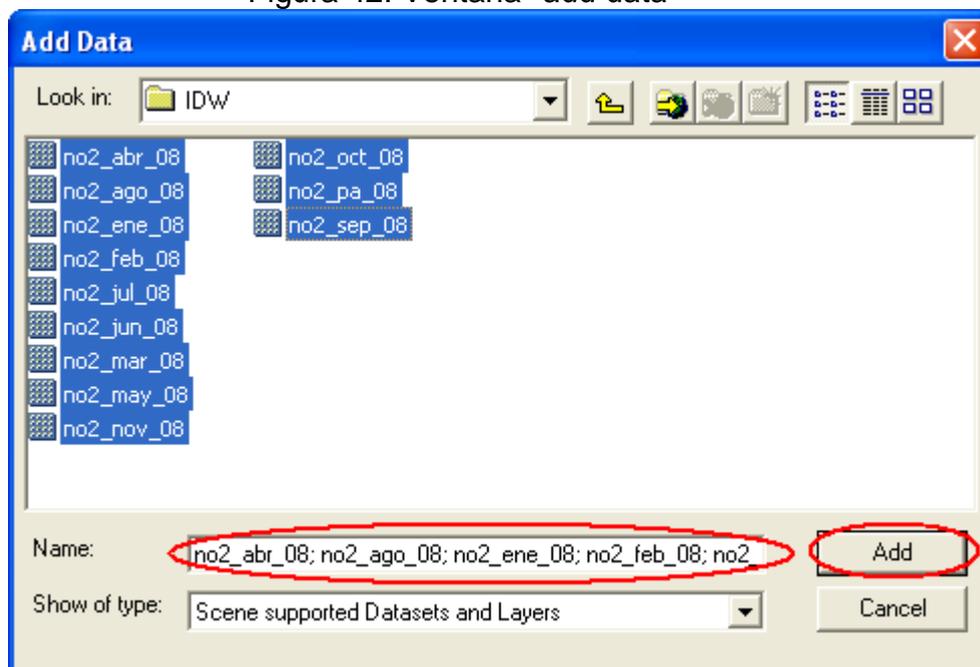
El primer paso después de ingresar a *ArcScene* es agregar las capas de los puntos, las interpolaciones y el mapa. Esto se realiza utilizando el botón “*Add Data*” ubicado en el menú como se muestra en la siguiente imagen.

Figura 41. Botón “*add data*”



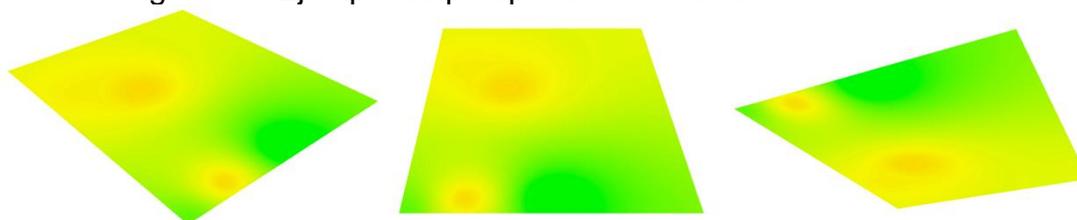
En la ventana “*Add Data*” se debe de navegar hacia cada directorio que contenga el conjunto de capas que se desean agregar, seleccionarlas y agregarlas haciendo clic en el botón “*Add*”.

Figura 42. Ventana "add data"



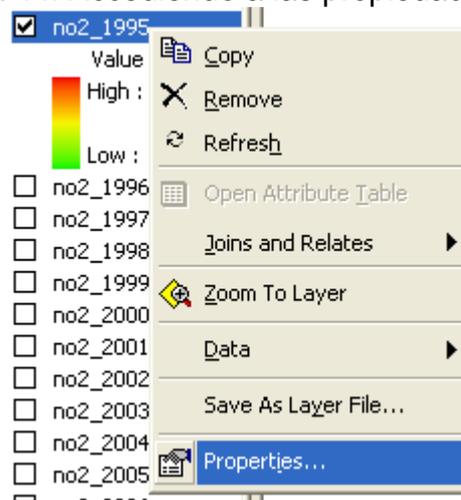
Al ser agregadas las capas de las interpolaciones a ArcScene, es posible visualizarlas desde diferentes perspectivas a pesar de seguir siendo una capa plana, sin elevaciones, como se muestra en la siguiente gráfica.

Figura 43. Ejemplo de perspectivas en ArcScene



Para generar la elevación en Z, para las interpolaciones ya cargadas en ArcScene es necesario acceder a las propiedades de la capa de la interpolación respectiva. Al hacer clic derecho sobre la capa, aparece el menú de la misma mostrando la opción "Properties".

Figura 44. Accediendo a las propiedades



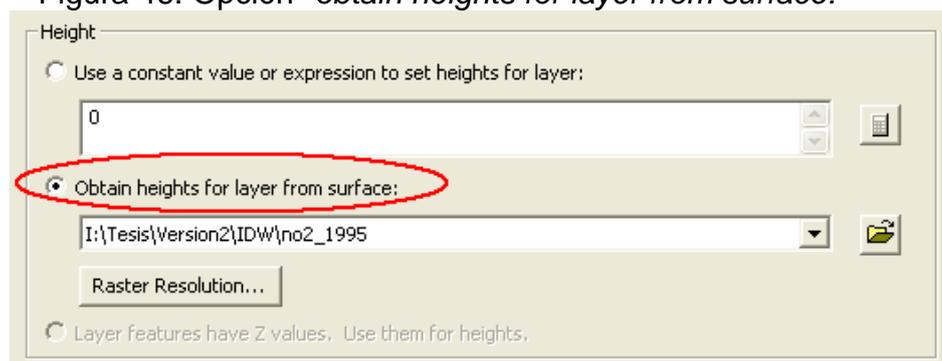
La ventana de propiedades se muestra. Para acceder a las propiedades de la altura es necesario ir a la pestaña “*Base Heights*”.

Figura 45. Pestaña “*base heights*”



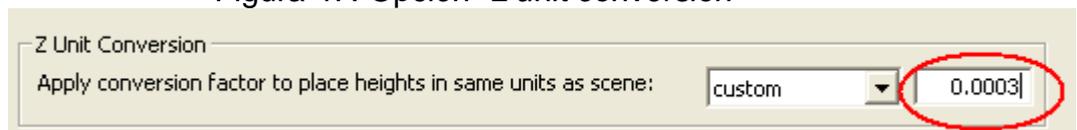
En la sección “*Heights*” se debe marcar la opción “*Obtain heights for layer from surface:*” y elegir la superficie correspondiente a la capa a la que se desea dar la altura. Por defecto la aplicación sugiere la superficie correspondiente.

Figura 46. Opción “*obtain heights for layer from surface:*”



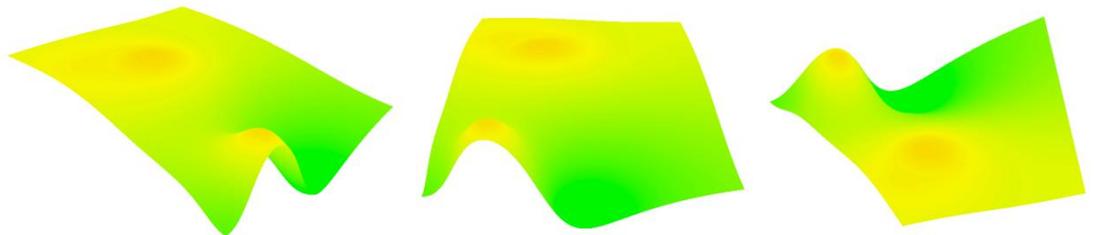
Para este caso de estudio, se ha tomado como superficie para la altura de cada superficie interpolada, la superficie misma. Por tanto, es necesario convertir los valores Z para que las alturas sean perceptibles. Para ello en el cuadro "Z Unit Conversion" se debe modificar el valor numérico, se eligió 0.0003 como nuevo valor.

Figura 47. Opción "z unit conversion"



Al "Aceptar" los cambios se podrá visualizar la gráfica de la interpolación representada de forma tridimensional, es decir, con valores Z.

Figura 48. Gráfica 3D generada



Se generó la superficie tridimensional para cada uno de los valores de muestreo, es decir, para los promedios anuales de los años 1995 al 2008 y los valores mensuales del año 2008.

A continuación se muestran las gráficas 3D generadas correspondientes a los promedios anuales de los años 1995 al 2008.

Figura 49. Promedios anuales año 2002 al 2008

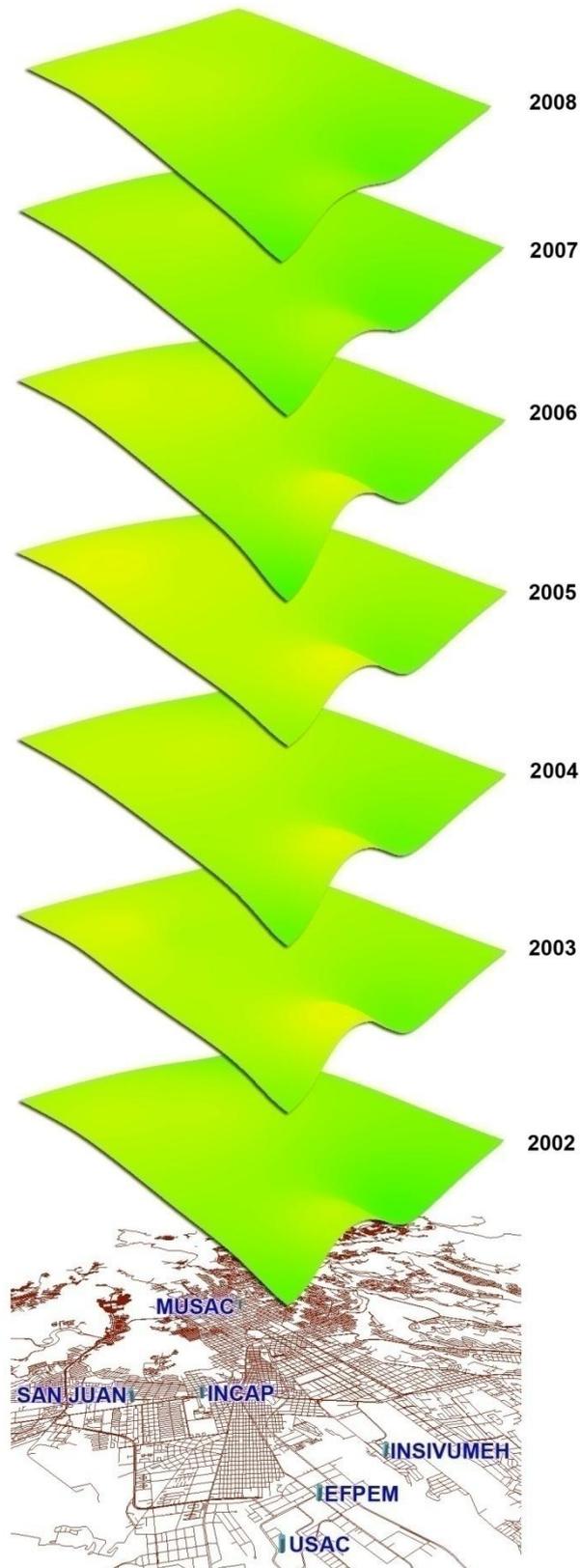
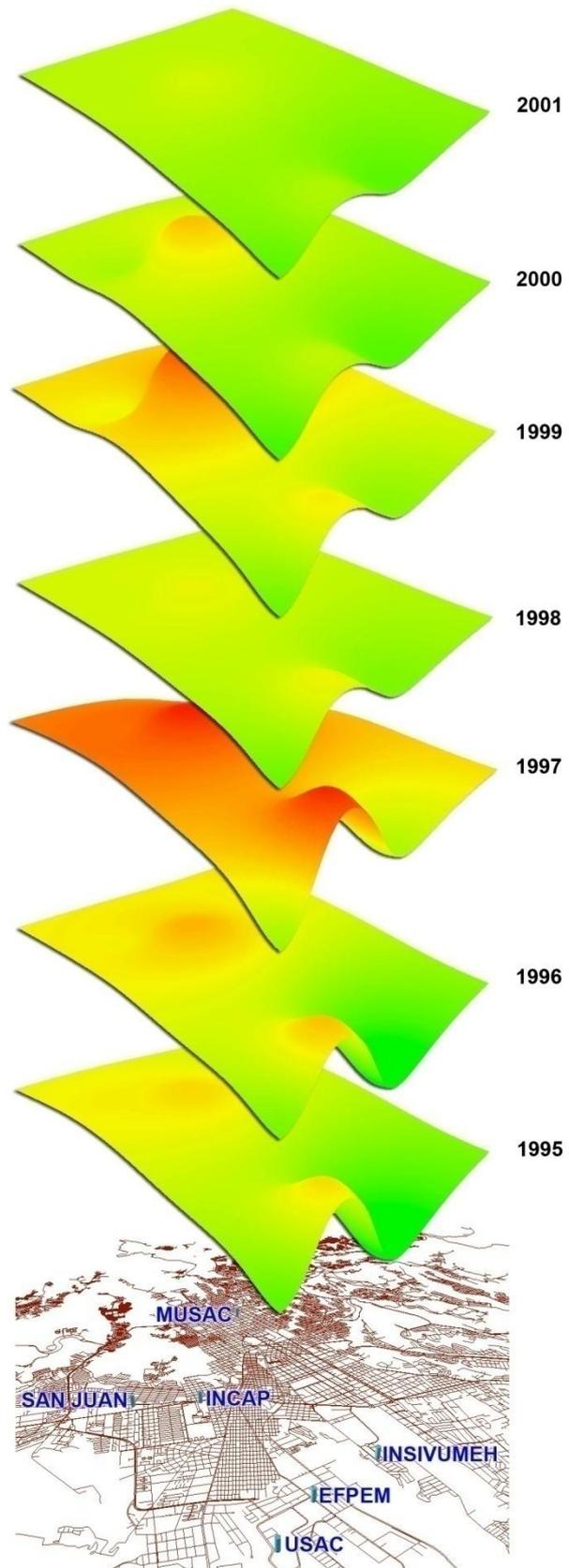


Figura 50. Promedios anuales año 1995 al 2001



A continuación se muestran las gráficas generadas a partir de los valores mensuales del año 2008. No existen valores para el mes de diciembre.

Figura 51. Valores mensuales año 2008 (julio – noviembre)

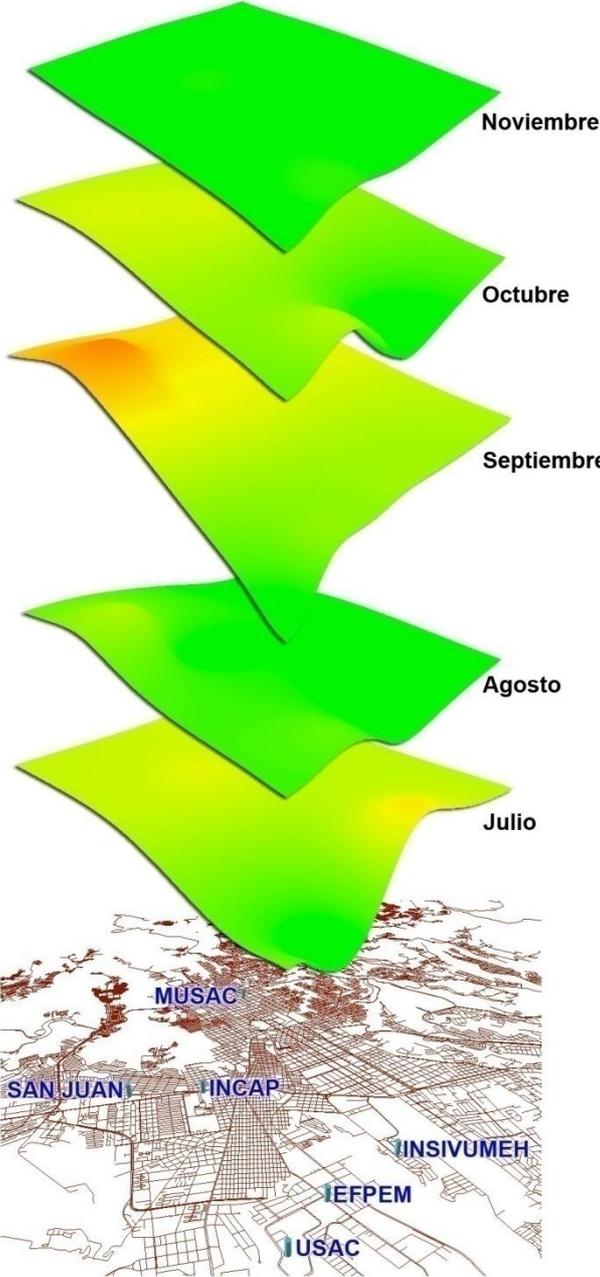
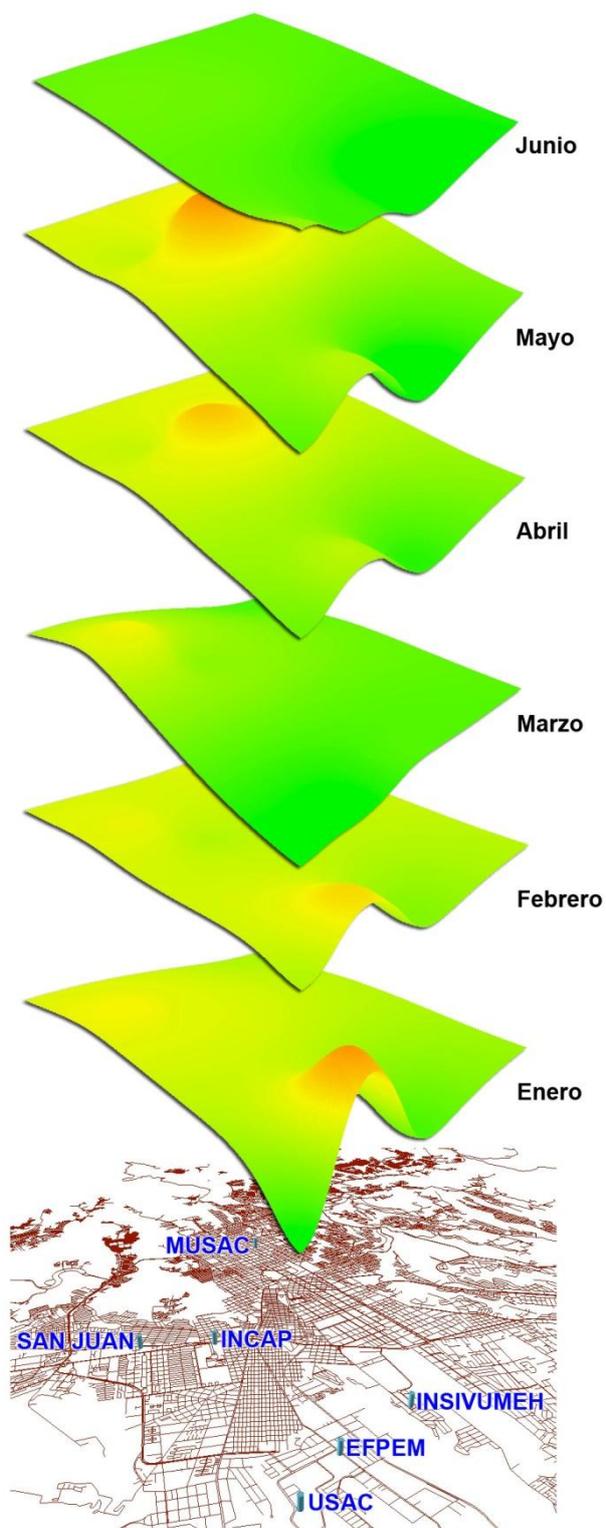


Figura 52. Valores mensuales año 2008 (enero – junio)



En las gráficas 2D la concentración de la contaminación está marcada únicamente por los colores de la rampa asignada. En cambio, la gráfica 3D brinda la facilidad de poder visualizar en las alturas la densidad de la contaminación del aire por NO<sub>2</sub>.

## CONCLUSIONES

1. Los sistemas de información geográfica facilitan la visualización y comprensión de los datos representados en ellos. Al contrario de los datos tabulados que son más difíciles de interpretar y comprender, en especial si se tienen grandes cantidades que requiere más tiempo.
2. La interpolación de datos tiene gran importancia, ya que brinda la facilidad de conocer a través de una estimación, los valores de determinada característica en los puntos geográficos no muestreados.
3. La representación de datos en forma geográfica permite observar con referencia a datos históricos, el comportamiento del fenómeno que representan a lo largo del tiempo permitiendo anticipar condiciones futuras. Dicha representación no proporciona únicamente información sino conocimiento.
4. El proceso de generación de gráficas tridimensionales a partir de muestras georeferenciadas tomadas en diferentes puntos geográficos, conlleva un proceso sencillo de aprender y reproducir.



## RECOMENDACIONES

1. Es aconsejable la utilización de sistemas de información geográfica para llevar mejor control de los cambios a través del tiempo de cualquier fenómeno o característica que se quiera estudiar.
2. A las Escuela de estudios superiores, incluir dentro del pensum de estudios temas relacionados y enfocados a los sistemas de información geográfica.
3. Se recomienda tener la mayor cantidad de puntos de toma de muestras posibles al utilizar métodos de interpolación dado que se reflejará un resultado más real.



## BIBLIOGRAFÍA

1. *ESRI Dictionary*, <http://support.esri.com>, año 2009
2. *ESRI Proceedings, Methods of generating surfaces in environmental GIS applications*, <http://proceedings.esri.com>, año 2009
3. *ESRI Web Help for ArcGIS Desktop 9.3*, <http://webhelp.esri.com>, año 2009
4. *ESRI Web site*, <http://www.esri.com>, año 2009
5. *GIS Development, Surface approximation of point data using different interpolation techniques*, <http://www.gisdevelopment.net>, septiembre 2009
6. *GIS Web Site*, <http://www.gis.com>, año 2009
7. Informe anual 2008 monitoreo del aire en la ciudad de Guatemala, Laboratorio de monitoreo del aire USAC, abril 2009.
8. *Using ArcGIS Spatial Analyst, ArcGIS 9; ESRI; 2001; págs. 135 - 139.*