



Departamento de Posgrados

Maestría en Geomática con mención en Ordenamiento Territorial

**Distribución espacial de contaminantes gaseosos NO₂, SO₂ y O₃
mediante el método de interpolación determinista y exacto IDW**

**Trabajo de Grado para la obtención del título de Master en Geomática
con mención en Ordenamiento Territorial**

**Autora:
Ing. Fernanda Elizabeth López Villalba**

**Director:
Ing. M.Sc. Paúl Ochoa Arias**

**Cuenca, Ecuador
2014**

DEDICATORIA

A mí amado hijo Daniel que es mi inspiración a seguir creciendo como madre y profesional, a mi madre Elisa y a mi hermana Nadia que siempre están ahí para mí incondicionalmente, a mi padre en la distancia.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Paul Ochoa Arias – Director del Trabajo de Grado, por una vez más colaborar conmigo en la consecución del trabajo de tesis.

Al resto de mi familia por apoyarme de distintas maneras para progresar en mi vida personal y profesional.

Al Ing. Omar Delgado por compartir sus conocimientos de manera desinteresada con el afán de generar mayor aprendizaje.

RESUMEN

En la ciudad de Cuenca a partir del año 2008, se realiza el monitoreo de contaminantes atmosféricos a través de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire gestionada en la actualidad por la EMOP EP, debido al incremento de las distintas actividades antropogénicas como el tráfico rodado, industrias, entre otros, que afectan a la calidad del aire. La red de monitoreo compuesta por 19 puntos de vigilancia distribuidas en diferentes sitios de la ciudad, consta de: una estación automática, una subred pasiva de muestreo de contaminantes gaseosos, una subred de depósito de Partículas Sedimentables (PS) y una subred activa de material particulado menor a 10 micras (MP_{10}). De cada sitio se cuenta con registros mensuales hasta el año 2012.

El presente estudio se centrará en la subred pasiva de muestreo de contaminantes gaseosos, que contiene 18 sitios de vigilancia de los contaminantes SO_2 , NO_2 y 16 estaciones de vigilancia para O_3 . El tipo de investigación que se realizará es experimental, ya que se pretende identificar y evaluar los parámetros óptimos que intervienen en el método de interpolación determinista y exacto IDW para generar los modelos de distribución de los contaminantes gaseosos.

Palabras Clave

Métodos de interpolación, deterministas y exactas, inverso a la distancia ponderada, funciones de base radial, generación de superficies continuas, validación cruzada, análisis exploratorio de datos, histogramas, QQ-Plot, semivariograma, tendencias.

ABSTRACT

The monitoring of air pollutants has been done in the city of Cuenca since 2008 through the Air Quality Monitoring Network currently managed by the EMOP EP, due to the increase of various anthropogenic activities that affect air quality such as road traffic, industries, among others. The network of 19 monitoring points located in different places of the city consists of an automatic station, a passive sampling subnet of gaseous pollutants, a passive subnet of Sediment Particle deposition (SP) and an active subnet of particulate matter less than 10 microns (PM10). There is a monthly record of each area until 2012.

This study will focus on the passive sampling subnet of gaseous pollutants covering 18 monitoring sites for the SO₂, NO₂ pollutants, and 16 monitoring stations for O₃. The type of research to be conducted is experimental, as it seeks to identify and evaluate the optimal parameters involved in the IDW (inverse distance weighting) deterministic and accurate interpolation method to generate the models of distribution for gaseous pollutants.

Keywords: Deterministic and Accurate Interpolation Method, Inverse Distance Weighting, Radial Basis Functions, Continuous Surfaces Generation, Cross-Validation, Exploratory Data Analysis, Histograms, QQ-Plot, Semivariogram, Trends.



Translated by,

Lic. Lourdes Crespo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	9
Métodos de monitoreo	10
Monitoreo de Calidad del Aire en Cuenca	10
1. MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
1.1 Área de estudio	11
1.2 Materiales y fuentes de datos.....	13
1.3 Metodología.....	13
1.3.1 Etapas del estudio	14
1.3.1.1. Organización y conversión de datos de .xls a formatos SIG.....	14
1.3.1.2. Análisis exploratorio de datos espaciales – ESDA	16
a. Análisis de la distribución de datos en base a histogramas	16
b. Gráfico QQ - Plot	18
c. Polígonos de Voronoi o Polígono de Thiessen.....	20
d. Análisis de Tendencia.....	20
e. Semivariograma	21
1.3.1.3. Aplicación de métodos de interpolación deterministas y exactas en contaminantes gaseosos	23
a. Técnica Inverso a la Distancia Ponderada (IDW).....	23
Evaluación de parámetros de la técnica IDW en la extensión Analista Geoestadístico.....	24
Criterios para la elección de los parámetros que intervienen en el IDW y diagnóstico mediante la validación cruzada	25
b. Técnica Funciones de Base Radial para el contaminante NO ₂	28
Evaluación de parámetros de la técnica FBR en la extensión Analista Geoestadístico y elección de mejores resultados	29
2. RESULTADOS	31
2.1 Generación de mapas de contaminantes gaseosos aplicando parámetros óptimos de las Técnicas IDW y Funciones de Base Radial.....	31
3. CONCLUSIONES	39
4. RECOMENDACIÓN.....	39
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
6. ANEXOS	41
ANEXO NRO. 1 - Histogramas de los contaminantes gaseosos NO ₂ , SO ₂ y O ₃ en el periodo de 2008 al 2012	41
ANEXO NRO. 2 - Gráficos QQ - Plot de los contaminantes gaseosos NO ₂ , SO ₂ , y O ₃ en el periodo 2008 al 2012	44
ANEXO NRO. 3 – Análisis de tendencias de los contaminantes gaseosos NO ₂ , SO ₂ y O ₃ en el periodo 2008 – 2012	47
ANEXO NRO. 4 – Semivariogramas de los contaminantes gaseosos NO ₂ , SO ₂ y O ₃ en el periodo 2008 – 2012	50
ANEXO NRO. 5 – Pruebas realizadas con diferentes valores sobre los parámetros que intervienen en el interpolador IDW de los contaminantes NO ₂ , SO ₂ y O ₃ en el periodo 2008 – 2012	52
ANEXO NRO. 6 – Pruebas realizadas con diferentes valores sobre los parámetros que intervienen en el interpolador Funciones de Base Radial del contaminante NO ₂ en el periodo 2008 – 2012	55

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico Nro. 1 Esquema de la Red de Monitoreo de contaminantes del cantón Cuenca	11
Gráfico Nro. 2 Organización de la Geodatabase con la información de los contaminantes gaseosos NO ₂ , SO ₂ y O ₃	14
Gráfico Nro. 3 Histograma de SO ₂ (2008) aplicado una transformación logarítmica (ln)	17
Gráfico Nro. 4 Histograma de SO ₂ (2009) aplicado una transformación logarítmica (ln)	18
Gráfico Nro. 5 Curva de Distribución normal	19
Gráfico Nro. 6 SO ₂ (2008) aplicado una transformación logarítmica, no se observa mejora en el ajuste a la distribución normal.	19
Gráfico Nro. 7 SO ₂ (2009) aplicado transformación (ln), si presenta un mejor ajuste de los datos a la distribución normal	19
Gráfico Nro. 8 Semivarianza empírica del contaminante SO ₂ (2008).....	22
Gráfico Nro. 9 Izquierda: Influencia direccional – Anisotropía. Derecha carencia de influencia direccional.	22
Gráfico Nro. 10 Comparación de los modelos con los MRM contra los MRC de los años 2011 y 2012 de SO ₂	27
Gráfico Nro. 11 Comparación de los modelos con los MRM contra los MRC de los años 2008 y 2009 de O ₃	28
Gráfico Nro. 12 Comparación de los modelos con los MRM contra los MRC de los años 2008 al 2012 de NO ₂ (FBR)	31
Gráfico Nro. 13 Histogramas del contaminante NO ₂ del periodo 2008 al 2012	41
Gráfico Nro. 14 Histogramas del contaminante SO ₂ del periodo 2008 al 2012	42
Gráfico Nro. 15 Histogramas del contaminante O ₃ del periodo 2008 al 2012	43
Gráfico Nro. 16 QQ-Plots del contaminante NO ₂ del periodo 2008 al 2012	44
Gráfico Nro. 17 QQ-Plots del contaminante SO ₂ del periodo 2008 al 2012.....	45
Gráfico Nro. 18 QQ-Plots del contaminante O ₃ del periodo 2008 al 2012	46
Gráfico Nro. 19 Tendencias globales del contaminante NO ₂ del periodo 2008 al 2012	47
Gráfico Nro. 20 Tendencias globales del contaminante SO ₂ del periodo 2008 al 2012	48
Gráfico Nro. 21 Tendencias globales del contaminante O ₃ del periodo 2008 al 2012.....	49
Gráfico Nro. 22 Semivariogramas del contaminante NO ₂ del periodo 2008 al 2012.....	50
Gráfico Nro. 23 Semivariogramas del contaminante SO ₂ del periodo 2008 al 2012	50
Gráfico Nro. 24 Semivariogramas del contaminante O ₃ del periodo 2008 al 2012	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla Nro. 1 Resumen de los campos creados para verificación de cálculos de promedios anuales... 14	14
Tabla Nro. 2 Observaciones al registro de datos 2008 – 2012 de los contaminantes gaseosos NO ₂ , SO ₂ y O ₃	15
Tabla Nro. 3 Ubicación de las estaciones de monitoreo de la ciudad de Cuenca	16
Tabla Nro. 4 Resúmenes de medidas de centralidad y forma de los contaminantes gaseosos estudiados	17
Tabla Nro. 5 Descripción de los tipos de geometría del vecindario	25
Tabla Nro. 6 Resultados de los modelos generados con la técnica IDW.....	26
Tabla Nro. 7 Resultados obtenidos para la NO ₂ aplicando Funciones de Base Radial	29
Tabla Nro. 8 Pruebas realizadas con diferentes valores sobre los parámetros del interpolador IDW del contaminante NO ₂ del periodo 2008 al 2012.....	52
Tabla Nro. 9 Pruebas realizadas con diferentes valores sobre los parámetros del	53
Tabla Nro. 10 Pruebas realizadas con diferentes valores sobre los parámetros del	54
Tabla Nro. 11 Pruebas realizadas sobre parámetros del interpolador	56

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa Nro. 1 Radios de Cobertura de estaciones a escala vecinal y urbano vecinal de contaminantes atmosféricos, 2012.....	12
Mapa Nro. 2 Polígonos de Voronoi o Thiessen generado con las estaciones de muestreo (2012) de los contaminantes gaseosos NO ₂ , SO ₂ y O ₃	20
Mapa Nro. 3 Distribución espacial del contaminante NO ₂ en el año 2008 interpolado con método determinista y exacto,.....	31
Mapa Nro. 4 Distribución espacial del contaminante NO ₂ en el año 2009 interpolado con método determinista y exacto, técnica Funciones de Base Radial – Spline with Tension.....	32
Mapa Nro. 5 Distribución espacial del contaminante NO ₂ en el año 2010 interpolado con método determinista y exacto, técnica Funciones de Base Radial – Spline with Tension.....	32
Mapa Nro. 6 Distribución espacial del contaminante NO ₂ en el año 2011 interpolado con método determinista y exacto, técnica Funciones de Base Radial – Spline with Tension.....	33
Mapa Nro. 7 Distribución espacial del contaminante NO ₂ en el año 2012 interpolado con método determinista y exacto, técnica Funciones de Base Radial – Completely Regularized Spline	33
Mapa Nro. 8 Distribución espacial del contaminante SO ₂ en el año 2008 interpolado con método determinista y exacto, técnica Inverso a la Distancia Ponderada.....	34
Mapa Nro. 9 Distribución espacial del contaminante SO ₂ en el año 2009 interpolado con método determinista y exacto, técnica Inverso a la Distancia Ponderada.....	34
Mapa Nro. 10 Distribución espacial del contaminante SO ₂ en el año 2010 interpolado con método determinista y exacto, técnica Inverso a la Distancia Ponderada.....	35
Mapa Nro. 11 Distribución espacial del contaminante SO ₂ en el año 2011 interpolado con método determinista y exacto, técnica Inverso a la Distancia Ponderada.....	35
Mapa Nro. 12 Distribución espacial del contaminante SO ₂ en el año 2012 interpolado con método determinista y exacto, técnica Inverso a la Distancia Ponderada.....	36
Mapa Nro. 13 Distribución espacial del contaminante O ₃ en el año 2008 interpolado con método determinista y exacto, técnica Inverso a la Distancia Ponderada.....	36
Mapa Nro. 14 Distribución espacial del contaminante O ₃ en el año 2009 interpolado con método determinista y exacto, técnica Inverso a la Distancia Ponderada.....	37
Mapa Nro. 15 Distribución espacial del contaminante O ₃ en el año 2010 interpolado con método determinista y exacto, técnica Inverso a la Distancia Ponderada.....	37
Mapa Nro. 16 Distribución espacial del contaminante O ₃ en el año 2011 interpolado con método determinista y exacto, técnica Inverso a la Distancia Ponderada.....	38
Mapa Nro. 17 Distribución espacial del contaminante O ₃ en el año 2012 interpolado con método determinista y exacto, técnica Inverso a la Distancia Ponderada.....	38

Fernanda Elizabeth López Villalba
Trabajo de Graduación
Paul Esteban Ochoa Arias
Octubre, 2014

Distribución espacial de contaminantes gaseosos NO₂, SO₂ y O₃ mediante el método de interpolación determinista y exacto IDW

INTRODUCCIÓN

Los seres vivos requerimos de aire limpio para subsistir sin complicaciones y libres de enfermedades, *un aire puro está compuesto de oxígeno (21%) y nitrógeno (78%) y otros gases menos comunes, de los cuales el argón es el más abundante* (OMS, 2004). Fuentes antropogénicas y naturales generan varios gases que llegan a la atmósfera y que en concentraciones mayores que las normales son venenosos para los seres humanos, animales y dañinos para las plantas. Estos incluyen el O₃, el SO₂, el NO₂, el CO y una amplia gama de Compuestos Orgánicos Volátiles. Algunos de estos gases son carcinógenos, como el benceno y el butadieno. Todos estos gases potencialmente tóxicos se denominan contaminantes del aire (OMS, 2004).

Durante el siglo XX se registraron tres episodios críticos de contaminación del aire por fuentes antropogénicas:

- *El primero en 1930 en el Valle de Meuse en Bélgica, durante cinco días una densa capa de smog se posó sobre el valle, 63 personas murieron y 6000 enfermaron. (Causas posibles SO₂, fluoruros, H₂SO₄)*
- *En 1948, en Donora Pensilvania, un evento similar ocurrió en donde casi 6000 de las 14000 personas que vivían en la ciudad enfermaron, se registraron 20 fallecidos. (Causas posibles SO₂, material particulado)*
- *El más notorio de los episodios se dio en 1952 en Londres Inglaterra, la acumulación de smog proveniente de fuegos de carbón por cinco días provocó la muerte de 4000 personas (Causas posibles SO₂, material particulado, H₂SO₄)*

(“Contaminación del aire y salud de la personas,” n.d., “Introducción a la toxicología de la contaminación del aire,” n.d.)

El episodio del Valle de Meuse intensificó la atención de la comunidad científica y de los distintos gobiernos para generar guías metodológicas que apoyen la obtención, análisis y determinación de normas para el control de contaminantes del aire, un ejemplo de estos son las guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS) cuyo objetivo es asistir a países en la formulación de sus propias guías nacionales de calidad del aire y de este modo contribuir a proteger la salud humana de la contaminación del aire. *“La calidad del aire repercute de manera directa en la calidad de vida, bienestar y salud de la población”* (Jiménez, 2013)

Bajo este contexto se realizan mediciones de indicadores de polución para monitoreo atmosférico, según la Guía de calidad del aire de la OMS, los contaminantes clave para estas mediciones, conocidos como clásicos son: SO₂, NO₂, CO, O₃, MP₅ y el plomo. (OMS, 2004)

Métodos de monitoreo

Existen tres metodologías principales para el monitoreo de la calidad del aire, las que utilizan muestreadores pasivos, muestreadores activos y analizadores automáticos; nos centraremos en los muestreadores pasivos por su relevancia para este estudio.

Los muestreadores pasivos, colectan a los contaminantes aéreos utilizando un material absorbente, sin la necesidad de bombas por lo que no requieren el suministro de energía eléctrica. Tienen ventajas específicas debidas a su bajo costo y fácil manejo, lo que permite llevar a cabo estudios a escalas muy amplias usando una metodología simple y comparable ligada a un estándar de referencia común. No requieren de operadores expertos y las muestras pueden ser analizadas en un laboratorio centralizado con la finalidad de producir un conjunto de datos armónicos. Lo que implica que se pueden llevar a cabo, con esta metodología, estudios a diferentes escalas y coberturas a un costo efectivo. Sin embargo, estos muestreadores no cubren cualquier objetivo de monitoreo, ni podrán utilizarse cuando el objetivo sea proporcionar datos en situaciones de emergencia para alertar a la población. Ya que en situaciones de alerta o en episodios de contaminación, se requiere de datos horarios o diarios. (“Introducción al monitoreo atmosférico,” n.d.)

Monitoreo de Calidad del Aire en Cuenca

En la Ciudad de Cuenca, se han realizado estudios como el de “Modelación de la geoinformación de contaminación del aire en la ciudad de Cuenca”, partiendo de resultados del estudio elaborado por la Comisión de Gestión Ambiental (CGA) del I. Municipio de Cuenca y el Centro de Estudios Ambientales (CEA) de la Universidad de Cuenca denominado “Monitoreo pasivo de la calidad del aire en la ciudad de Cuenca”. Este considero 19 puntos de muestreo con valores mensuales de los contaminantes NO₂ y O₃, durante un periodo de 9 meses a partir de septiembre de 2005 hasta mayo del 2006. Se ejecutaron análisis mediante interpolaciones con el método Determinista y Exacto IDW para identificar zonas de afección en el casco urbano, como resultado se obtuvo un área de 94,29 (ha) que representa el 1,36% del territorio de la ciudad, esta se ubica en el área de Salud Nro. 2, de Miraflores y la población vulnerable abarco el 6,31% de la población total de la Ciudad de Cuenca. (Balarezo Sarmiento, 2009)

Posteriormente, desde el año 2008 se continua con mediciones de la calidad del aire a cargo de la Corporación para el Mejoramiento del Aire de Cuenca Cuencaire y a finales del 2010 el monitoreo se encuentra a cargo de la Empresa Municipal de Movilidad EMOV-EP, de la secretaría de Movilidad, Tránsito y Transporte del Municipio de Cuenca.

La calidad del aire es monitoreada a través de tres subredes de monitoreo y una estación automática de monitoreo continuo. Los subredes son: subred pasiva de contaminantes gaseosos, subred de depósitos de partículas sedimentables y la subred activa de material particulado; y a partir de junio de 2012 se registra mediciones en la estación automática de monitoreo continuo.

El presente estudio se enfocara en la subred pasiva de contaminantes gaseosos que registra en 18 estaciones, los elementos de: dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos; y en 16 estaciones se registra Ozono (O₃). Los datos a ser analizados corresponden al valor promedio anual observado de dichos contaminantes, correspondientes al periodo 2008 al 2012. El muestreo de NO₂ y O₃ se realiza dos veces por mes, tras exposiciones continuas de 10 a 12 días. SO₂, Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos en muestras expuestas durante 30 días consecutivos una vez por mes. (EMOV EP, 2012)

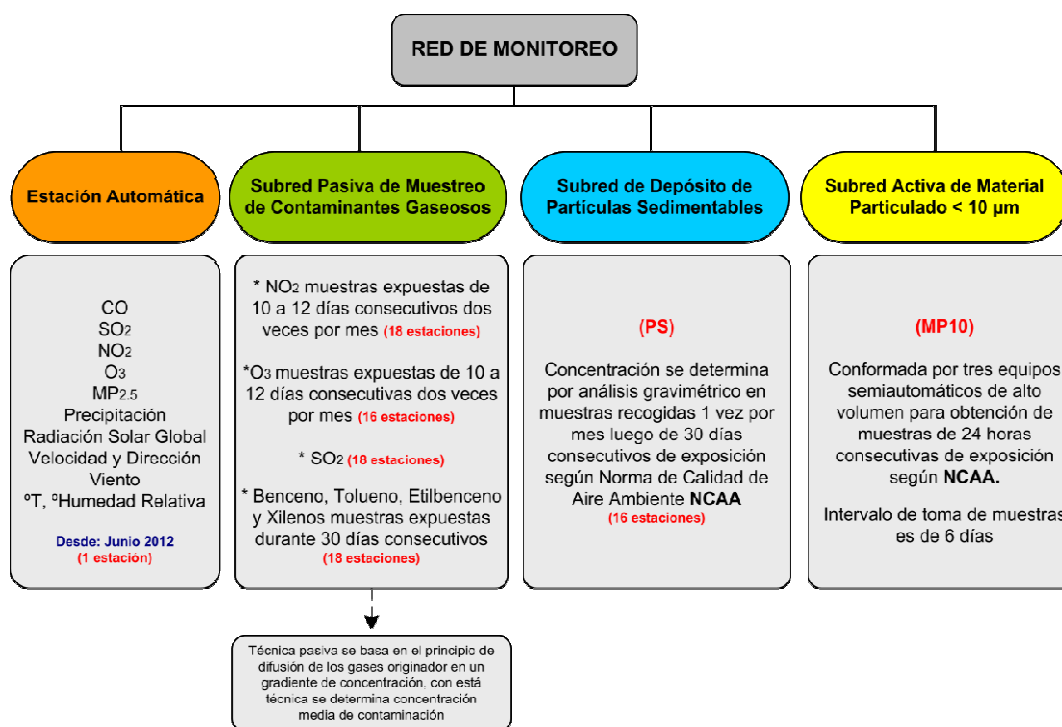


Gráfico Nro. 1 Esquema de la Red de Monitoreo de contaminantes del cantón Cuenca

Fuente: (EMOV – EP, 2012)

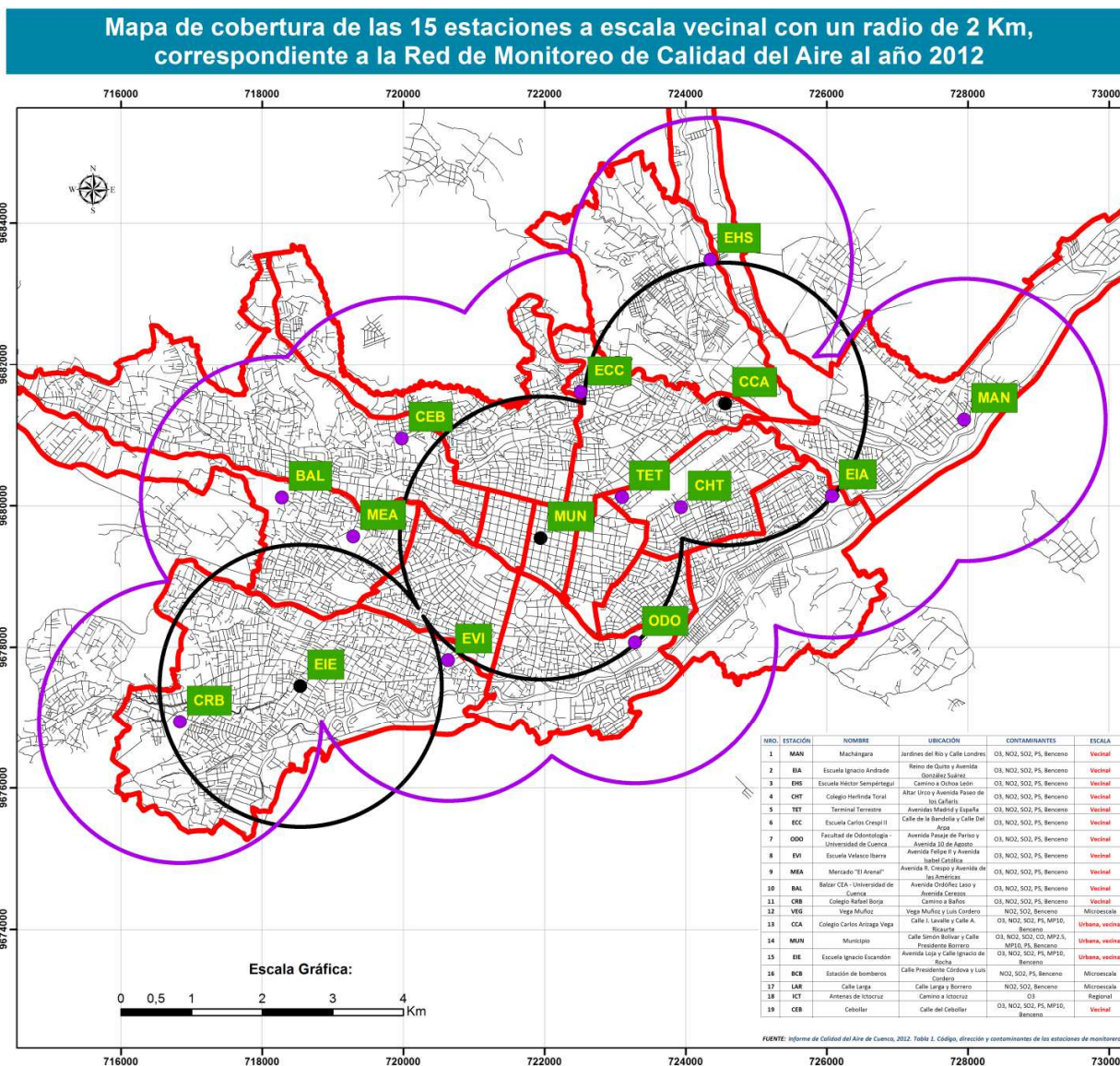
Elaborado por: Fernanda López, 2014

El estudio se concentra en el análisis de la distribución espacial de contaminantes gaseosos en el perímetro urbano de la ciudad de Cuenca a partir de técnicas de interpolación deterministas y exactas que permiten modelar y describir su comportamiento en el espacio, para lo cual se emplearán registros (datos), técnicas estadísticas y sistemas de información geográfica.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde al perímetro urbano de la ciudad de Cuenca, localizado en la Provincia del Azuay, al sur de la sierra ecuatoriana. El límite urbano tiene una superficie de 7.300 (ha), en el que se encuentran distribuidas 15 parroquias urbanas que albergan una población de 331.888 habitantes (Censo de Población y Vivienda 2010, INEC). La Subred pasiva de contaminantes gaseosos se encuentra instalada en el perímetro urbano, ver Mapa Nro. 1.



INFORMACIÓN BASE

Sistema de Coordenadas: WGS 1984 UTM Zone 17S
Proyección: Transversa Mercator

Escala de Impresión: 1:52.500

Cartografía Base:
GAD Municipal de Cuenca

Cartografía Temática:
Coordenadas de las 15 Estaciones de contaminantes gaseosos, Escala Urbana vecinal y vecinal
EMOV EP

LEYENDA

ESCALA

- urbana, vecinal
- vecinal

Radio de Cobertura 2Km

ESCALA

- urbana, vecinal
- vecinal
- Parroquias Urbanas de la Ciudad de Cuenca
- Vialidad Oficial

MAPA DE UBICACIÓN

Parroquias Urbanas de Cuenca

- EL VECINO
- GIL RAMIREZ D.
- SAN BLAS
- BELLAVISTA
- HERMANO MIGUEL
- SAN SEBASTIAN
- CAÑARIBAMBA
- HUAYNA CAPAC
- SUCRE
- EL BATAN
- MACHANGARA
- TOTORACOCCHA
- EL SAGRARIO
- MONAY
- YANUNCAY

Mapa Nro. 1 Radios de Cobertura de estaciones a escala vecinal y urbano vecinal de contaminantes atmosféricos, 2012
Fuente: (EMOV EP, GAD Municipal de Cuenca)
Elaborado por: Ing. Fernanda López V.

1.2. Materiales y fuentes de datos

- Coordenadas de la localización de las estaciones de monitoreo de la Subred Pasiva de contaminantes gaseosos, en el sistema de coordenadas geográfico SCG: UTM Zona 17S, WGS84.
- Registros en formato de Excel de la Subred Pasiva de contaminantes gaseosos, los elegidos para este estudio corresponden a: SO₂, NO₂ y O₃ durante el periodo 2008 al 2012. (EMOP – EP)
- Límite Urbano de la Ciudad de Cuenca en formato shapefile de ESRI. SCG: UTM Zona 17S, WGS84. (PDOT Cantón Cuenca, 2010)
- Sistemas de Información Geográfica, (ARCGIS 10.1, Extensión Geostatistical)

1.3. Metodología

Entre los métodos de interpolación más utilizados se encuentran el Kriging que es un método geoestadístico y el Inverso a la Distancia Ponderada IDW que es un método determinista y exacto, estos métodos son muy similares ya que, *asumen que los datos más cercanos a un punto conocido tienen mayor peso o influencia sobre la interpolación, influencia que va disminuyendo conforme se aleja del punto de interés* (Villatoro, Henríquez, & Sancho, 2008), *la diferencia entre los dos radica en que:*

- El método Kriging cuantifica la estructura espacial de los datos mediante variogramas (autocorrelación) (Krivoruchko, K. y A. Gribov, 2004),
- Mientras que, el método IDW *usa un algoritmo simple basado en distancias, no se apoya en métodos estadísticos* (Johnston et al, 2001)

Jiménez (2013) en su estudio de ***“Población y polución atmosférica intraurbana por dióxido de nitrógeno en Madrid: análisis desde la justicia ambiental basado en Sistemas de Información Geográfica”***, señala que, *de una muestra espacial de 32 estaciones con datos de NO₂ recogidos, realizó un ensayo empleando los dos tipos de interpoladores: el Kriging ordinario y la media ponderada por el inverso a la distancia (IDW) con ArcGIS Spatial Analyst, tras diversos ensayos, y valorando los errores (RMS) y las amplitudes de los valores interpolados, identifico como más aceptable el IDW, con el generó una capa raster (grid) con las medias estimadas de NO₂ para todo el municipio a una resolución de 50m.*

En el estudio, ***“Geoestadística aplicada a estudios de contaminación ambiental”***, (Sotter, Ipiá, Vaca, & Pulido, 2001), realizan un análisis de métodos de interpolación para realizar estimaciones del contaminante Material Particulado (PM₁₀) de 14 estaciones en la zona urbana de Bogotá para los días 24 de Abril de 2000, 13 de Febrero y 26 de Abril de 2001 a las 14 horas, además se incluye el día del 15 de Febrero de 2002, dicho análisis contempla un método determinista (IDW) y uno geoestadístico el (Kriging Ordinario); concluyen que: *entre los métodos de interpolación analizados, el mejor método de interpolación es la Distancia Inversa, para ello la herramienta de decisión utilizada fue la Validación Cruzada. Aunque Kriging es considerado el mejor estimador lineal conocido con el acrónimo BLUE (Best Linear Unbiased Estimator), sus estimaciones obtienen un intervalo de error mayor al de la Distancia Inversa, posiblemente debido al tamaño de muestra con el que se cuenta.*

El trabajo desarrollado sobre “Optimización del diseño de las redes de monitoreo de calidad del aire y su aplicación a NO₂ y O₃ en Sevilla, España”, Lozano, Usero, & Vanderlinden (2010), emplearon muestreadores en 139 sitios. Los valores de concentración obtenidos fueron espacialmente interpolados para asignar un valor de contaminación a todos los puntos de la zona de estudio. El registro de datos, se utiliza para la determinación de la contaminación urbana y suburbana, se caracterizaron por un gran número de puntos de muestreo concentrados de manera significativa, y por lo tanto, se utilizó el método de distancia inversa ponderada (IDW) para la interpolación espacial.

De la investigación realizada se puede observar que para la representación y análisis de la distribución de contaminantes atmosféricos, la tendencia es aplicar métodos de interpolación deterministas y exactos específicamente la técnica IDW que brinda mejores resultados a la hora de generar superficies continuas.

1.3.1. Etapas del estudio

El presente estudio se desarrolló en tres etapas:

1.3.1.1. Organización y conversión de datos de .xls a formatos SIG

Los registros de la subred pasiva de contaminantes gaseosos fueron entregados a la UDA en formato Excel, organizados por años y contienen las mediciones de las concentraciones mensuales y las medias anuales de cada contaminante.

Estas tablas de información fueron vinculadas a través de un enlace (**Join attributes from a table**) al componente cartográfico de las estaciones georeferenciadas, en base a su codificación y posteriormente exportadas a una geodatabase donde se encuentran organizadas por contaminante y por año. La geodatabase se encuentra en el Sistema de Coordenadas Geográfica: **UTM Zona 17S, Datum WGS84**.

Una vez organizada la información en una Geodatabase, se realizó una verificación de los valores calculados en el campo que contiene el promedio anual de los indicadores de polución NO₂, SO₂ y O₃, para lo cual se creó campos de verificación, los mismos que se detallan en la Tabla Nro. 1:

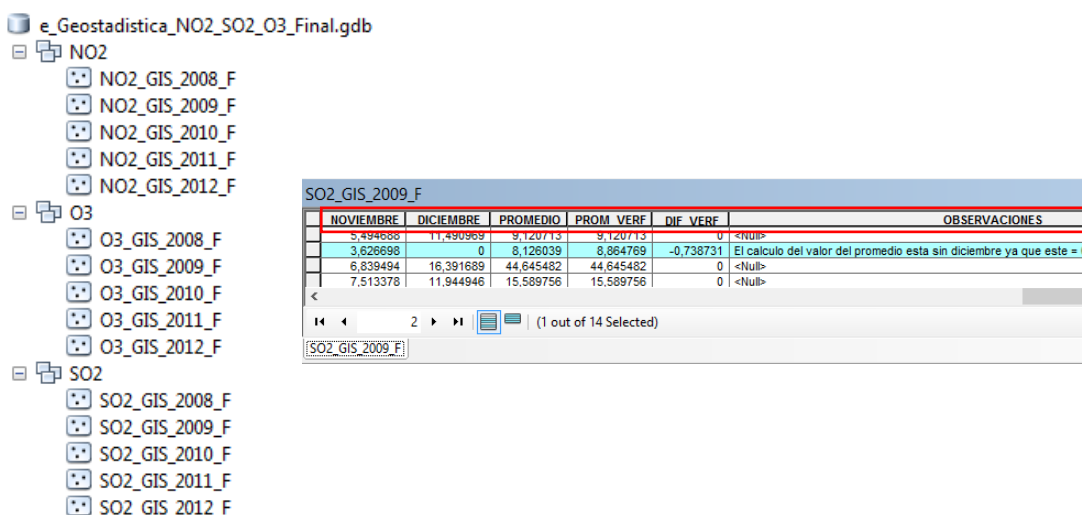


Gráfico Nro. 2 Organización de la Geodatabase con la información de los contaminantes gaseosos NO₂, SO₂ y O₃

Campos creados para verificación	Descripción del campo
PROM_VERF	Campo sobre el cual se calcula nuevamente el promedio anual para verificación. Campo tipo Double
DIF_VERF	Calcula la diferencia entre el PROMEDIO (EMOV) contra el PROM_VERF, si el resultado es ≠ que 0, se revisa el registro para verificar porque el campo está mal calculado. Campo tipo Double
OBSERVACIONES	Detalle de las observaciones encontradas de los registros donde el DIF_VERF ≠ 0. Campo tipo texto de largo 100.

Tabla Nro. 1 Resumen de los campos creados para verificación de cálculos de promedios anuales

- **Observaciones a la verificación de valores por contaminante**

NO₂ – (Registros 2 veces por mes)	
1.	Para los años comprendidos entre el 2008 al 2010 se registran mediciones de 14 estaciones a escala vecinal y urbano vecinal, a partir del año 2011 se incrementa una estación denominada Cebollar (CEB) de escala vecinal.
2.	Las 14 estaciones de NO ₂ en 2010 solo tienen registrado una medición por mes, se desconoce si ésta corresponde al promedio mensual o a un solo valor registrado en ese año.
3.	Se verificó el PROM_ANUAL de los años 2008 al 2012 y todos se encuentran calculados correctamente, usar este campo para efectos de cálculo
SO₂ - (Registros 1 vez por mes)	
2008	
1.	Se cuenta con registros de 14 estaciones a escala vecinal y urbano vecinal
2.	El promedio para todas las estaciones se obtiene para 11 meses ya que no se cuenta con la columna de datos del mes de enero Excepciones:
3.	Adicionalmente, la estación MEA no cuenta con registro de datos del mes de mayo (campo vacío), esta estación calcula su promedio sobre 10 meses
4.	Para efectos de cálculo se utilizará el campo PROM_ANUAL
2009	
1.	Se cuenta con registros de 14 estaciones a escala vecinal y urbano vecinal
2.	Existen registros de mediciones para 12 meses (ENE – DIC) Excepciones:
3.	La estación EIA no cuenta con el registro del mes de mayo (campo vacío), este sitio de muestreo saca su promedio sobre 11 meses
4.	La estación MAN registra en el mes de diciembre el valor de 0, el cual influye en el cálculo del promedio (Promedio EMOV con MAN en diciembre (0) = 8,13. Promedio revisión con MAN en diciembre (vacío) = 8,86)
5.	Para efectos de cálculo se usará el campo PROM_VERF ya que este no contempla el mes de diciembre de la estación MAN , ni el mes de mayo de la estación EIA
2010	
1.	Se cuenta con registros de 14 estaciones a escala vecinal y urbano vecinal
2.	Existen registros de mediciones para 12 meses (ENE – DIC) Excepciones:
3.	La estación EIA no cuenta con el registro del mes de enero (campo vacío), este sitio de muestreo saca su promedio sobre 11 meses
4.	Las estaciones CCA y MEA no cuentan con registros de datos para el mes de marzo (campos vacíos), estos sitios de muestreo sacan su promedio para 11 meses
5.	Para efectos de cálculo se utilizará el campo PROM_ANUAL
2011	
1.	Se cuenta con 15 estaciones a escala vecinal, ya que con respecto al último año se incrementó la estación a escala vecinal del Cebollar denominada CEB
2.	Existen registros de mediciones para 12 meses (ENE – DIC) Excepciones:
3.	La estación EIE no cuenta con datos del mes de enero (campo vacío), este sitio de muestreo saca su promedio sobre 11 meses
4.	Las estaciones BAL y CEB no cuentan con datos del mes de febrero (campos vacíos), igual que la estación anterior estos sitios calculan su promedio sobre 11 meses.
5.	Para efectos de cálculo se utilizará el campo PROM_ANUAL
2012	
1.	Se cuenta con 15 estaciones a escala vecinal y urbano vecinal
2.	Existen registros de mediciones para 12 meses (ENE – DIC) Excepciones:
3.	Las estaciones TET y BAL no cuentan con datos del mes de abril, tienen registrado S/D , para estos sitios de muestreo se calcula el promedio sobre 11 meses
4.	Para efectos de cálculo se usará el campo PROM_VERF
O₃ – (Registros 2 veces por mes)	
1.	Para los años comprendidos entre el 2008 al 2010 se registran mediciones de 14 estaciones a escala vecinal y urbano vecinal, a partir del año 2011 se incrementa una estación denominada Cebollar (CEB) de escala vecinal.
2.	Todos los promedios de ozono troposférico están correctamente calculados.
3.	Las 14 estaciones de O ₃ en 2010 solo tienen registrado una medición por mes, se desconoce si ésta corresponde al promedio mensual o a un solo valor registrado en ese año.
4.	Para efectos de cálculo se utilizará el campo PROM_ANUAL para todos los O ₃ (2008 – 2012)

Tabla Nro. 2 Observaciones al registro de datos 2008 – 2012 de los contaminantes gaseosos NO₂, SO₂ y O₃

- **Estaciones de monitoreo a ser empleadas en el estudio**

La subred de pasiva de muestreo de contaminantes gaseosos al 2012 consta de: 18 estaciones para NO₂ y SO₂, de las cuales 15 corresponden a escala vecinal y 3 a microescala (**BCB**, **LAR** y **VEG**). En el estudio se consideran únicamente las 15 estaciones de escala vecinal.

Para O₃ existen de 16 estaciones: 15 a escala vecinal y una a escala regional, esta última se localiza fuera del límite urbano por lo que no se la ha considerado en los análisis.

NRO.	ESTACIÓN	NOMBRE	UBICACIÓN	CONTAMINANTES	ESCALA
1	MAN	Machángara	Jardines del Río y Calle Londres	O3, NO2, SO2, PS, Benceno	Vecinal
2	EIA	Escuela Ignacio Andrade	Reino de Quito y Avenida González Suárez	O3, NO2, SO2, PS, Benceno	Vecinal
3	EHS	Escuela Héctor Sempértegui	Camino a Ochoa León	O3, NO2, SO2, PS, Benceno	Vecinal
4	CHT	Colegio Herlinda Toral	Altar Urco y Avenida Paseo de los Cañaris	O3, NO2, SO2, PS, Benceno	Vecinal
5	TET	Terminal Terrestre	Avenidas Madrid y España	O3, NO2, SO2, PS, Benceno	Vecinal
6	ECC	Escuela Carlos Crespi II	Calle de la Bandolía y Calle Del Arpa	O3, NO2, SO2, PS, Benceno	Vecinal
7	ODO	Facultad de Odontología - Universidad de Cuenca	Avenida Pasaje de Paraíso y Avenida 10 de Agosto	O3, NO2, SO2, PS, Benceno	Vecinal
8	EVI	Escuela Velasco Ibarra	Avenida Felipe II y Avenida Isabel Católica	O3, NO2, SO2, PS, Benceno	Vecinal
9	MEA	Mercado "El Arenal"	Avenida R. Crespo y Avenida de las Américas	O3, NO2, SO2, PS, Benceno	Vecinal
10	BAL	Balzay CEA - Universidad de Cuenca	Avenida Ordóñez Laso y Avenida Cerezos	O3, NO2, SO2, PS, Benceno	Vecinal
11	CRB	Colegio Rafael Borja	Camino a Baños	O3, NO2, SO2, PS, Benceno	Vecinal
12	VEG	Vega Muñoz	Vega Muñoz y Luis Cordero	NO2, SO2, Benceno	Microescala
13	CCA	Colegio Carlos Arízaga Vega	Calle J. Lavalle y Calle A. Ricaurte	O3, NO2, SO2, PS, MP10, Benceno	Urbana, vecinal
14	MUN	Municipio	Calle Simón Bolívar y Calle Presidente Borrero	O3, NO2, SO2, CO, MP2.5, MP10, PS, Benceno	Urbana, vecinal
15	EIE	Escuela Ignacio Escandón	Avenida Loja y Calle Ignacio de Rocha	O3, NO2, SO2, PS, MP10, Benceno	Urbana, vecinal
16	BCB	Estación de bomberos	Calle Presidente Córdova y Luis Cordero	NO2, SO2, PS, Benceno	Microescala
17	LAR	Calle Larga	Calle Larga y Borrero	NO2, SO2, Benceno	Microescala
18	ICT	Antenas de Ictocruz	Camino a Ictocruz	O3	Regional
19	CEB	Cebollar	Calle del Cebollar	O3, NO2, SO2, PS, MP10, Benceno	Vecinal

Tabla Nro. 3 Ubicación de las estaciones de monitoreo de la ciudad de Cuenca

1.3.1.2. Análisis exploratorio de datos espaciales – ESDA

Utilizando la extensión del Analista Geoestadístico, a través de su menú de Exploración de datos que comprende un conjunto de herramientas principalmente de tipo gráfico, se exploró los datos de los contaminantes NO₂, SO₂ y O₃ en el periodo 2008 al 2012, como paso previo a la ejecución de la técnica de interpolación determinista y exacta IDW. Los resultados del análisis exploratorio se describen a continuación:

a. Análisis de la distribución de datos en base a histogramas

La herramienta gráfica de Histogramas provee de información estadística descriptiva correspondiente a medidas de centralidad, dispersión y forma que permiten identificar la distribución de los datos. Para este análisis se utilizó las medidas de centralidad y forma.

- **Medidas de centralidad**

Corresponden a la media y a la mediana, el análisis de estas dos medidas es una forma de evaluar la distribución de los datos; si la división de $\frac{\bar{x}}{M}$ da como resultado un valor próximo a 1 se puede considerar que se tiene una **distribución normal de datos**.

Count	: 14	Skewness	: 0,20455
Min	: 5,2917	Kurtosis	: 2,3878
Max	: 26,877	1-st Quartile	: 10,192
Mean	: 14,963	Median	: 15,006
Std. Dev.	: 6,0418	3-rd Quartile	: 19,633

- **Forma**

Como alternativa para analizar la distribución normal de los datos se empleó los valores del coeficiente de asimetría o sesgo (Skewness) y la Curtosis (Kurtosis).

- El sesgo indica que tiene una forma simétrica si su valor es próximo o igual a 0. Cuando se tiene valor de sesgo mayor a cero se recomienda aplicar una transformación de tipo logarítmica (ln) a los datos.
- La curtosis debe tener un valor aproximado o igual que 3 para garantizar una distribución normal de datos.

En la **Tabla Nro. 4** en sus apartados A., B. y C., se condensan los valores de centralidad y forma de los contaminantes gaseosos estudiados durante el periodo 2008 al 2012.

A. TABLA RESUMEN DE VALORES DE CENTRALIDAD Y FORMA OBTENIDOS A PARTIR DE HISTOGRAMAS CONTAMINANTE NO₂ (2008 – 2012)

Archivo	Count	Min	Max	Mean	Std. Dev	Sesgo	Kurtosis	1-st Quartile	Median	3-rd Quartile	Mean/Median
NO2_GIS_2008_F	14	5,2917	26,877	14,963	6,0418	0,20455	2,3878	10,192	15,006	19,633	0,997134
NO2_GIS_2009_F	14	7,8678	22,835	13,604	4,4504	0,61427	2,397	10,374	12,792	16,137	1,063477
NO2_GIS_2010_F	14	10,972	25,204	15,716	4,3743	0,83617	2,6076	12,224	14,492	18,232	1,084460
NO2_GIS_2011_F	15	8,1824	22,103	13,044	3,7869	0,92428	3,3477	10,114	12,086	14,219	1,079265
NO2_GIS_2012_F	15	6,7534	20,46	11,937	3,8609	0,64267	2,5731	9,2128	10,509	15,292	1,135884

B. TABLA RESUMEN DE VALORES DE CENTRALIDAD Y FORMA OBTENIDOS A PARTIR DE HISTOGRAMAS CONTAMINANTE SO₂ (2008 – 2012)

Archivo	Count	Min	Max	Mean	Std. Dev	Sesgo	Kurtosis	1-st Quartile	Median	3-rd Quartile	Mean/Median
SO2_GIS_2008_F	14	6,2817	23,462	10,951	4,5078	1,5239	5,2711	7,1816	10,734	12,427	(*1) 1,020216
SO2_GIS_2009_F	14	6,167	44,645	16,909	9,6653	1,7212	5,91	10,114	15,357	19,581	(*2) 1,101061
SO2_GIS_2010_F	14	4,9077	16,791	9,2673	3,3266	0,8616	2,8908	7,2568	8,1014	11,59	1,143913
SO2_GIS_2011_F	15	5,3307	11,137	7,6957	1,6442	0,40335	2,5567	6,4933	7,8073	8,7909	0,985706
SO2_GIS_2012_F	15	3,7208	9,6437	6,1315	1,7121	0,58231	2,4248	4,6835	5,8091	6,9183	1,055499

C. TABLA RESUMEN DE VALORES DE CENTRALIDAD Y FORMA OBTENIDOS A PARTIR DE HISTOGRAMAS CONTAMINANTE O₃ (2008 – 2012)

Archivo	Count	Min	Max	Mean	Std. Dev	Sesgo	Kurtosis	1-st Quartile	Median	3-rd Quartile	Mean/Median
O3_GIS_2008_F	14	25,708	36,345	33,262	2,7191	-1,5354	5,2976	32,732	33,621	35,364	(*3) 0,989322
O3_GIS_2009_F	14	29,684	39,463	34,618	2,6182	0,007000	2,5022	32,832	34,499	36,167	1,003449
O3_GIS_2010_F	14	23,979	30,598	27,843	1,7619	-0,43986	3,0447	27,235	27,862	28,637	0,999318
O3_GIS_2011_F	15	23,456	30,033	26,078	2,0504	0,63986	2,5539	24,34	25,739	27,127	1,013171
O3_GIS_2012_F	15	27,079	36,006	32,024	2,4228	-0,045385	2,5373	30,443	31,375	33,868	1,020685

Tabla Nro. 4 Resúmenes de medidas de centralidad y forma de los contaminantes gaseosos estudiados

Análisis de resultados

- **NO₂** cuenta con una distribución normal de los datos al obtener valores próximos a 1 por cuanto la media se asemeja a la mediana, además se aprecia que en cuanto a la forma de la curva no se presentan sesgos significativos de consideración, la curtosis se encuentra dentro del rango cercano a 3.
- **SO₂** durante los años 2008 y 2009 no presenta una distribución normal de datos ya que en ambos años se presentan sesgos positivos, en este caso se empleó una transformación de datos de tipo logarítmica, esta se encuentra disponible en ArcGIS, posteriormente se debe continuar con los análisis requeridos. Para el resto de años los datos responden a una distribución normal.

*1 **Sesgo positivo**, se aplicó una transformación logarítmica (ln) al valor del promedio anual (SO₂ 2008) debido a que se detectó una asimetría positiva y una curtosis > 3, se obtuvo el siguiente resultado $\bar{x}/M = 0,980884$, lo que indica que no hay mayor variación con el resultado inicial, sin embargo la transformación mejoró la distribución de los datos con sesgo más cercana a cero (0) y curtosis próxima a 3.

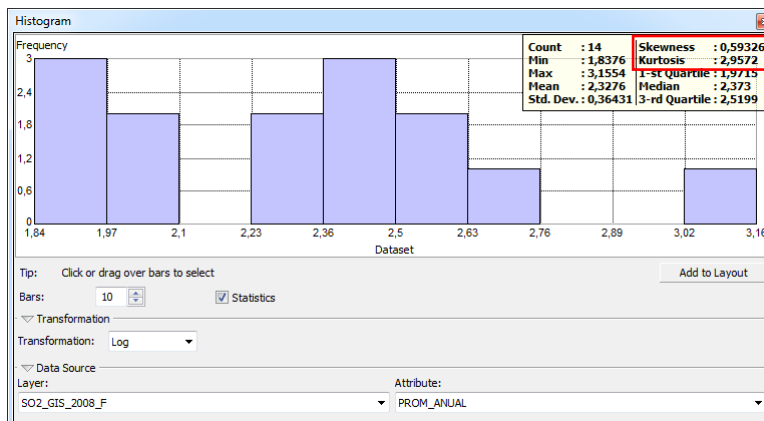


Gráfico Nro. 3 Histograma de SO₂ (2008) aplicado una transformación logarítmica (ln)

*2 **Sesgo positivo**, igualmente se aplicó una transformación logarítmica (**ln**) al valor del promedio anual (SO_2 2009) y se obtuvo el siguiente resultado $\bar{x}/M = 0,990048$, lo que indica que este tiene un mejor comportamiento que los datos originales, esto se puede apreciar en el siguiente histograma.

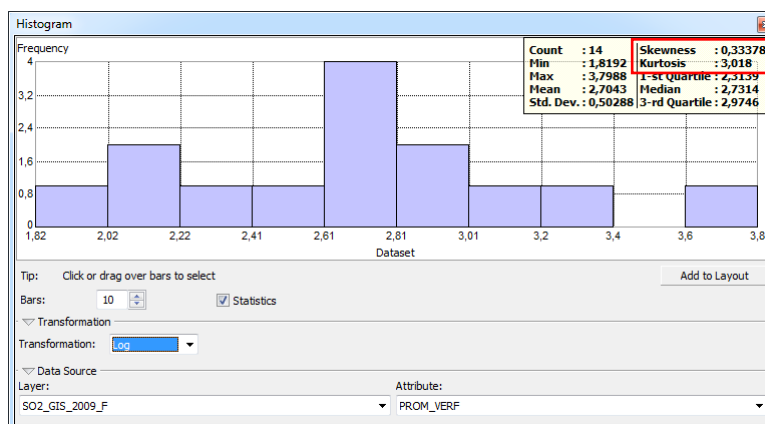


Gráfico Nro. 4 Histograma de SO_2 (2009) aplicado una transformación logarítmica (**ln**)

- O_3 cuenta con una distribución normal de datos para todos sus años excepto para el 2008, en donde se presenta una asimetría negativa, en estos casos se debe realizar una normalización de datos.

Ver **Anexo Nro. 1** – Histogramas de los contaminantes gaseosos NO_2 , SO_2 y O_3 en el periodo de 2008 al 2012.

b. Gráfico QQ - Plot

El gráfico de probabilidad cuantil-cuantil (QQ_Plot Normal) es un método gráfico que nos permite comparar la distribución de un conjunto de datos con una distribución especificada. (Castillo & Lozano, 2007)

El gráfico cuantil-cuantil normal se utiliza para evaluar la similitud de la distribución de un conjunto de valores con el de una distribución normal estándar (la típica curva de campana, cuando se muestra en un histograma). La línea en el diagrama cuantil-cuantil normal muestra los valores esperados para una distribución normal: mientras más cerca estén los valores de la línea, más se acercará la distribución a lo normal. (ESRI, 2013a)

Análisis de resultados

- NO_2 en general durante el periodo 2008 – 2012 presenta una distribución normal del conjunto de datos estudiados, corroborando lo que se apreció en los histogramas obtenidos en el ítem anterior.
- SO_2 en los años 2008 y 2009 careció de una distribución normal de datos ya que en estos años se identificaron previamente valores extremos; para el año 2008 se identificó el valor extremo en la estación **CCA** ($\text{PROM_ANUAL} = 23,46$), mientras que para el 2009 fue en la estación **ODO** ($\text{PROM_ANUAL} = 44,65$). Se verificó que estos valores extremos se encuentren en el rango de datos permitidos realizando el siguiente cálculo con los valores de la media y el valor de desviación típica:

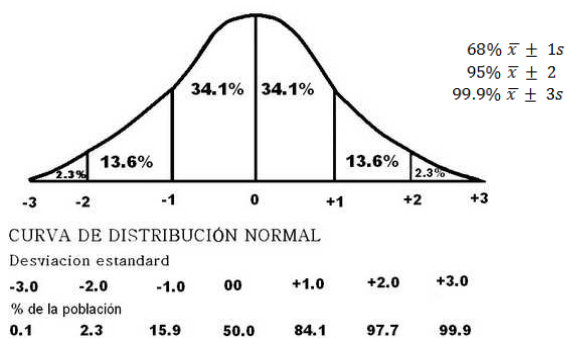
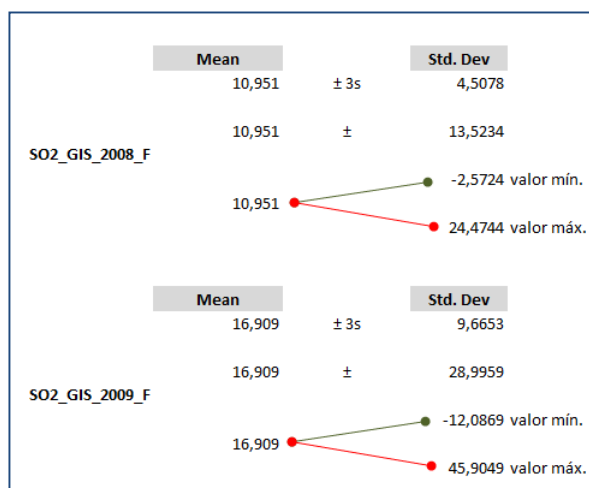


Gráfico Nro. 5 Curva de Distribución normal
 Fuente: (<http://teccuzmauro.blogspot.com/2009/05/varianza-la-varianza-es-la-media.html>)



Una vez realizado el calculo se confirma que estos valores extremos se encuentran dentro del rango permitido de hasta 3s.

Según lo indentificado anteriormente, se aplico en los datos de **SO₂** del 2008 y 2009 la transformación logarítmica en la gráfica QQ-Plot, que se indica a continuación.

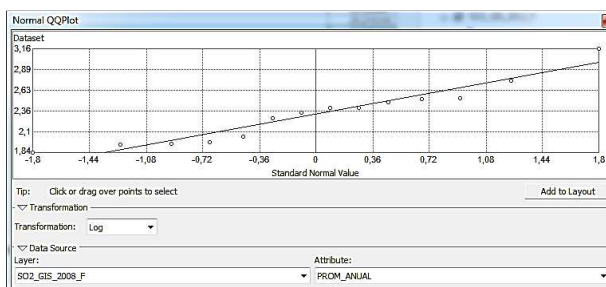


Gráfico Nro. 6 SO₂ (2008) aplicado una transformación logarítmica, no se observa mejora en el ajuste a la distribución normal.

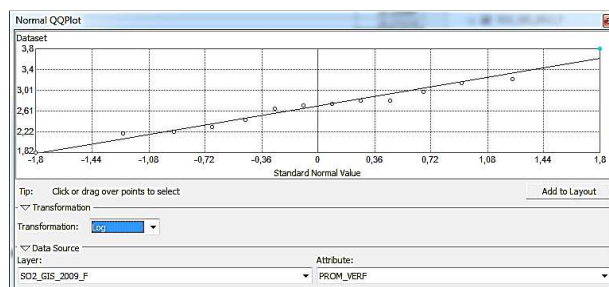
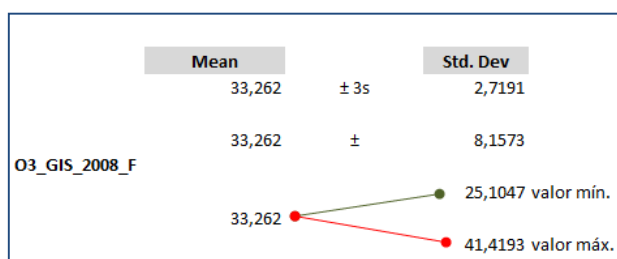


Gráfico Nro. 7 SO₂ (2009) aplicado transformación (ln), si presenta un mejor ajuste de los datos a la distribución normal

Para el periodo 2010 al 2012 de este contaminante, se observó que existe una distribución normal de los datos.

- **O₃** correspondiente al año 2008, presenta un valor extremo localizado en la estación **MAN** (**PROM_ANUAL = 25,71**), causando un sesgo negativo de **-1,5354**. El resto de años del 2009 al 2012 presentan una distribución normal.



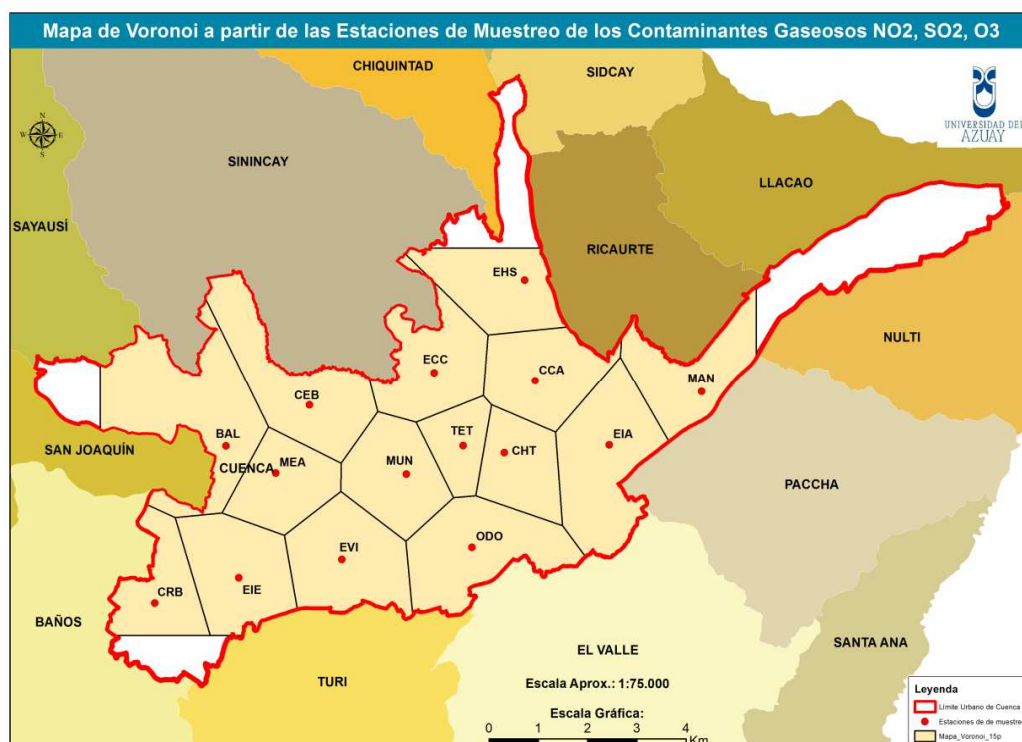
Este valor extremo se encuentra dentro del rango de valores permitido para los análisis posteriores.

En el **Anexo Nro. 2** se encuentran los gráficos QQ Plot de los tres contaminantes estudiados.

c. Polígonos de Voronoi o Polígono de Thiessen

Los polígonos de Thiessen es uno de los métodos de interpolación más simples, basado en la distancia euclidiana, siendo especialmente apropiada cuando los datos son cualitativos. Se crean al unir los puntos entre sí, trazando las mediatrices de los segmento de unión. Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control, de manera que el perímetro de los polígonos generados sea equidistante a los puntos vecinos y designando su área de influencia. (Wikipedia, 2014)

El objetivo de elaborar este mapa fue el de generar áreas de influencia de las estaciones de la subred pasiva de contaminantes gaseosos (15 estaciones), sin perder de vista que para cualquier otro análisis el radio de cobertura de las estaciones a escala vecinal y urbana vecinal es 2 km.



Mapa Nro. 2 Polígonos de Voronoi o Thiessen generado con las estaciones de muestreo (2012) de los contaminantes gaseosos NO_2 , SO_2 y O_3

d. Análisis de Tendencia

El análisis de tendencia nos proporciona un gráfico en tres dimensiones que ayuda a identificar tendencias globales en los datos.

La localización de los puntos muestrales (datos) son dibujados sobre un plano x,y . El valor de cada punto es representado por la altura de un vector en la dimensión z .

- En el Plano YZ , representa la dirección Norte-Sur.
- En el Plano XZ , representa la dirección Este-Oeste.

El resultado es un gráfico de dispersión visto en tres dimensiones. Sobre cada plano lateral se ajustan polinomios y las curvas son representadas sobre los gráficos. (Cañada Torrecilla, 2006)

ArcGIS para la generación del gráfico de tendencia, ajusta por defecto una función de segundo grado. El análisis de tendencia realizado sobre los tres contaminantes estudiados determinó que el mejor ajuste se obtuvo con un polinomio de tercer grado.

Análisis de resultados

En el **Anexo Nro. 3** se pueden revisar los gráficos de tendencias de los contaminantes gaseosos NO₂, SO₂ y O₃ en el periodo 2008 al 2012.

- **NO₂ (2008 – 2012)**

Trazado de la curva en el plano XZ: Se observó la presencia de concentraciones altas en la porción central del plano y que disminuyen su valor conforme se alejan al este y oeste respectivamente.

Trazado de la curva en el plano YZ: Las concentraciones de NO₂ son altas en el centro del plano y bajas en los extremos correspondientes al norte y sur.

- **SO₂ (2008 – 2012)**

Trazado de la curva en el plano XZ: Concentraciones altas y bajas de este contaminante se encuentran localizadas en el centro y oeste de la ciudad, en el este se observó poca concentración. En el caso del año 2011 se aprecia que existen adicionalmente concentraciones altas en el oeste.

Trazado de la curva en el plano YZ: Las concentraciones altas y medias de SO₂ se encuentran localizadas en el centro de la ciudad y se mantienen altas en dirección al sur, en el norte se apreció concentraciones bajas.

- **O₃ (2008 – 2012)**

Trazado de la curva en el plano XZ: Se observó en este contaminante que, existe mayor concentración de O₃ con valores medios y altos en el centro y oeste de la ciudad, mostrando valores bajos en el este.

Trazado de la curva en el plano YZ: Se estimó que las concentraciones de este contaminante se encuentran en el centro y sur del plano con valores medios y altos, mientras que en el norte son bajos.

e. Semivariograma

El semivariograma es una herramienta que permite analizar el comportamiento espacial de una variable sobre un área definida, obteniendo como resultado la influencia de los datos a diferentes distancias. (Wikipedia, 2013)

Es decir analiza la autocorrelación espacial de un conjunto de datos, este asume que las cosas más cercanas son más parecidas que las que están más lejos. (Cañada Torrecilla, 2006)

Este análisis tiene mayor relevancia que el resto ya que ayuda a determinar el posible método de interpolación a utilizar.

Como se observa en el Gráfico Nro. 7, en el eje horizontal figuran las distancias (h) y en el eje vertical los valores de la semivarianza de la variable en esos lugares $\gamma(h)$.

Cada punto representa la relación de un par de lugares formados del conjunto de datos analizados, aquellos que se encuentren más a la izquierda del eje x tendrán valores más similares en distancias cortas, mientras que, los puntos que se alejen hacia la derecha se encuentran separados por mayores distancias. Aquellos puntos que se encuentren más altos en el eje Y tendrán valores más diferentes entre ellos.

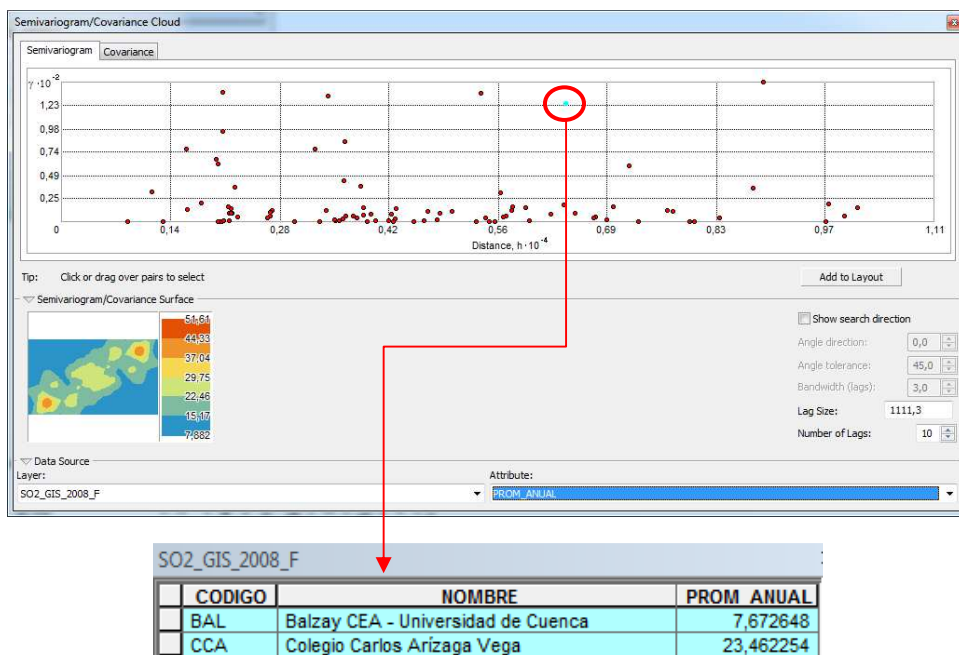


Gráfico Nro. 8 Semivarianza empírica del contaminante SO₂ (2008)

Quando la autocorrelación espacial sólo depende de la distancia entre dos lugares se dice que hay isotropía, pero, si en la autocorrelación hay influencias direccionales, se dice que hay anisotropía, es decir, esta varía con la dirección elegida. (Cañada Torrecilla, 2006)

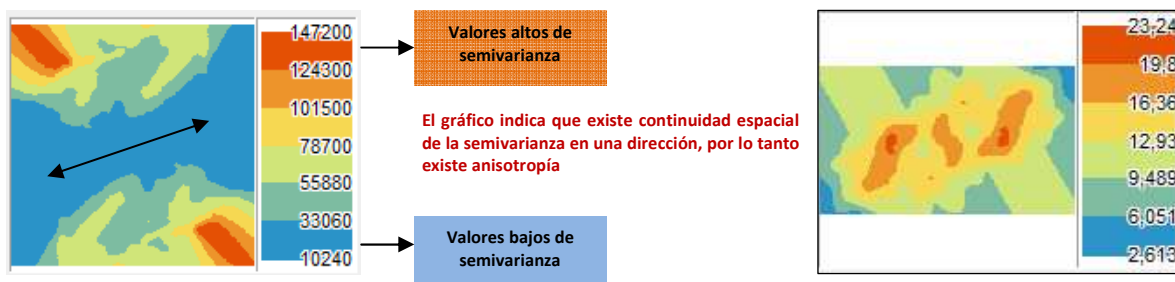


Gráfico Nro. 9 Izquierda: Influencia direccional – Anisotropía. Derecha carencia de influencia direccional.

Análisis de resultados

- **NO₂**, los gráficos de semivariograma no presentan influencia direccional, es decir no tiene anisotropía, por tanto se asume que solo depende de la distancias entre sitios de muestreo, es decir la correlación espacial de los datos depende de la distancia, para lo cual se recomienda emplear métodos de interpolación deterministas y exactos con una geometría tipo circulo para el área del vecindario.
- **SO₂**, igual que con el contaminante anterior, este no presenta anisotropía. Se utilizará a su vez métodos deterministas y exactos para la generación de superficies continuas.
- **O₃**, presenta anisotropía en todos los años excepto en el 2009 en donde no hay influencia direccional. Este contaminante puede ser interpolado tanto con métodos deterministas y exactos como con métodos geoestadísticos.

Un posible interpolador geoestadístico es *Kriging*, este presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. Este método es más adecuado cuando se sabe que

hay una influencia direccional o de la distancia correlacionada espacialmente en los datos. (ESRI, 2012)

En el **Anexo Nro. 4** se encuentran los gráficos de semivariogramas generados durante el estudio.

1.3.1.3. Aplicación de métodos de interpolación deterministas y exactas en contaminantes gaseosos

Para el presente estudio se utilizaron dos técnicas de interpolación deterministas, el Inverso a la Distancia Ponderada (IDW) y las Funciones de Base Radial (FBR), las mismas que son consideradas técnicas locales, al utilizar los puntos muestrales de una vecindad para predecir los valores de los puntos no muestrales. Se diferencian de otras técnicas deterministas al ser exactas lo que implica que el resultado del proceso de interpolación reproduce exactamente los valores en los puntos muestrales y no de forma aproximada como lo hacen los interpoladores polinomio global y local.

El resultado de aplicar técnicas de interpolación es crear superficies continuas a partir de sitios de muestreo. El modelo de superficie creado por método de interpolación determinista y exacto se evalúa por dos magnitudes: la media del error de predicción, que deberá ser próximo a cero; y el error medio cuadrático (RMS) deberá ser el más bajo posible. Si estas dos condiciones se cumplen se podrá indicar como el método de interpolación más adecuado para la representación espacial de superficies continuas a partir de sitios de monitoreo.

a. Técnica Inverso a la Distancia Ponderada (IDW)

La media ponderada por el inverso de la distancia (IDW), es una técnica de interpolación determinista, que emplea los puntos muestrales que están en la vecindad de cada punto no muestral para estimar su valor, este se caracteriza por ser un interpolador exacto, donde los valores máximo y mínimo en la superficie interpolada, pueden solamente ocurrir en los puntos muestrales. Asume que las cosas que están más cerca son más parecidas que las que están más lejos (Cañada Torrecilla, 2006). Dicha técnica aplica la siguiente fórmula:

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda * Z(S_i)$$

Dónde:

- $Z(S_0)$ es el valor que intentamos predecir para el lugar (S_0)
- N es el número de puntos muestrales alrededor del lugar que se va a predecir y que serán tomados en cuenta en la predicción
- λ_i es el peso asignado a cada punto muestral que vamos a usar. Estos pesos decrecen con la distancia
- $Z(S_i)$ es el valor observado del lugar S_i

La fórmula para determinar los pesos es:

$$\lambda_i = d_{i0}^{-p} / \sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}$$

A medida que la distancia se hace más grande, el peso es reducido por un factor p . Es decir, que a medida que se incrementa la distancia entre los puntos observados y el punto calculado, el peso que tendrá un punto muestral sobre el predicho decrecerá exponencialmente.

d_{i0} es la distancia entre el lugar de predicción S_0 y cada lugar muestral, S_i

Los pesos de los lugares utilizados para la predicción serán escalados de tal forma que su suma sea 1, es decir,

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$$

El óptimo valor de p se determina haciendo mínimo el error de predicción o error cuadrático medio, que tiene la siguiente fórmula:

$$EMC = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{Z}(s_i) - z(s_i))^2}{n}}$$

- **Evaluación de parámetros de la técnica IDW en la extensión Analista Geoestadístico**

- 1. Potencia**

Controla la significancia de los puntos circundantes sobre el valor interpolado. Una potencia mayor tiene como resultado una influencia menor de los puntos lejanos. Puede ser cualquier número real mayor que 0 pero los resultados más razonables se obtendrán con valores de 0,5 a 3. El valor predeterminado en el Analista Geoestadístico es 2. (ESRI, 2013b)

Se evaluaron valores de potencia 2 y 3 para el contaminante NO₂ (2008), para el resto de contaminantes por año se utilizó solo potencia 2 por presentar mejores resultados en la media del error de predicción (igual a cero) y valores bajos de RMS (Error Medio Cuadrático).

- 2. Tipo de vecindario**

Los valores que contiene este parámetro son: estándar (standard) y suavizado (smooth).

Se utilizó el tipo de vecindario por defecto el "standard", debido a que este asigna pesos basado en la distancia desde la ubicación de destino.

- 3. Número máximo de vecinos**

Corresponde al número máximo de vecinos (sitios de muestreo) que serán usados para estimar el valor de un lugar desconocido.

Se probó tres valores para este parámetro:

- El máximo número de vecinos asignado por defecto correspondiente a 15,
- Segundo valor evaluado con el número máximo de registros contenidos en las capas temáticas (14 puntos máximo registrados durante el 2008 al 2010 en todos los contaminantes analizados); y,
- El tercero se utilizó como máximo número de vecinos el valor de 5

- 4. Número mínimo de vecinos**

El mínimo número de vecinos que se incluirán en cada sector. Tres valores fueron evaluados.

- El primero que es asignado por defecto y que corresponde a 10,
- El segundo se probó con un valor de 12; y,
- El tercero se ensayó con un valor de 3

Se observó que, a mayor número de puntos en el mínimo de vecinos, el valor de la media del error de predicción disminuye, y por tanto proporciona mejores resultados matemáticos, pero no necesariamente de continuidad espacial.

5. Tipo de Sectores

Corresponde a la geometría del vecindario.

La evaluación realizada empleo los cuatro tipos de sectores con los que cuenta la herramienta, estos son:

TIPO DE SECTOR	DESCRIPCIÓN
Un sector	Círculo simple
Cuatro sectores	Círculo dividido en cuatro sectores
Cuatro sectores desplazados	Círculo dividido en cuatro sectores y con un desplazamiento de 45 grados.
Ocho sectores	Círculo dividido en 8 sectores

Tabla Nro. 5 Descripción de los tipos de geometría del vecindario

De aquí se dedujo, que a mayor número de sectores utilizados, el valor de la media del error de predicción disminuye, lo que implica mejores resultados.

Se utilizó la circunferencia en los análisis realizados, debido a que previamente se identificó que no existe influencia direccional en NO₂ y SO₂ durante el periodo estudiado, O₃ sí cuenta con correlación espacial y direccional pero igual se probó con este tipo de elemento geométrico. El semieje mayor y menor de la circunferencia empleada en la geometría del vecindario fue igual a 3224,406 m.

- **Criterios para la elección de los parámetros que intervienen en el IDW y diagnóstico mediante la validación cruzada**

La aplicación de los parámetros antes descritos en su conjunto, generan una superficie continua resultado de la interpolación IDW, la forma de evaluar la bondad de este modelo (superficie continua) es a través de los siguientes criterios:

- El valor óptimo de la media de los errores de predicción (MPE) debe tender a cero, y
- El valor de RMS (Error Medio Cuadrático) debe ser lo más bajo posible. (Melo Martínez, 2012), (Cañada Torrecilla, 2006)

Validación cruzada

La validación cruzada es una técnica que permite evaluar la capacidad predictiva del modelo seleccionado. Esta técnica se justifica debido a que el IDW es una técnica exacta, es decir los valores de los pronósticos coinciden con los valores observados para los puntos muestreados y dan una idea de que tan buenos son los pronósticos.(Melo Martínez, 2012)

Para todos los puntos, la validación cruzada omite secuencialmente un punto y predice su valor usando el resto de los valores, después compara el valor observado con el estimado. (Cañada Torrecilla, 2006)

En el **Anexo Nro. 5** se indican las pruebas realizadas con los valores de parámetros del IDW para los contaminantes gaseosos estudiados y sus correspondientes resultados con la media del error de predicción y RMS.

En la **Tabla Nro. 6** en cada uno de sus apartados, se indican los parámetros de la técnica IDW por contaminantes gaseosos con los mejores resultados obtenidos según la media del error de predicción y bajo RMS.

A. TABLA DE RESULTADOS CON LAS MEDIAS DEL ERROR DE PREDICCIÓN Y EL RMS DE LOS MODELOS GENERADOS CON EL MÉTODO IDW PARA EL CONTAMINANTE NO₂ EN EL PERIODO 2008 – 2012

CONTAMINANTE	AÑO	POTENCIA	TIPO	NRO. MAX VECINOS	NRO. MIN VECINOS	SECTORES	PROMEDIO	RMS
NO ₂	2008	2	Standard	14	12	8 sector	1,918554	6,563916
	2009	2	Standard	14	12	8 sector	1,248970	5,255925
	2010	2	Standard	14	12	8 sector	1,176650	5,095553
	2011	2	Standard	15	12	8 sector	1,080161	4,178197
	2012	2	Standard	15	12	8 sector	1,047112	4,414563

B. TABLA DE RESULTADOS CON LAS MEDIAS DEL ERROR DE PREDICCIÓN Y EL RMS DE LOS MODELOS GENERADOS CON EL MÉTODO IDW PARA EL CONTAMINANTE SO₂ EN EL PERIODO 2008 – 2012

CONTAMINANTE	AÑO	POTENCIA	TIPO	NRO. MAX VECINOS	NRO. MIN VECINOS	SECTORES	PROMEDIO	RMS	
SO ₂	* 2008	2	Standard	14	12	8 sector	0,748968	5,291001	
	* 2009	2	Standard	14	12	8 sector	0,505365	9,162402	
	2010	2	Standard	14	12	8 sector	0,201761	3,318691	
	2011	2	Standard	15	12	8 sector	0,059339	1,966248	*MRC
	2012	2	Standard	15	12	8 sector	-0,184294	1,642698	*MRC

C. TABLA DE RESULTADOS CON LAS MEDIAS DEL ERROR DE PREDICCIÓN Y EL RMS DE LOS MODELOS GENERADOS CON EL MÉTODO IDW PARA EL CONTAMINANTE O₃ EN EL PERIODO 2008 – 2012

CONTAMINANTE	AÑO	POTENCIA	TIPO	NRO. MAX VECINOS	NRO. MIN VECINOS	SECTORES	PROMEDIO	RMS	
O ₃	2008	2	Standard	14	12	8 sector	0,215277	2,837506	*MRC
	2009	2	Standard	14	12	8 sector	0,030704	2,930000	*MRC
	2010	2	Standard	14	12	4 sector 45 grados	0,097573	1,831158	
	2011	2	Standard	15	12	4 Sector	-0,000719	1,830806	
	2012	2	Standard	15	10	4 sector	-0,043833	2,130260	

Tabla Nro. 6 Resultados de los modelos generados con la técnica IDW

Análisis de resultados

- Los resultados de NO₂ en la media de los errores de predicción se encuentran alejados del valor óptimo que es igual a cero. Lo que implica que en este contaminante se aplicará la otra técnica del método de interpolación determinista y exacta Funciones de Base Radial, se propone el mismo ya que este es sensible a valores extremos. Se comprobó durante el análisis exploratorio que NO₂ no presenta valores extremos entre sus datos.
- SO₂ obtuvo buenos resultados en todos los años al tener los valores de las medias de error de predicción próximos a 0, lo que indica que esta técnica fue adecuada para la representación de superficies continuas de este contaminante.

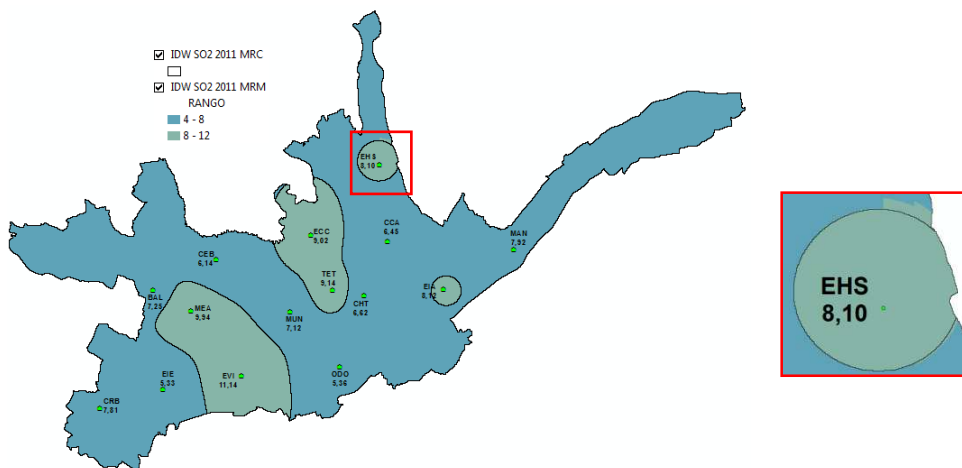
Las interpolaciones de los años *2008 y *2009 se realizaron en base a valores transformados a logaritmo natural (ln) aplicada sobre la media anual calculada, obteniendo un modelo con dichos valores, posteriormente con el uso de la herramienta **RASTER CALCULATOR** se procedió a realizar el proceso inverso para recuperar los valores originales pero corregidos el sesgo positivo que se presentó inicialmente, la expresión utilizada corresponde a $e^{(idw_{ln})}$.

Para los años 2011 y 2012 se optó por usar una configuración alternativa a la que se presentó como mejor resultado matemático (MRM), esta alternativa identificada como

mejor resultado continuo (MRC), indica una mejor continuidad espacial aunque no de manera significativa. El MRC fortalece la deducción de que, a mayor número de vecinos ingresados en la sección mínimo número de vecinos, y al igual que, a mayor número de sectores, se obtiene mejores resultados de continuidad espacial. A continuación se presenta los mejores resultados matemáticos (MRM) y los mejores resultados continuos (MRC) obtenidos para estos años.

SO₂ (2011)

- MRM Nro. Max 15, Nro. Mín 10, 4 sectores (MPE = 0.057 RMS = 1.968)
- MRC Nro. Max 15, Nro. Mín 12, 8 sectores (MPE = 0.059 RMS = 1.966)



SO₂ (2012)

- MRM Nro. Max 15, Nro. Mín 10, 1 sector (MPE = -0.166 RMS = 1.639)
- MRC Nro. Max 15, Nro. Mín 12, 8 sectores (MPE = -0.184 RMS = 1.642)

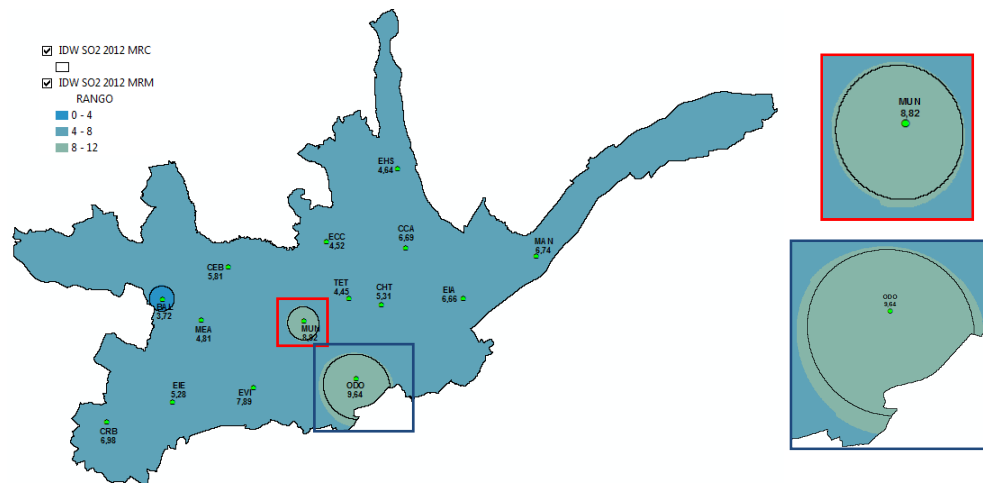
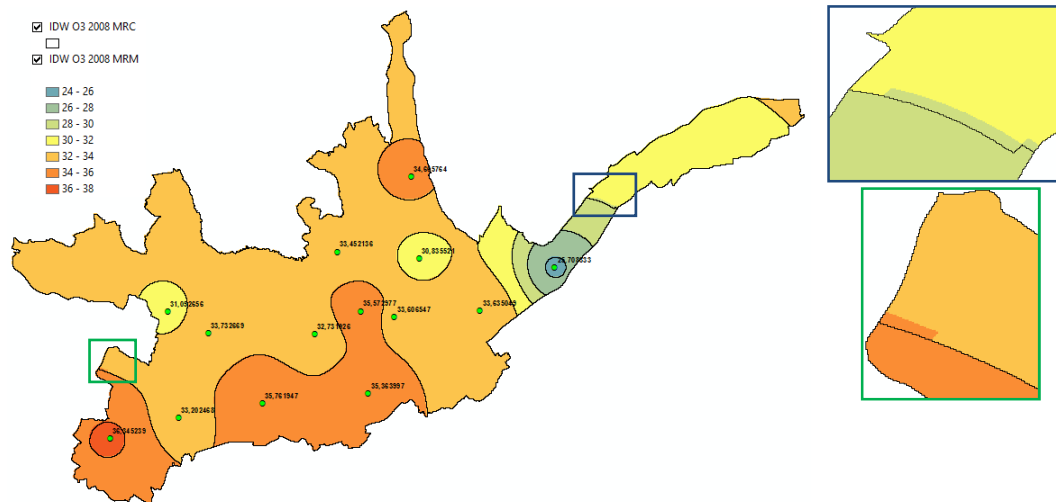


Gráfico Nro. 10 Comparación de los modelos con los MRM contra los MRC de los años 2011 y 2012 de SO₂

- Igual que en el contaminante anterior, O₃ obtuvo buenos resultados en las medias de error y RMS; sin embargo para los años 2008 y 2009 se observó que los mejores resultados matemáticos (MRM) obtenidos no eran diferentes significativamente de los resultados obtenidos con el mejor resultado de continuidad espacial (MRC), por lo que se empleó la configuración del MRC (Nro. Máx. 14, Nro. Mín. 12 y 8 sectores).

O₃ (2008)

- MRM Nro. Max 14, Nro. Mín 12, 4 sectores a 45 grados (MPE = 0.212 RMS = 2.830)
- MRC Nro. Max 14, Nro. Mín 12, 8 sectores (MPE = 0.215 RMS = 2.838)



O₃ (2009)

- MRM Nro. Max 14, Nro. Mín 12, 1 sector (MPE = 0.019 RMS = 2.936)
- MRC Nro. Max 14, Nro. Mín 12, 8 sectores (MPE = 0.031 RMS = 2.930)

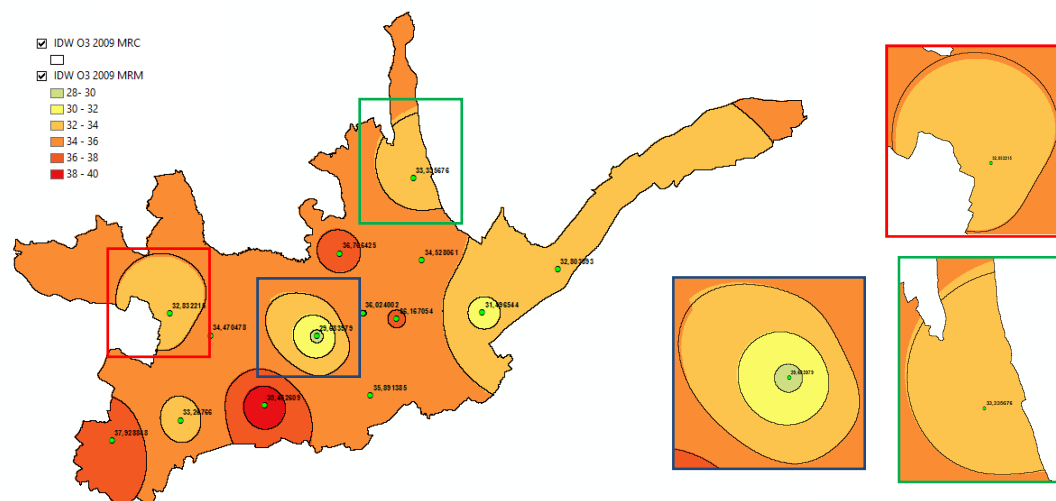


Gráfico Nro. 11 Comparación de los modelos con los MRM contra los MRC de los años 2008 y 2009 de O₃

b. Técnica Funciones de Base Radial para el contaminante NO₂

Es una técnica local que emplea los puntos muestrales que están en la vecindad de cada punto no muestral para realizar la predicción, se clasifica a su vez como una técnica exacta ya que reproduce el valor exacto en los datos observados.

ArcGIS incluye cinco tipos de funciones de base radial diferentes:

1. Completely Regularized Spline
2. Spline with Tension
3. Multiquadric
4. Inverse Multiquadric
5. Thin Plate Spline

La diferencia entre utilizar una u otra función radial no es muy grande, se puede probar varias y elegir la que presente un menor error de predicción. Cada función tiene un parámetro que controla el suavizado de la superficie.

Una diferencia entre esta técnica de Funciones de Base Radial (FBR) con la técnica del Inverso a la Distancia Ponderada (IDW), es que, el IDW nunca predice valores por encima de un máximo o por debajo de un mínimo valor muestral, mientras que FBR sí.

Las funciones de base radial calculan superficies suavizadas, dan mejores resultados cuando la superficie varía moderadamente, son muy sensibles localmente a los valores extremos.

La predicción se calculará mediante la siguiente expresión:

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^n (\omega_i * \phi(\|s_i - s_0\|)) + \omega_{n+1}$$

Dónde:

n: número de datos

$\phi(r)$ es una función de base radial,

$r = \|s_i - s_0\|$ es la distancia euclidiana entre el lugar que predécimos S_0 y cada lugar muestral S_i , y $\{\omega_i: i=1,2,\dots,n+1\}$ son los pesos que van a ser estimados.

Los pesos $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ van a ser estimados resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{pmatrix} \Phi & 1 \\ 1' & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w \\ \omega_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z \\ 0 \end{pmatrix}$$

A w s

$$A * w = s$$

$$w = A^{-1} * s$$

Donde Φ es una matriz que tiene como elementos ϕ_{ij} a $\phi(\|S_i - S_j\|)^2$, 1 es un vector columna de unos, 1' es un vector fila de unos (traspuesto del vector 1 columna) y z es un vector columna que contiene los datos $Z(S_i)$. Para mayor detalles referirse al documento de (Cañada Torrecilla, 2006).

- Evaluación de parámetros de la técnica FBR en la extensión Analista Geoestadístico y elección de mejores resultados**

Contaminante	Año	Método	Función Kernel	Parametro Kernel	Max neighbors	Min neighbors	Sector Type	Promedio	RMS	
NO ₂	2008	FBR	Inverse Multiquadric	394,3420851	14	12	4s45g	0,372459	5,937459	
	2009	FBR	Spline with Tension	0,015360749	14	12	4s45g	0,345161	4,720732	*MRC
	2010	FBR	Spline with Tension	0,015360749	14	12	4	0,310998	4,601654	*MRC
	2011	FBR	Spline with Tension	0,015360749	15	12	4s45g	0,281724	3,704242	*MRC
	2012	FBR	Completely Regularized Spline	0,01066452	15	12	4s45g	0,341925	4,014740	*MRC

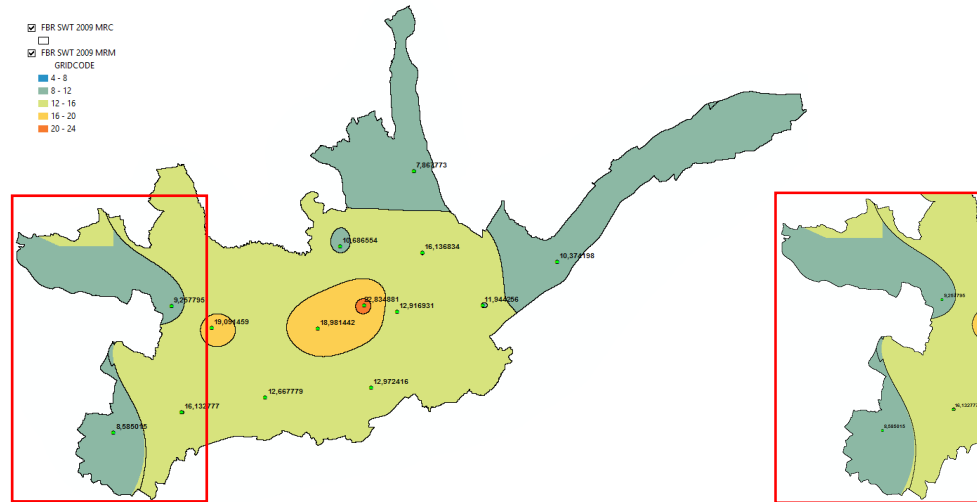
Tabla Nro. 7 Resultados obtenidos para la NO₂ aplicando Funciones de Base Radial

La tabla contiene las funciones de base radial que mejores resultados presentaron al evaluar la media del error de predicción y los valores de error medio cuadrático, además de continuidad espacial.

En el **Anexo Nro. 6**, se encuentran las pruebas realizadas sobre parámetros del interpolador Funciones de Base Radial del contaminante NO₂ en el periodo 2008 al 2012

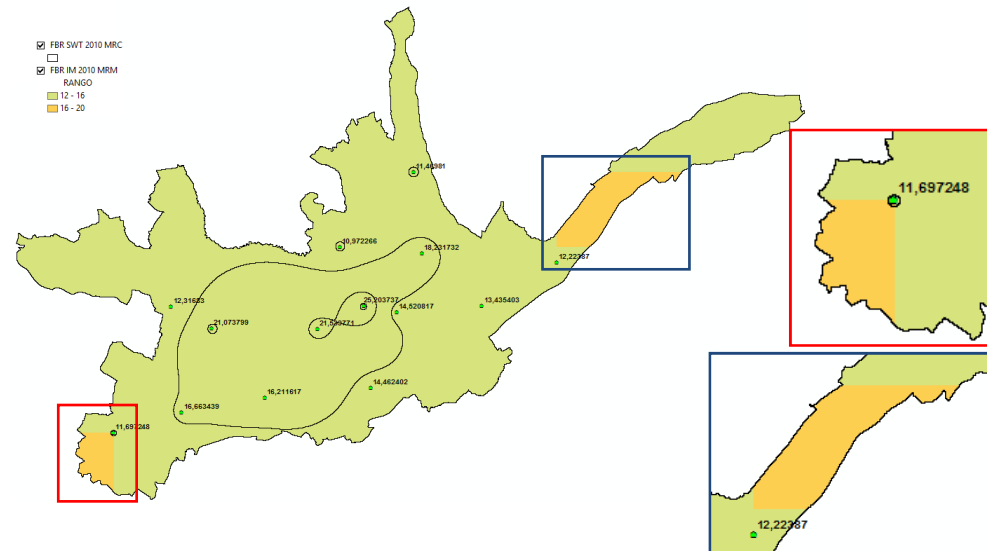
NO2 (2009) – FBR

- MRM Spline with Tension, Nro. Max 14, Nro. Mín 12, 4 sectores (MPE = 0.333 RMS = 4.721)
- MRC Spline with Tension, Nro. Max 14, Nro. Mín 12, 4 sectores a 45 grados (MPE = 0.345 RMS = 4.721)



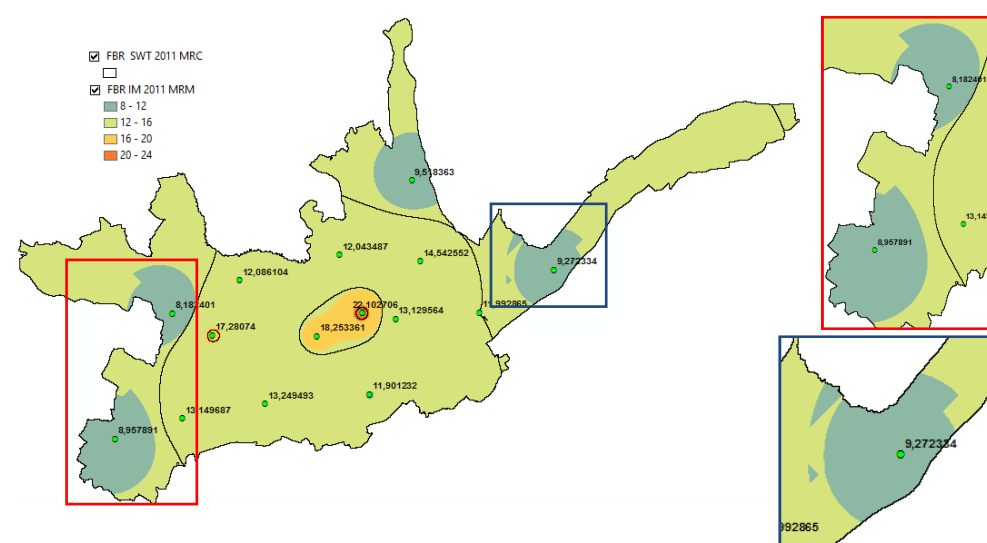
NO2 (2010) – FBR

- MRM Inverse Multiquadric, Nro. Max 14, Nro. Mín 12, 4 sectores (MPE = 0.023 RMS = 4.561)
- MRC Spline with Tension, Nro. Max 14, Nro. Mín 12, 4 sectores (MPE = 0.311 RMS = 4.602)



NO2 (2011) – FBR

- MRM Inverse Multiquadric, Nro. Max 15, Nro. Mín 12, 4 sectores a 45 grados (MPE = 0.145 RMS = 3.782)
- MRC Spline with Tension, Nro. Max 14, Nro. Mín 12, 4 sectores a 45 grados (MPE = 0.281 RMS = 3.704)



NO₂ (2012) – FBR

- MRM Inverse Multiquadric, Nro. Max 15, Nro. Mín 12, 4 sectores a 45 grados (MPE = 0.019 RMS = 4.015)
- MRC Completely Regularized Spline, Nro. Max 15, Nro. Mín 12, 4 sectores a 45 grados (MPE = 0.342 RMS = 4.015)

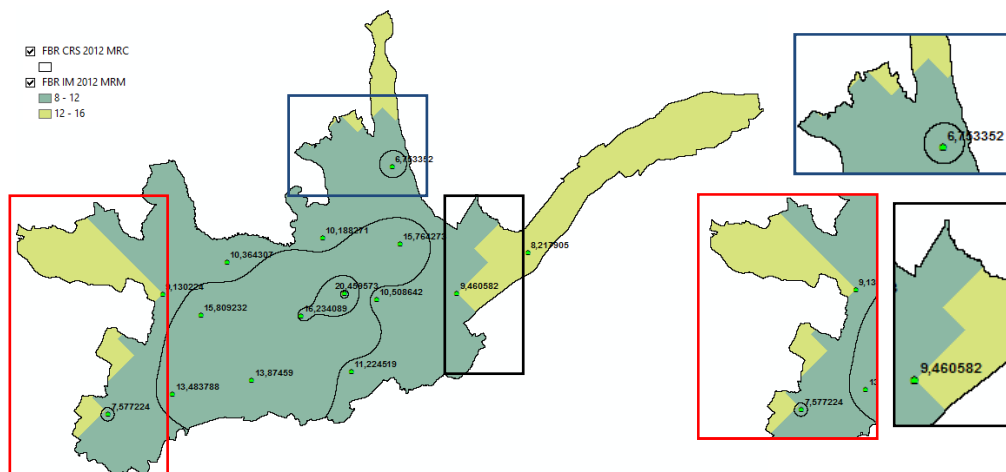


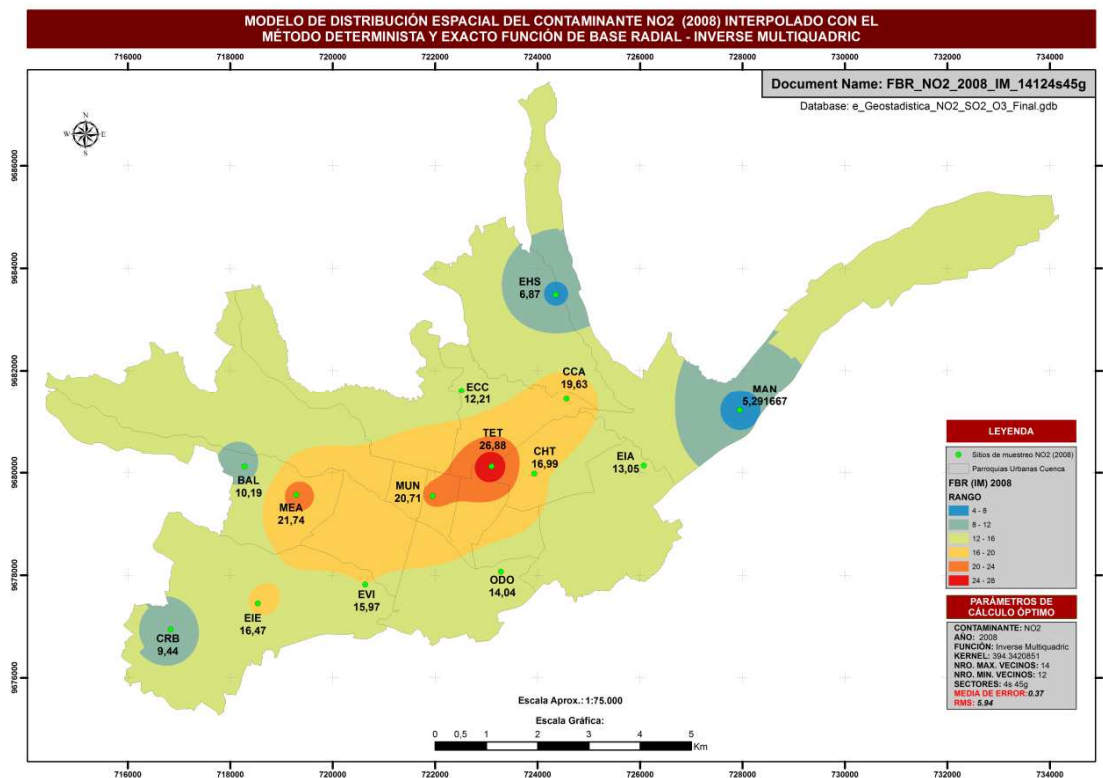
Gráfico Nro. 12 Comparación de los modelos con los MRM contra los MRC de los años 2008 al 2012 de NO₂ (FBR)

2. RESULTADOS

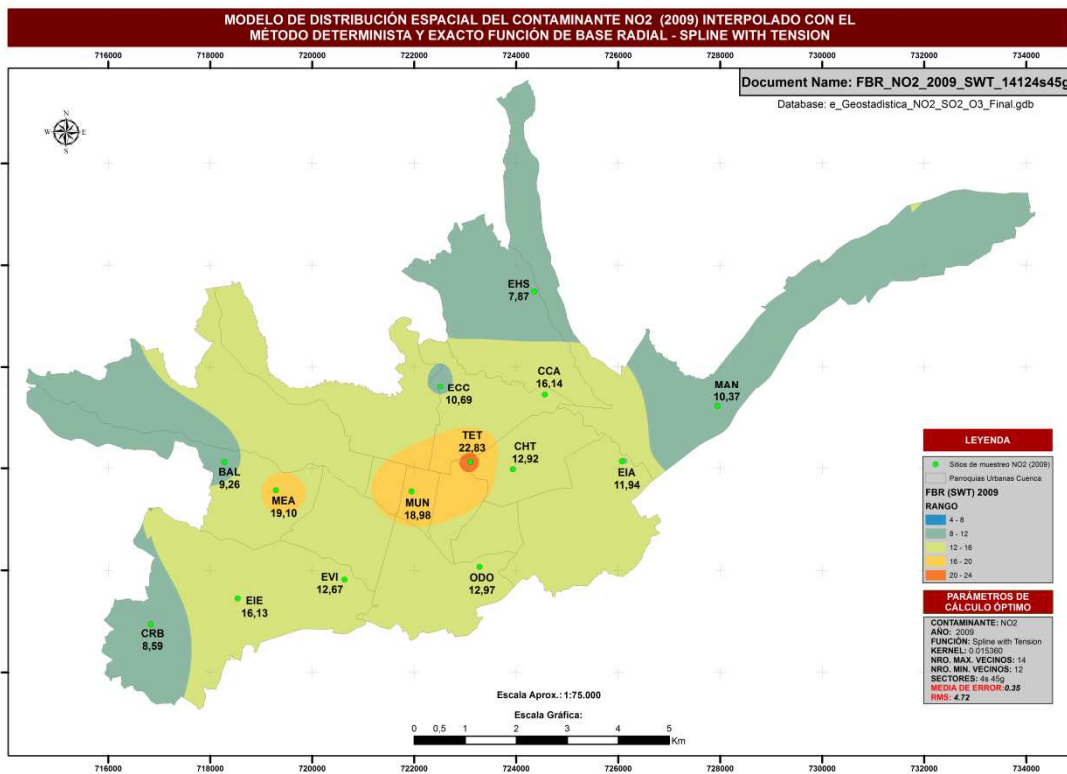
2.1. Generación de mapas de contaminantes gaseosos aplicando parámetros óptimos de las Técnicas IDW y Funciones de Base Radial

Los resultados obtenidos en la determinación de los parámetros óptimos identificados de las técnicas de interpolación deterministas y exactas, Inverso a la Distancia Ponderada y Funciones de Base Radial se emplearon en la representación de la distribución espacial de los contaminantes NO₂, SO₂ y O₃ en el periodo 2008 – 2012 dentro del casco urbano de la Ciudad de Cuenca.

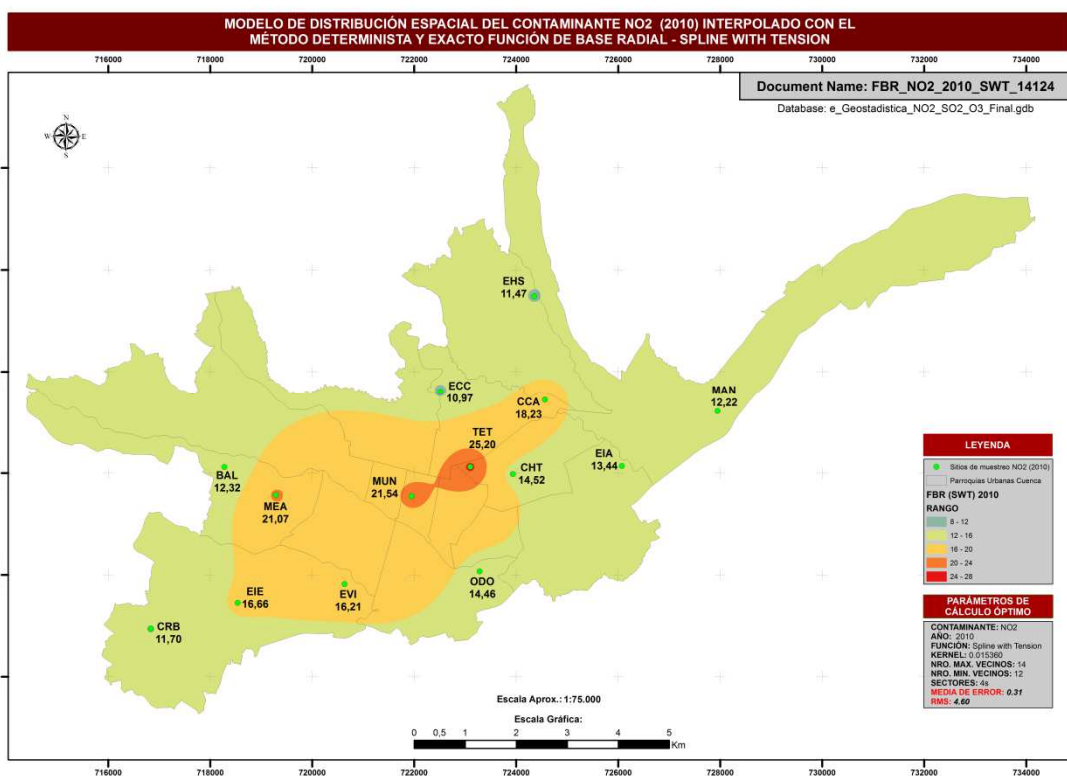
NO₂



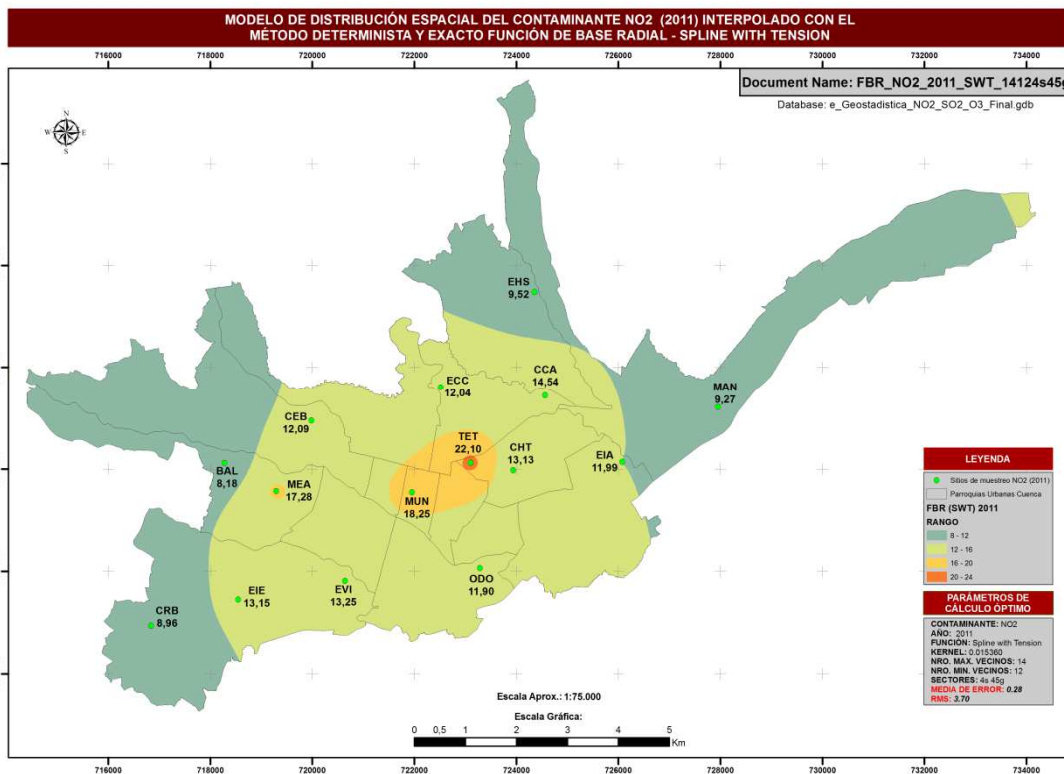
Mapa Nro. 3 Distribución espacial del contaminante NO₂ en el año 2008 interpolado con método determinista y exacto, técnica Funciones de Base Radial – Inverse Multiquadric



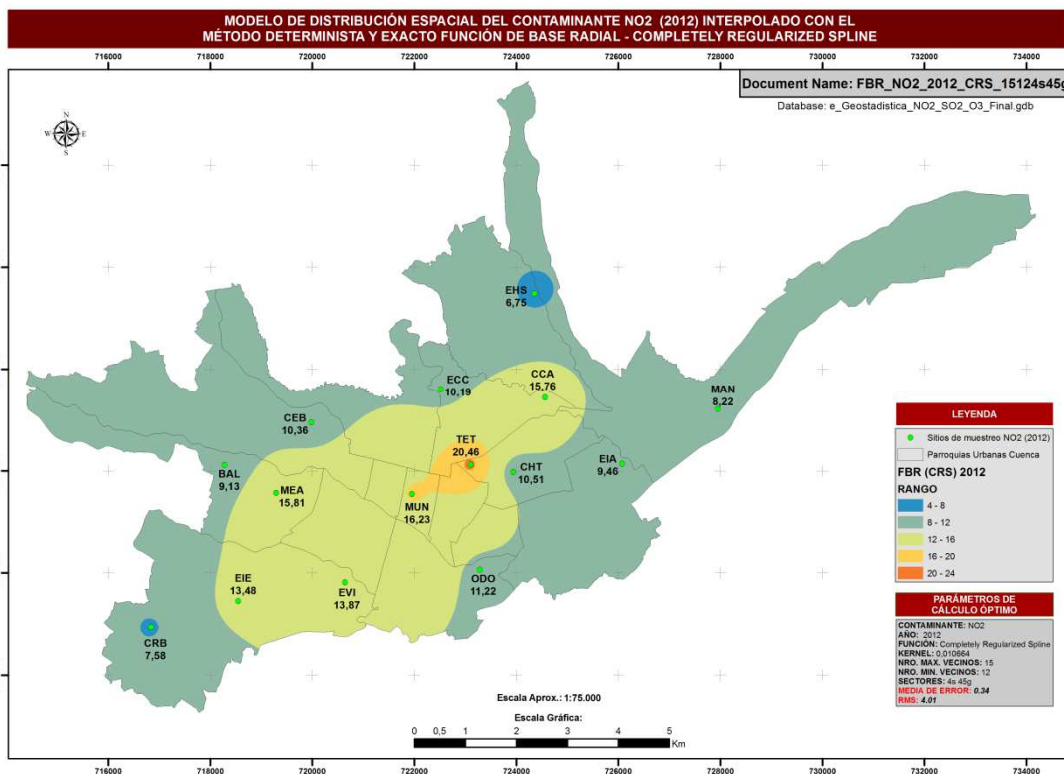
Mapa Nro. 4 Distribución espacial del contaminante NO₂ en el año 2009 interpolado con método determinista y exacto, técnica Funciones de Base Radial – Spline with Tension



Mapa Nro. 5 Distribución espacial del contaminante NO₂ en el año 2010 interpolado con método determinista y exacto, técnica Funciones de Base Radial – Spline with Tension

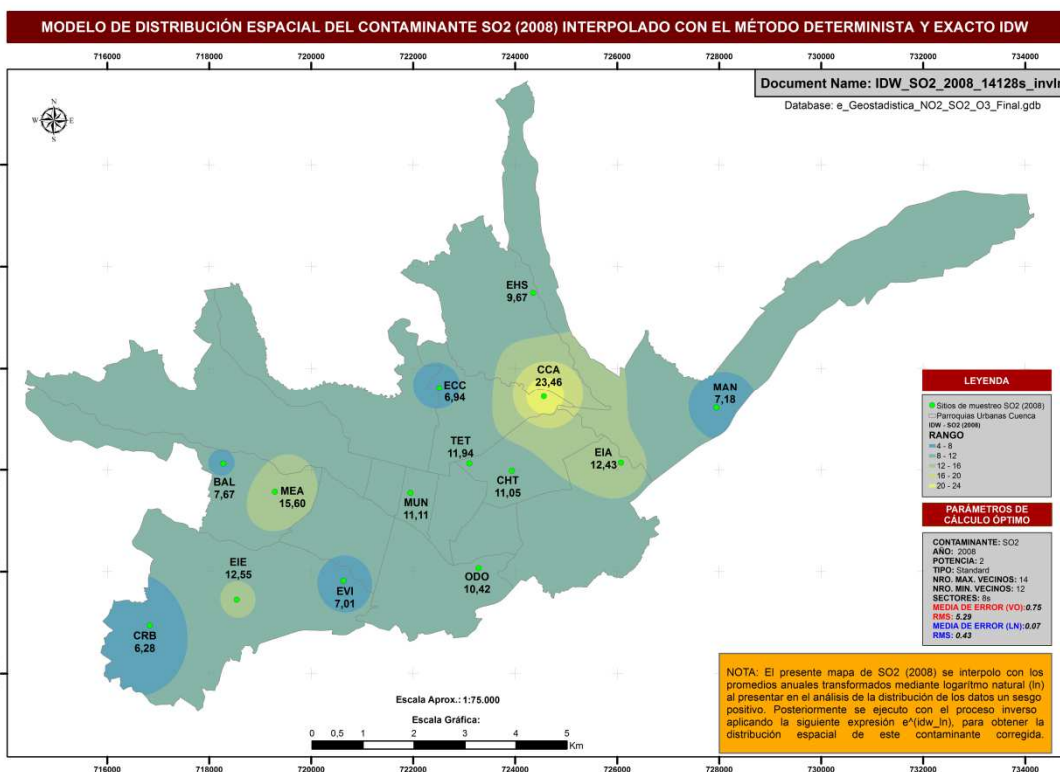


Mapa Nro. 6 Distribución espacial del contaminante NO₂ en el año 2011 interpolado con método determinista y exacto, técnica Funciones de Base Radial – Spline with Tension

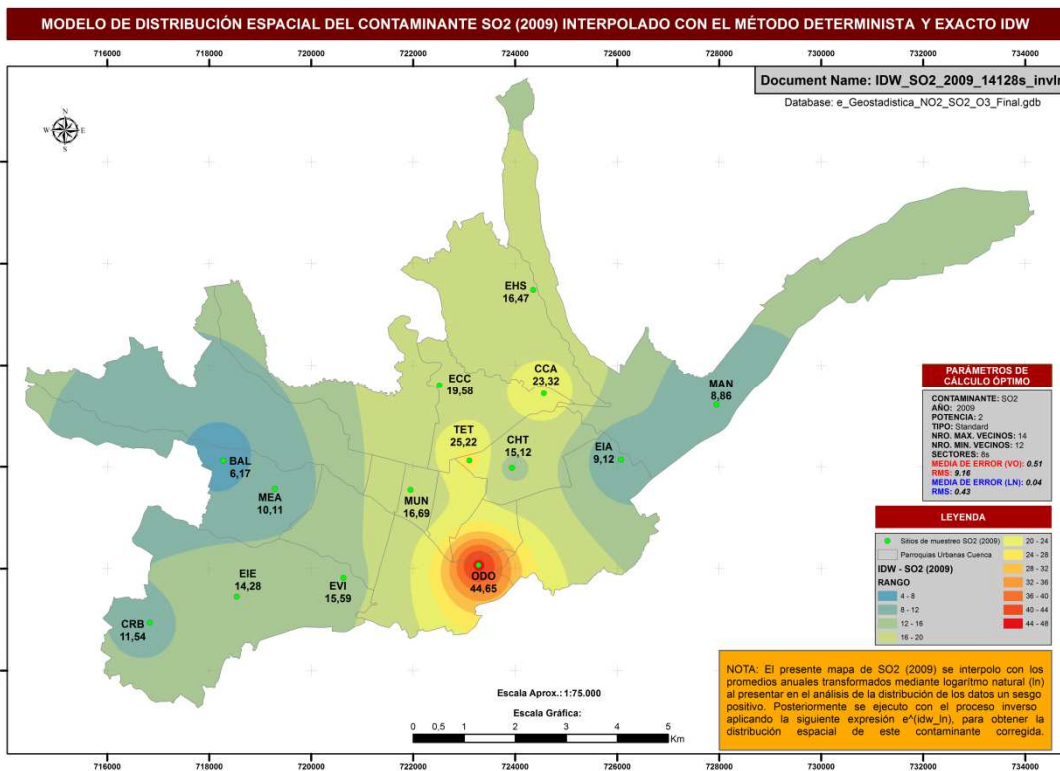


Mapa Nro. 7 Distribución espacial del contaminante NO₂ en el año 2012 interpolado con método determinista y exacto, técnica Funciones de Base Radial – Completely Regularized Spline

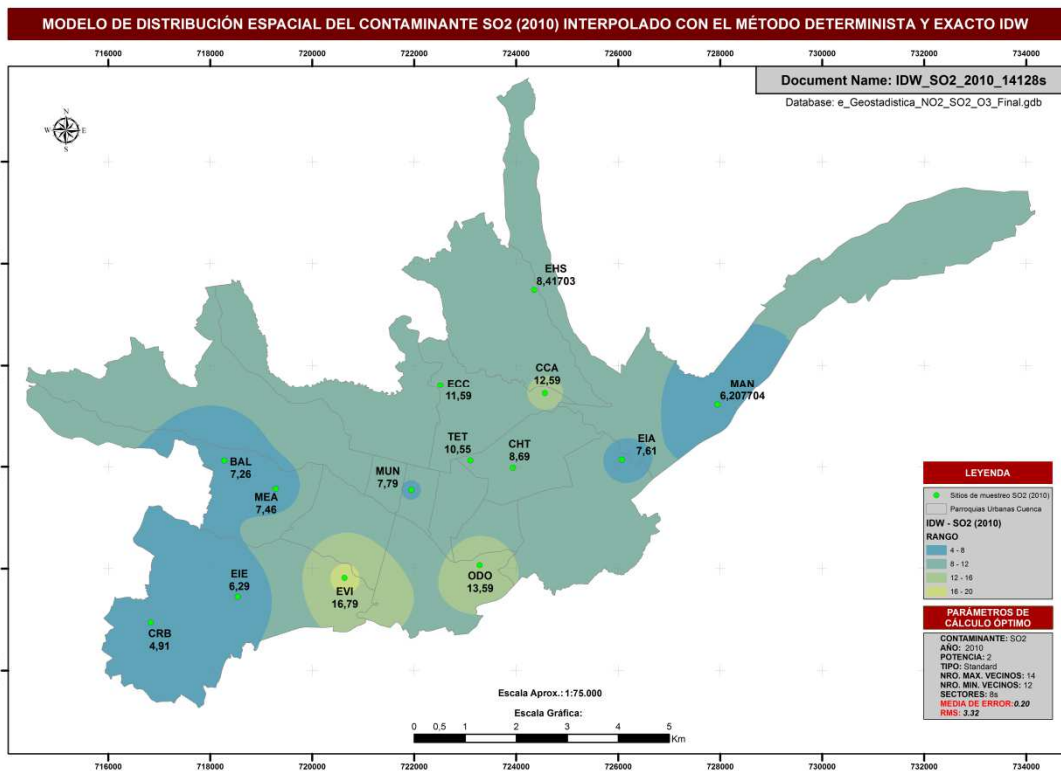
SO₂



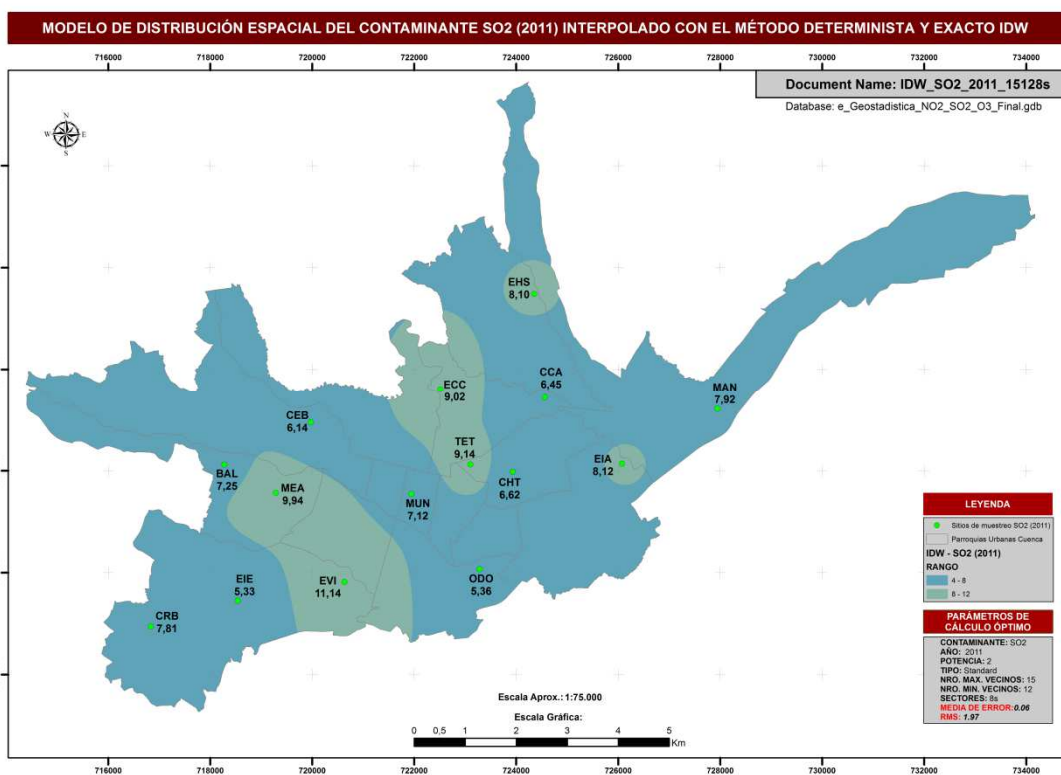
Mapa Nro. 8 Distribución espacial del contaminante SO₂ en el año 2008 interpolado con método determinista y exacto, técnica Inverso a la Distancia Ponderada



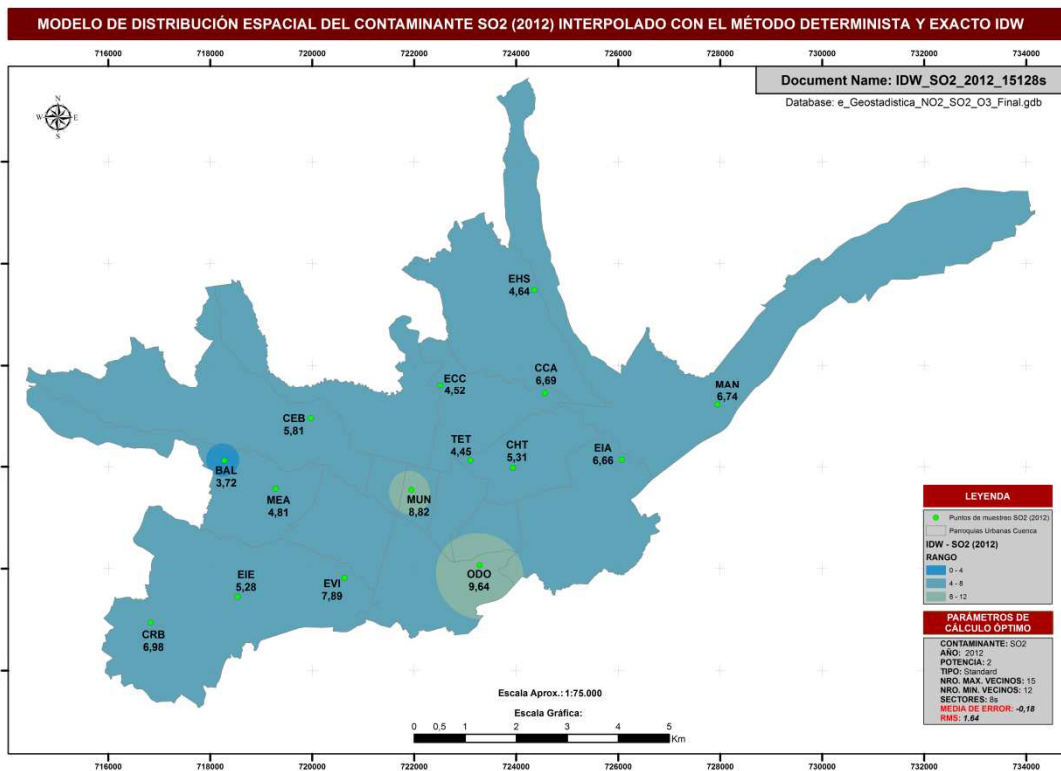
Mapa Nro. 9 Distribución espacial del contaminante SO₂ en el año 2009 interpolado con método determinista y exacto, técnica Inverso a la Distancia Ponderada



Mapa Nro. 10 Distribución espacial del contaminante SO₂ en el año 2010 interpolado con método determinista y exacto, técnica Inverso a la Distancia Ponderada

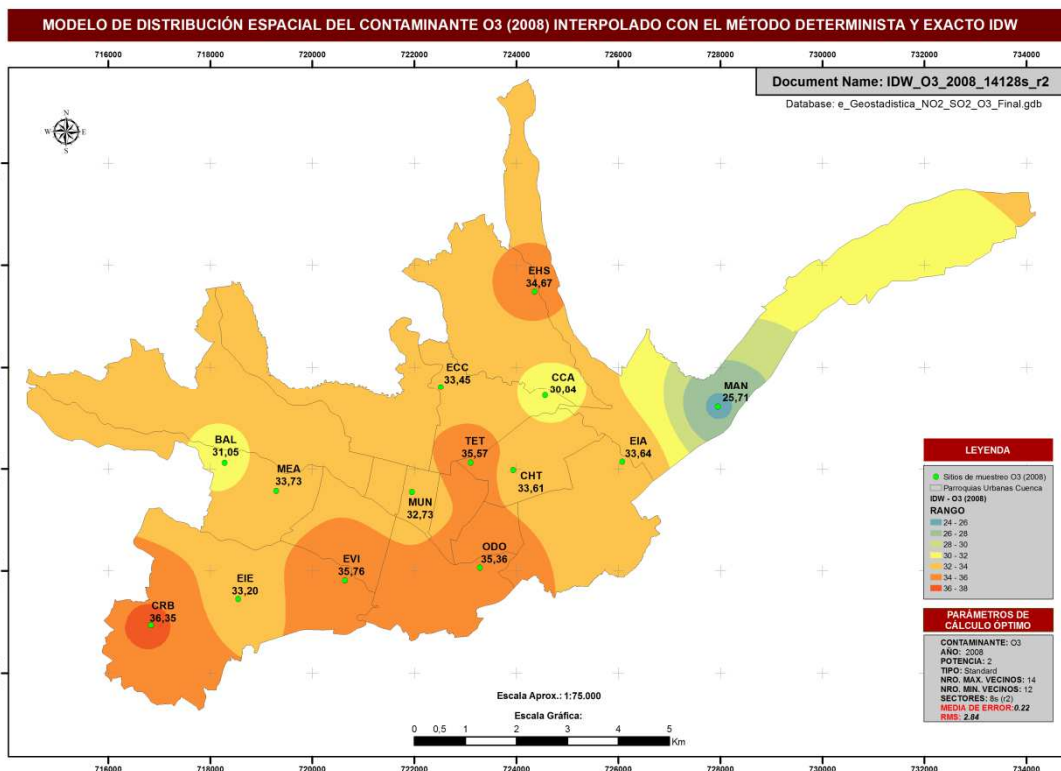


Mapa Nro. 11 Distribución espacial del contaminante SO₂ en el año 2011 interpolado con método determinista y exacto, técnica Inverso a la Distancia Ponderada

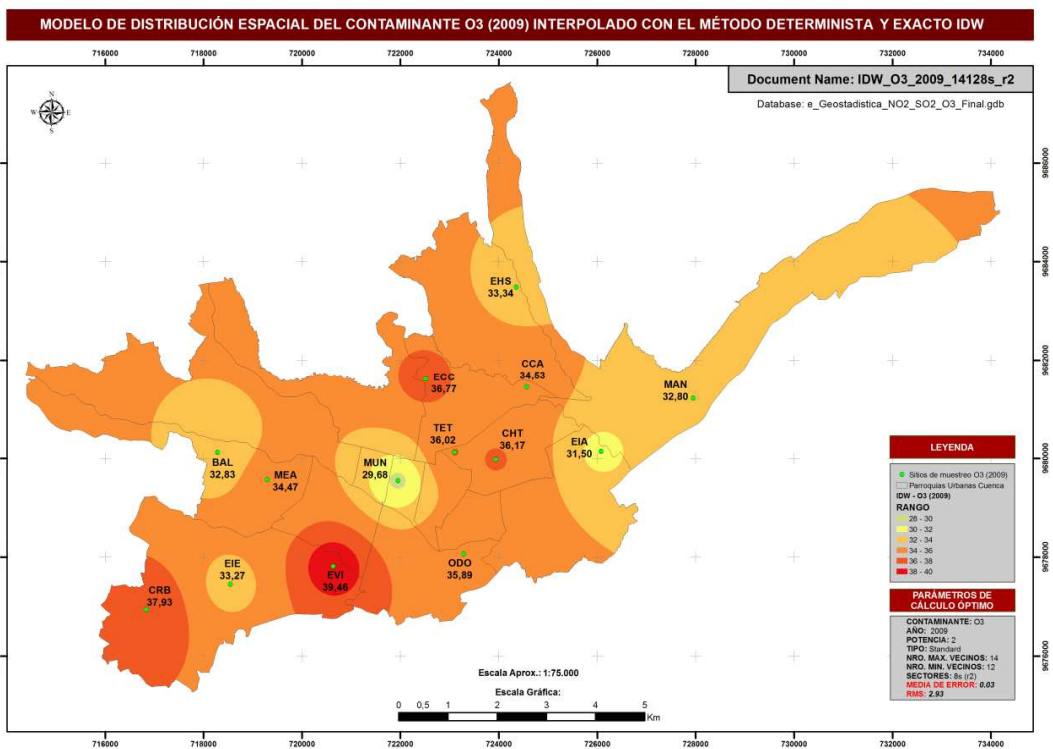


Mapa Nro. 12 Distribución espacial del contaminante SO₂ en el año 2012 interpolado con método determinista y exacto, técnica Inverso a la Distancia Ponderada

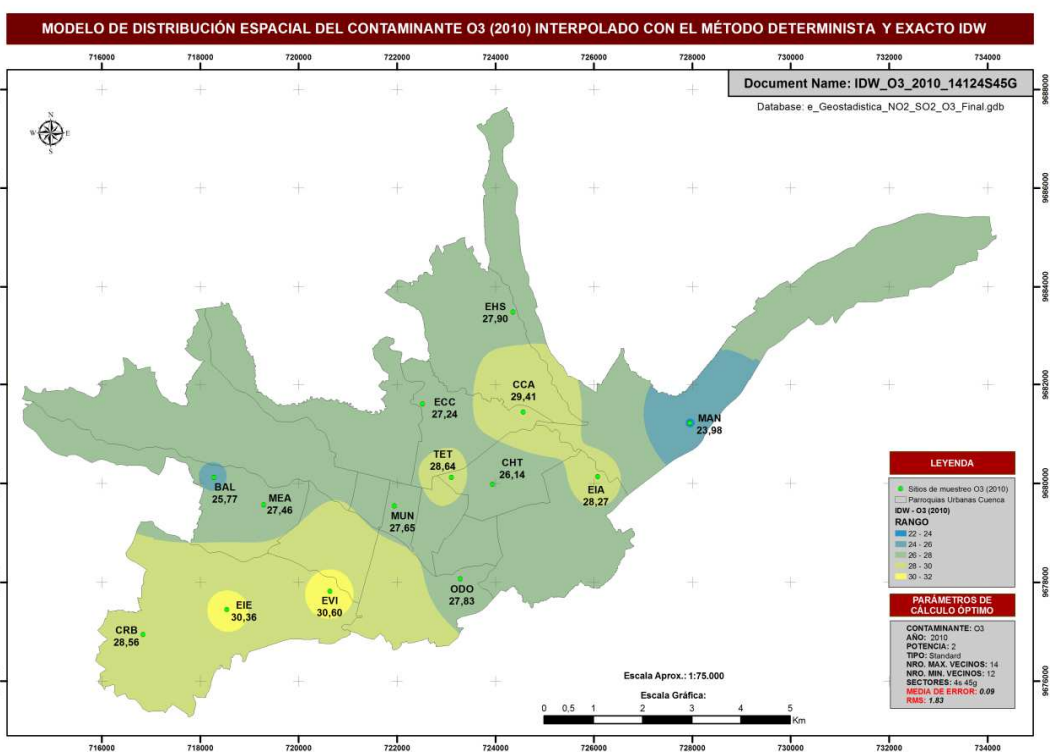
O₃



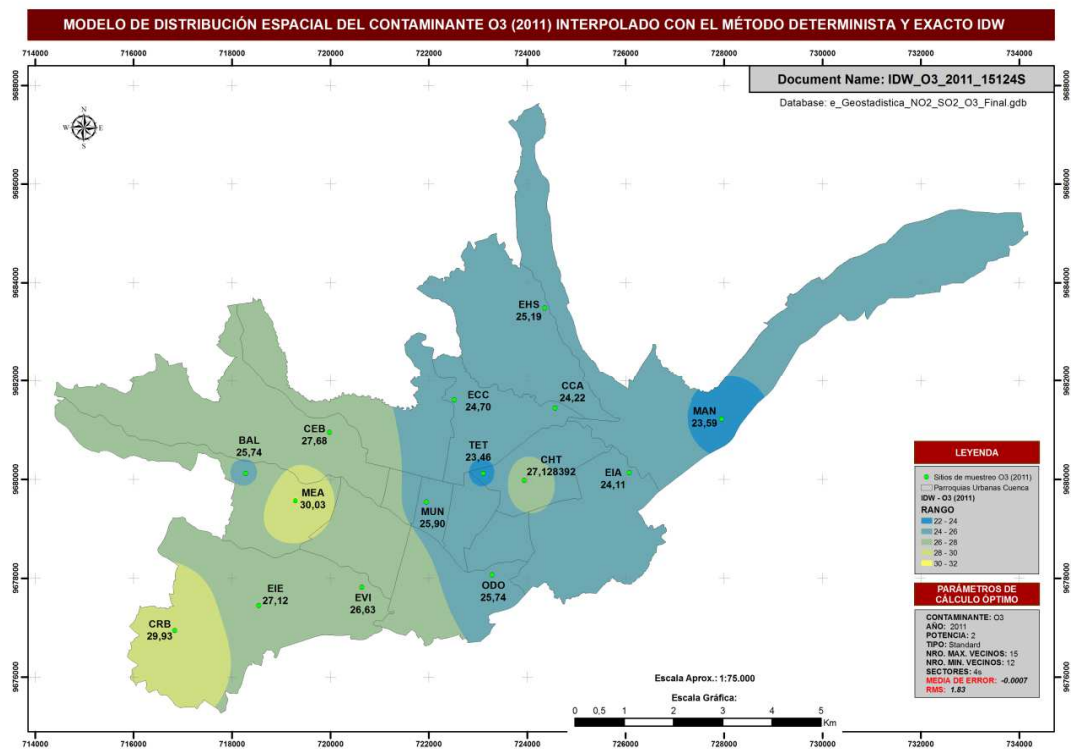
Mapa Nro. 13 Distribución espacial del contaminante O₃ en el año 2008 interpolado con método determinista y exacto, técnica Inverso a la Distancia Ponderada



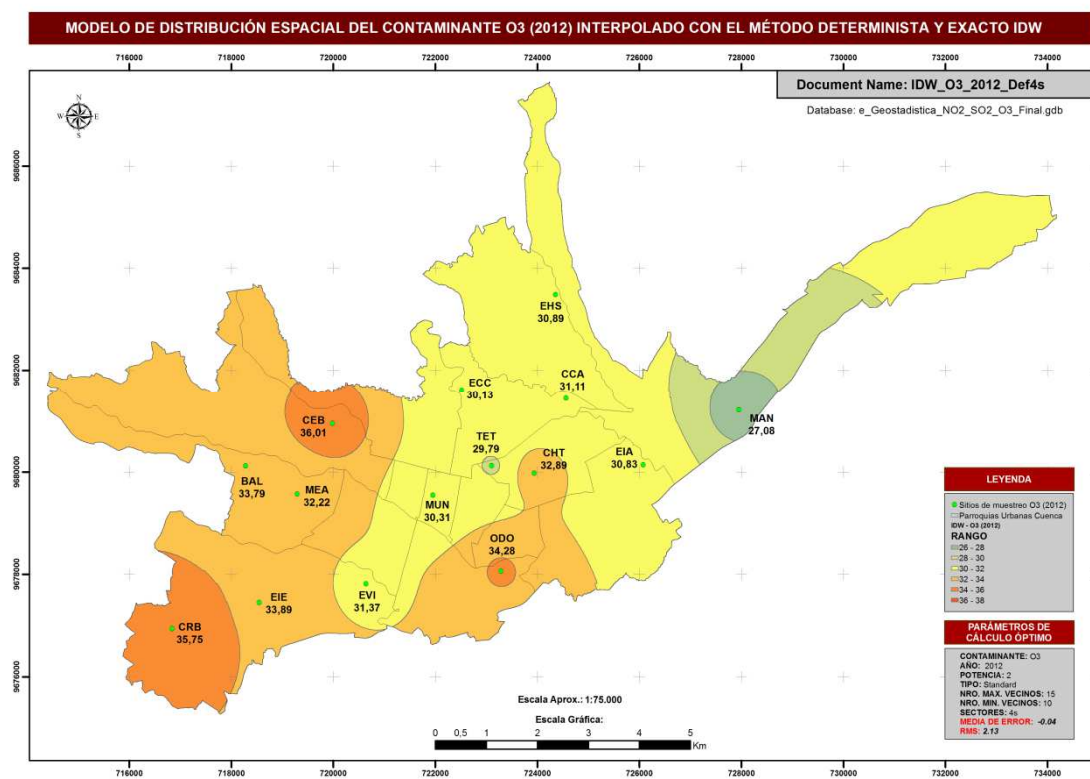
Mapa Nro. 14 Distribución espacial del contaminante O₃ en el año 2009 interpolado con método determinista y exacto, técnica Inverso a la Distancia Ponderada



Mapa Nro. 15 Distribución espacial del contaminante O₃ en el año 2010 interpolado con método determinista y exacto, técnica Inverso a la Distancia Ponderada



Mapa Nro. 16 Distribución espacial del contaminante O₃ en el año 2011 interpolado con método determinista y exacto, técnica Inverso a la Distancia Ponderada



Mapa Nro. 17 Distribución espacial del contaminante O₃ en el año 2012 interpolado con método determinista y exacto, técnica Inverso a la Distancia Ponderada

3. CONCLUSIONES

- Los valores registrados de contaminantes gaseosos NO₂, SO₂, O₃ en las 15 estaciones analizadas no superan los valores promedio señalados por la OMS.
- Del análisis exploratorio de datos sobre los contaminantes atmosféricos, se identificó la necesidad de normalizar la distribución de datos en tres casos, dióxido de azufre en 2008 y 2009, y ozono troposférico en 2008; para el resto de contaminantes, no fue necesario realizar transformaciones.
- Análisis estructural. A partir de la construcción de semivariogramas por contaminante atmosférico, se identificó que los datos registrados en las estaciones presentan una correlación espacial por distancia, lo que llevó a emplear métodos de interpolación deterministas y exactos. Sin embargo para el O₃ a más de presentar autocorrelación espacial presenta influencia dirección (anisotropía), lo que plantea la posibilidad en un futuro de evaluar a más de interpolaciones exactas, técnicas de interpolación geoestadísticas.
- De los contaminantes gaseosos analizados, el mejor método de interpolación para NO₂ correspondió a la técnica Funciones de Base Radial, mientras que para SO₂ y O₃ la técnica de interpolación determinista y exacta fue Inverso a la Distancia Ponderada.
- Predicción de superficies y valoración de los resultados. Los modelos de distribución espacial obtenidos con los método de interpolación deterministas y exactos IDW y función de base radial cumplieron con los dos criterios de evaluación: que la media del error de predicción tiendan a cero y que el error medio cuadrático sea el más bajo.

4. RECOMENDACIÓN

- Se sugiere dar a conocer a la EMOV EP los resultados del presente estudio con la finalidad de que se analicen y evalúen los procedimientos identificados en la generación de modelos de distribución espacial de contaminantes gaseosos.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

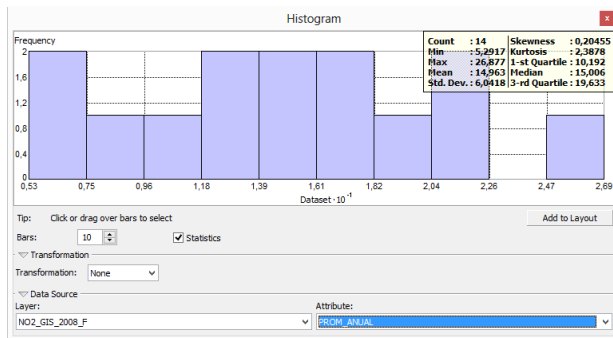
- Balarezo Sarmiento, E. A. (2009). *Modelación de la geoinformación de contaminación del aire en la ciudad de Cuenca*. Universidad del Azuay.
- Cañada Torrecilla, M. R. (2006). Técnica de Interpolación Espacial Determinista y Exacta: Media ponderada por el inverso de la distancia. In RA-MA (Ed.), *Sistemas y análisis de la información geográfica, Manual de autoaprendizaje con ArcGIS* (Primera., pp. 745–790). España: Albadalejo, S. L.
- Castillo, S., & Lozano, E. (2007). QQ Plot Normal. Los puntos de posición gráfica. *Iniciación a La ...*, 9, 1–20. Retrieved from <http://revistaselectronicas.ujaen.es/index.php/ininv/article/viewArticle/259>
- Contaminación del aire y salud de la personas. (n.d.). Retrieved from <https://www.windows2universe.org/milagro/effects/health.html&edu=elem&lang=sp&dev=1>

- EMOV EP. (2012). *informe* (pp. 1–132). Cuenca. Retrieved from <http://www.emov.gob.ec/documentos/calidad del aire 2012 web.pdf>
- ESRI. (2012). Kriging. Retrieved from <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/009z00000076000000>
- ESRI. (2013a). Análisis Estadístico. Retrieved from <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#/na/018p00000006000000/>
- ESRI. (2013b). IDW (Spatial Analyst). Retrieved from <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#/009z0000006m000000>
- Introducción a la toxicología de la contaminación del aire. (n.d.). Retrieved from http://bvs.per.paho.org/bvsci/e/fulltext/toxicol/lecc1/lecc1_2b.html
- Introducción al monitoreo atmosférico. (n.d.). Retrieved from <http://www.bvsde.paho.org/bvsci/e/fulltext/intromon/conclus.html>
- Jiménez, A. (2013). Población y polución atmosférica intraurbana por dióxido de nitrógeno en Madrid: análisis desde la justicia ambiental basado en Sistemas de Información Geográfica. *Cuadernos Geográficos*, 52, 84–107. Retrieved from <http://revistaseug.ugr.es/index.php/cuadgeo/article/view/927>
- Lozano, A., Usero, J., & Vanderlinden, E. (2010). Optimization of design of air quality monitoring networks and its application to NO₂ and O₃ in Seville, Spain. *Air Quality*, 49–65. Retrieved from http://www.intechopen.com/source/pdfs/11380/InTech-Development_of_the_design_of_air_quality_monitoring_networks_and_its_applications_to_n_o2_and_o3_in_seville_spain.pdf
- Melo Martínez, C. E. (2012). Análisis Geoestadístico Espacio Tiempo Basado en Distancias y Splines con Aplicaciones, 276. Retrieved from http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/35471/3/CEMM_TESIS.pdf
- OMS, O. M. de la S. (2004). Guías para la calidad del aire. Retrieved from <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsci/fulltext/guiasaire.pdf>
- Sotter, A., Ipia, A., Vaca, W., & Pulido, J. (2001). Geoestadística aplicada a estudios de contaminación ambiental. *Ingeniería*, 31–38. Retrieved from <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/2815>
- Villatoro, M., Henríquez, C., & Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, CA, CICE y P del suelo. ... *Costarricense: Revista de ...*, 32(1), 95–105. Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2737860>
- Wikipedia. (2013). Variograma. Retrieved from <http://es.wikipedia.org/wiki/Variograma>
- Wikipedia. (2014). Polígonos de Thiessen. Retrieved from http://es.wikipedia.org/wiki/Polígono_de_Thiessen

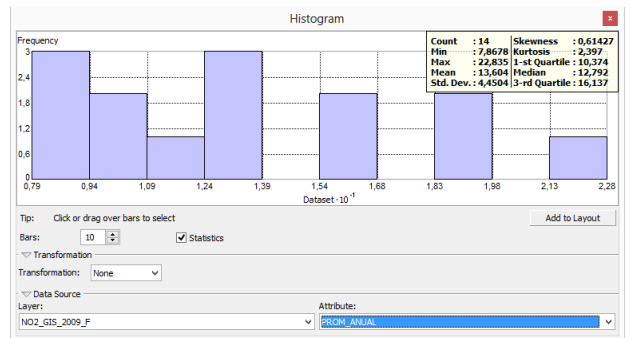
6. ANEXOS

ANEXO NRO. 1 - Histogramas de los contaminantes gaseosos NO₂, SO₂ y O₃ en el periodo de 2008 al 2012

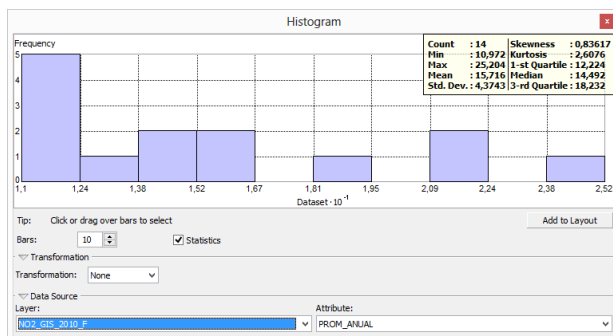
- Dióxido de Nitrógeno (NO₂)



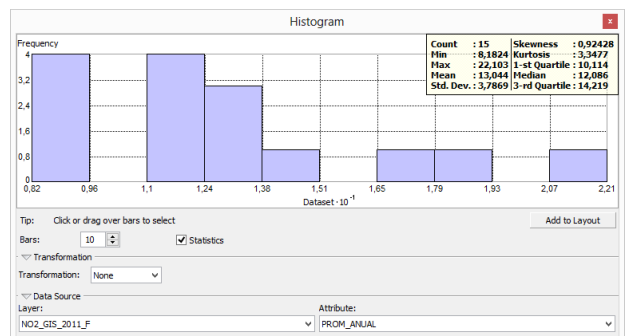
NO2_GIS_2008_F



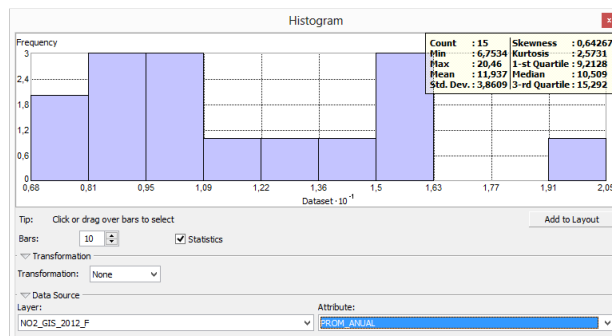
NO2_GIS_2009_F



NO2_GIS_2010_F



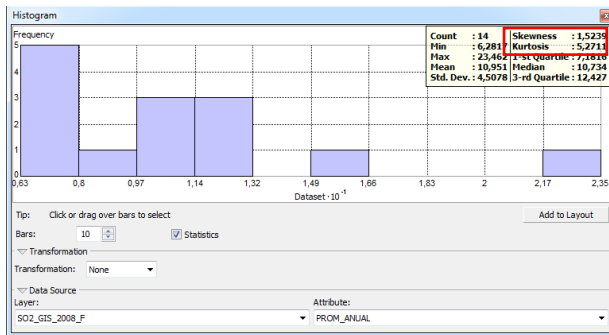
NO2_GIS_2011_F



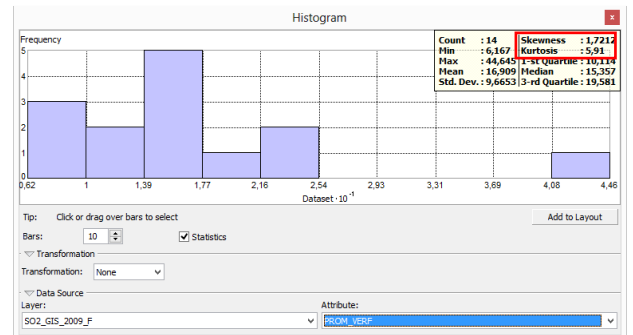
NO2_GIS_2012_F

Gráfico Nro. 13 Histogramas del contaminante NO₂ del periodo 2008 al 2012

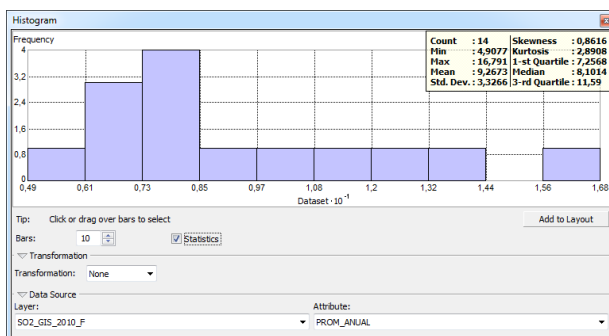
- Dióxido de Azufre (SO₂)



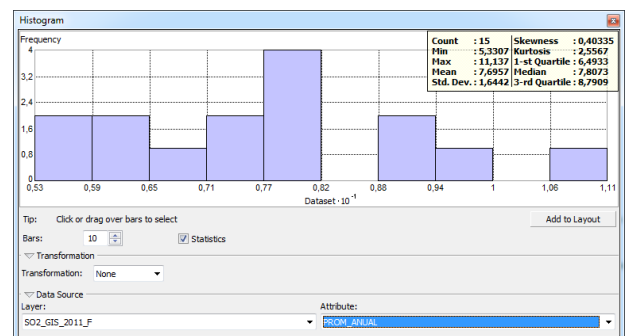
SO2_GIS_2008_F (Sesgo positivo)



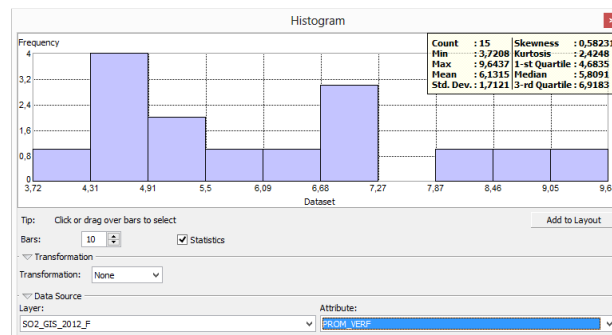
SO2_GIS_2009_F (Sesgo positivo)



SO2_GIS_2010_F



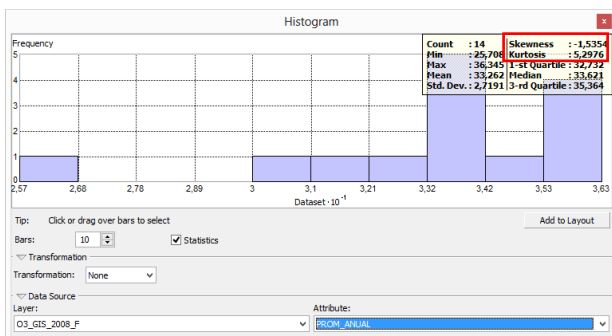
SO2_GIS_2011_F



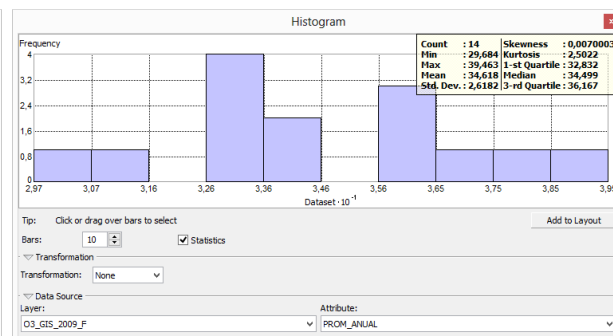
SO2_GIS_2012_F

Gráfico Nro. 14 Histogramas del contaminante SO₂ del periodo 2008 al 2012

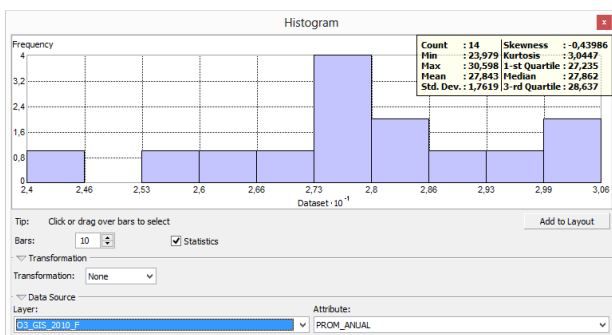
- Ozono Troposférico (O₃)



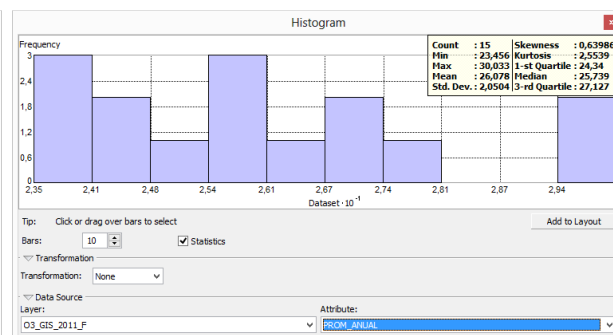
O3_GIS_2008_F (Sesgo negativo)



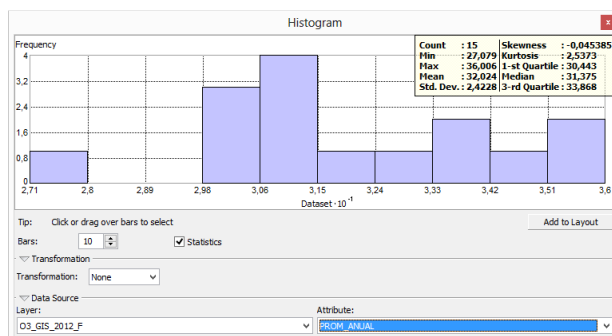
O3_GIS_2009_F



O3_GIS_2010_F



O3_GIS_2011_F



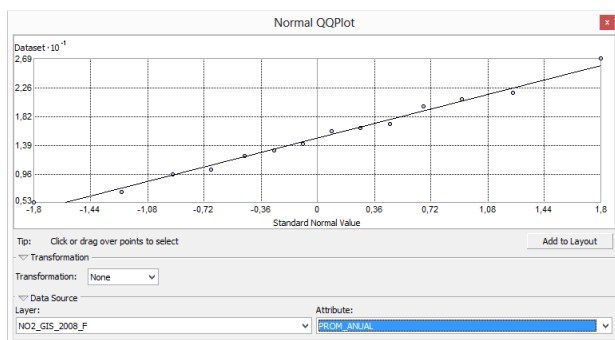
O3_GIS_2012_F

Gráfico Nro. 15 Histogramas del contaminante O₃ del periodo 2008 al 2012

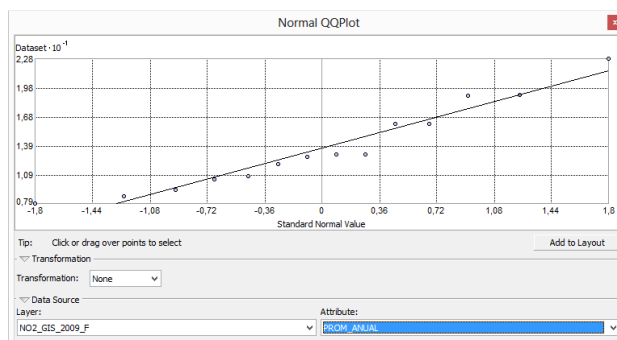
ANEXO NRO. 2 - Gráficos QQ - Plot de los contaminantes gaseosos NO₂, SO₂, y O₃ en el periodo 2008 al 2012

A través de estos gráficos se puede evaluar la distribución de los datos, la linealidad de los puntos sugiere que los datos se distribuyen normalmente.

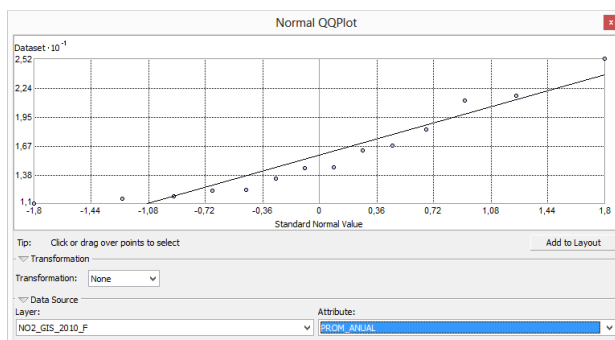
- **Dióxido de Nitrógeno (NO₂)**



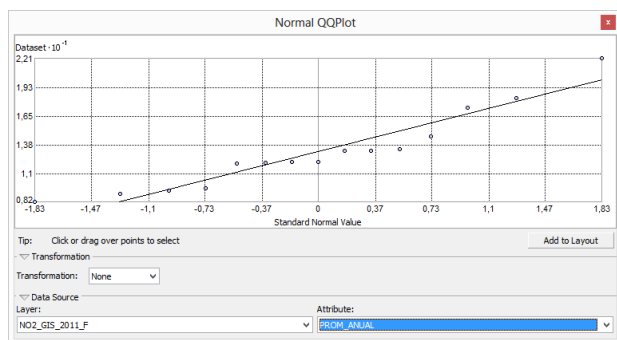
NO2_GIS_2008_F



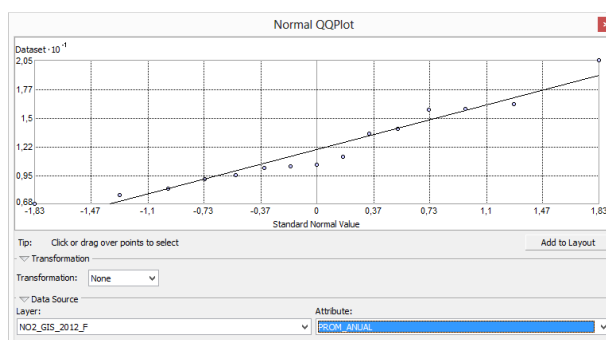
NO2_GIS_2009_F



NO2_GIS_2010_F



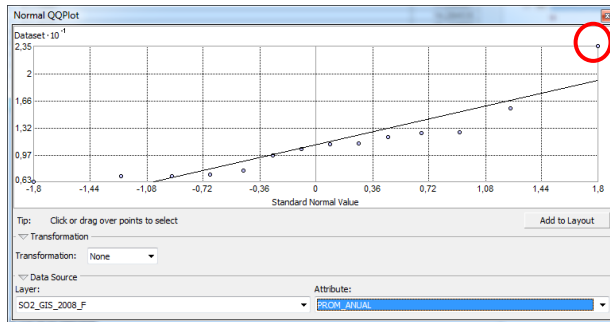
NO2_GIS_2011_F



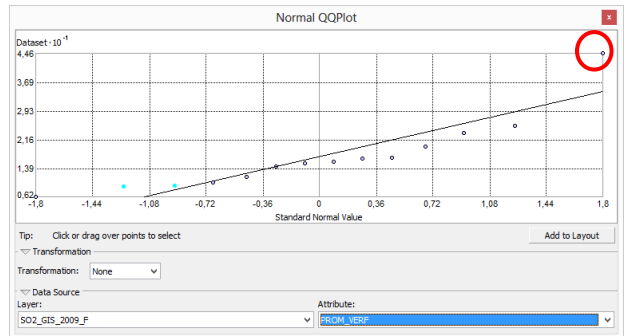
NO2_GIS_2012_F

Gráfico Nro. 16 QQ-Plots del contaminante NO₂ del periodo 2008 al 2012

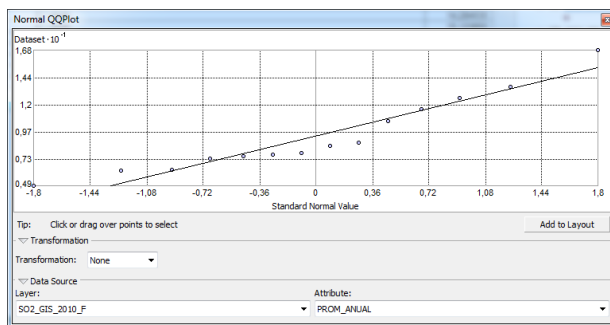
- Dióxido de Azufre (SO₂)



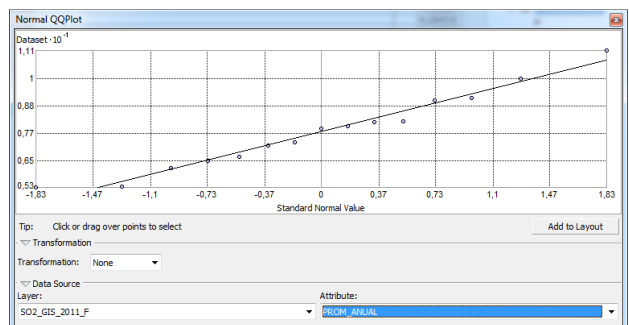
SO2_GIS_2008_F



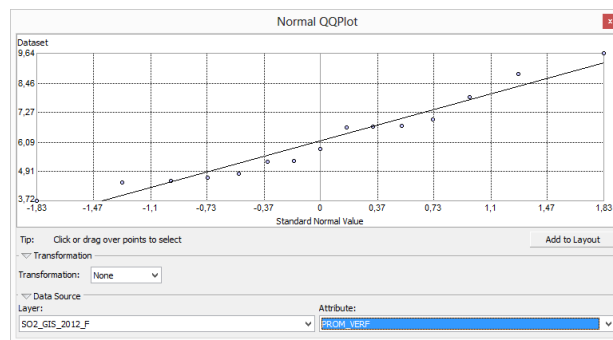
SO2_GIS_2009_F



SO2_GIS_2010_F



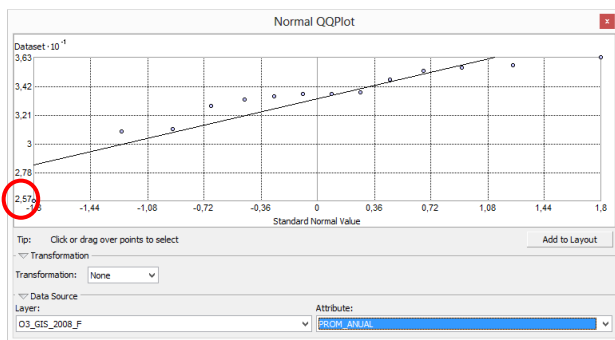
SO2_GIS_2011_F



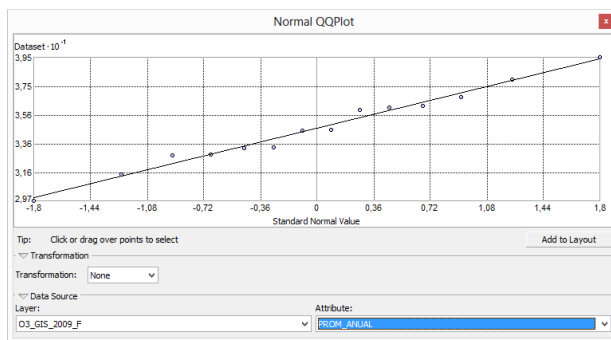
SO2_GIS_2012_F

Gráfico Nro. 17 QQ-Plots del contaminante SO₂ del periodo 2008 al 2012

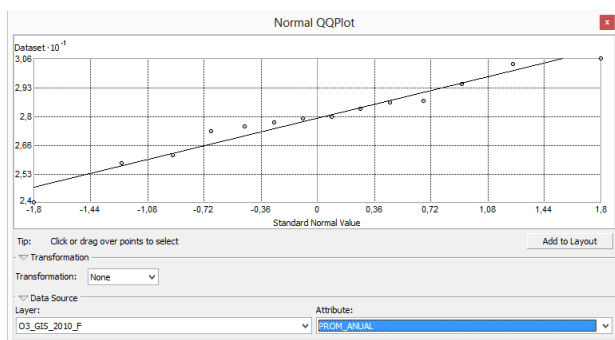
• **Ozono Troposférico (O₃)**



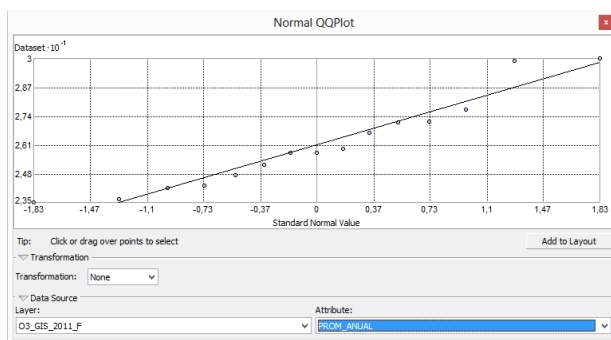
O3_GIS_2008_F



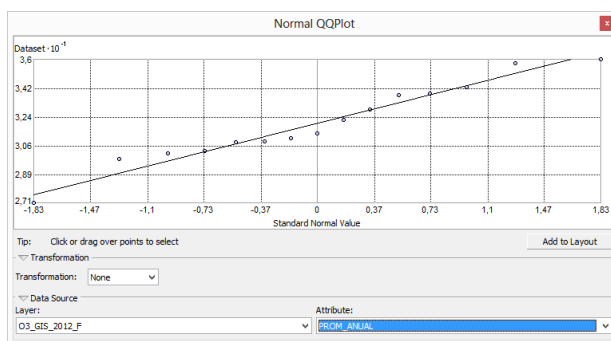
O3_GIS_2009_F



O3_GIS_2010_F



O3_GIS_2011_F



O3_GIS_2012_F

Gráfico Nro. 18 QQ-Plots del contaminante O₃ del periodo 2008 al 2012

- Se puede observar que los datos mejor distribuidos corresponden a ozono troposférico del año 2009.

ANEXO NRO. 3 – Análisis de tendencias de los contaminantes gaseosos NO₂, SO₂ y O₃ en el periodo 2008 – 2012

• **Dióxido de Nitrógeno (NO₂)**

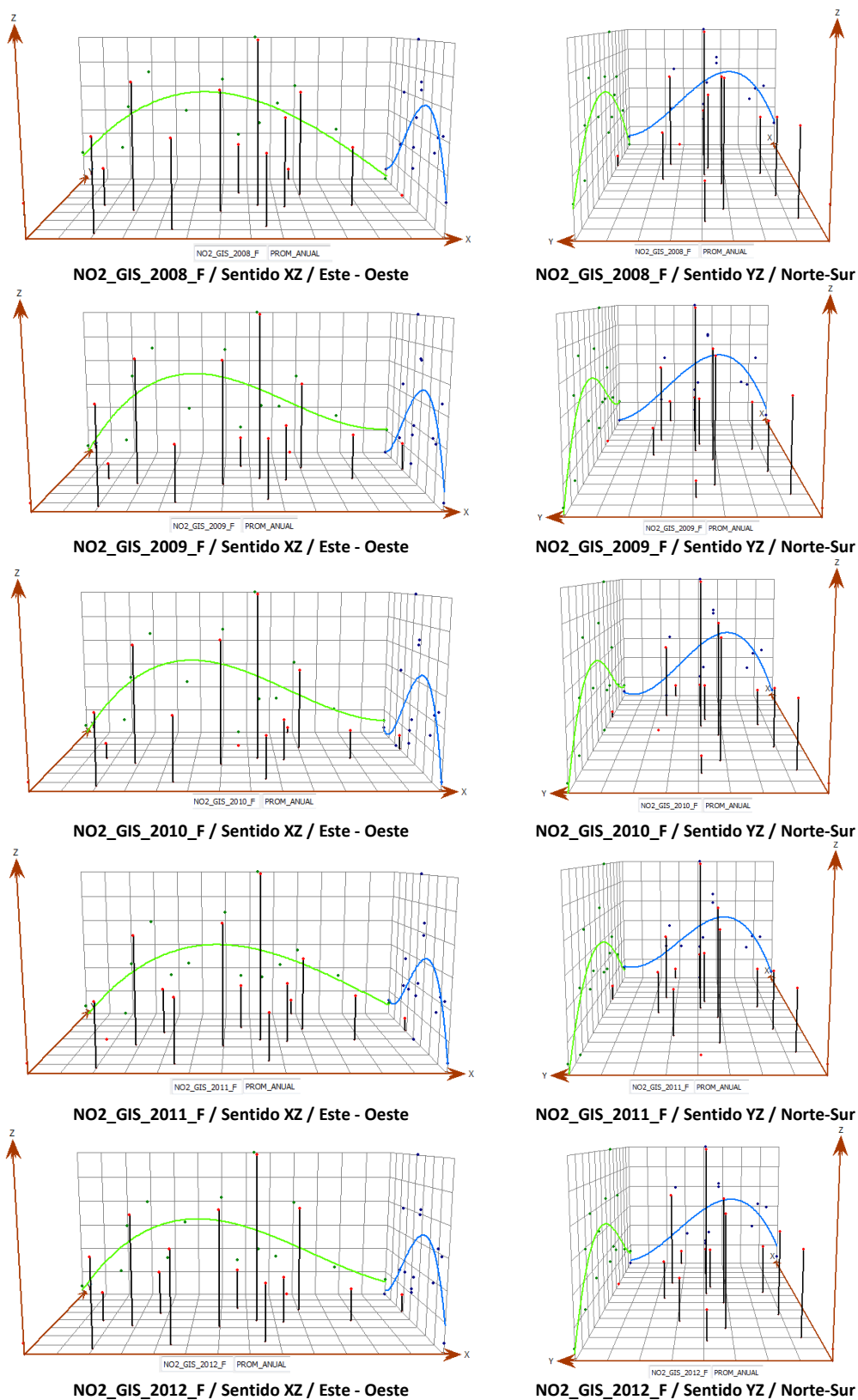
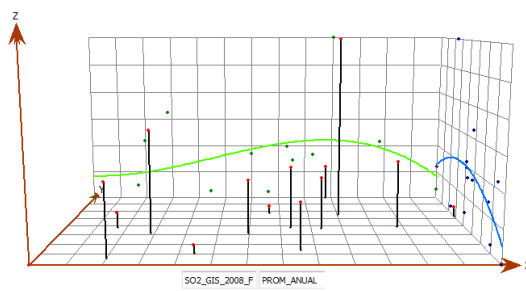
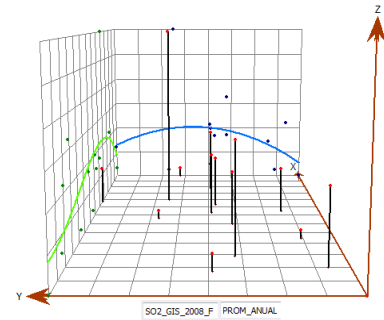


Gráfico Nro. 19 Tendencias globales del contaminante NO₂ del periodo 2008 al 2012

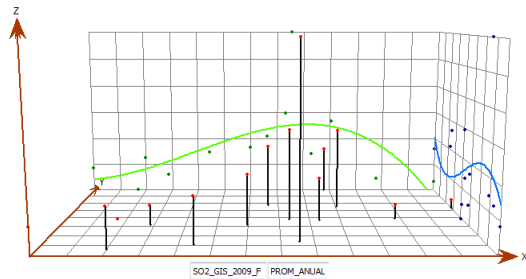
• Dióxido de Azufre (SO₂)



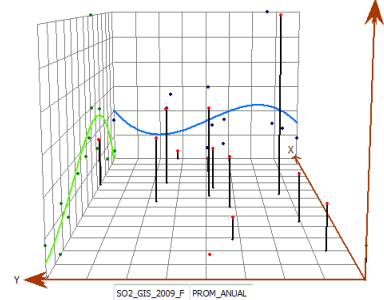
SO2_GIS_2008_F / Sentido XZ / Este - Oeste



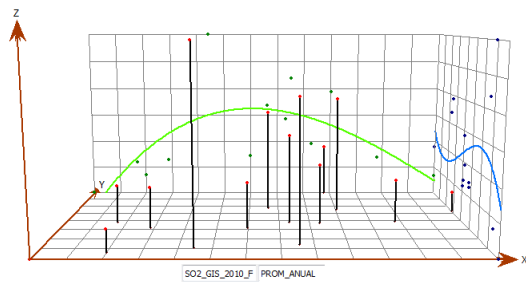
SO2_GIS_2008_F / Sentido YZ / Norte-Sur



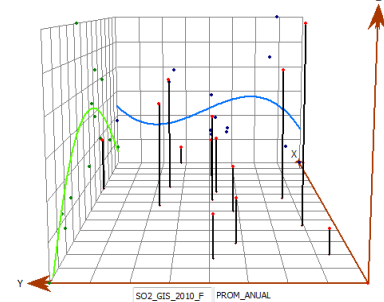
SO2_GIS_2009_F / Sentido XZ / Este - Oeste



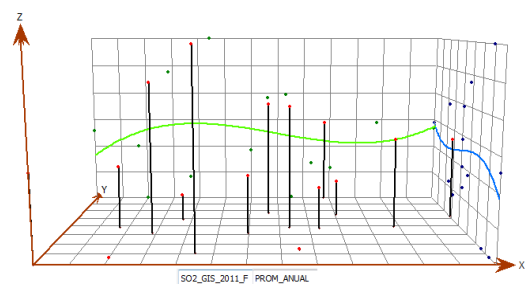
SO2_GIS_2009_F / Sentido YZ / Norte-Sur



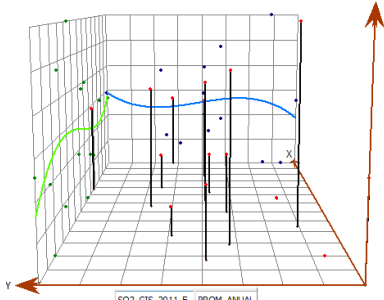
SO2_GIS_2010_F / Sentido XZ / Este - Oeste



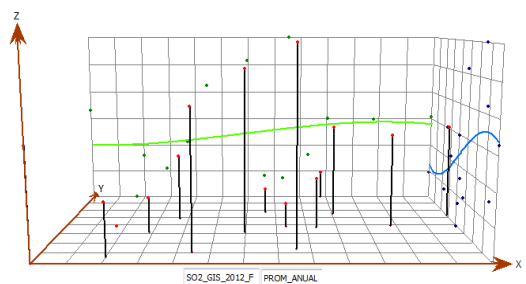
SO2_GIS_2010_F / Sentido YZ / Norte-Sur



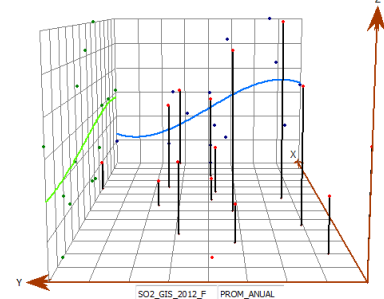
SO2_GIS_2011_F / Sentido XZ / Este - Oeste



SO2_GIS_2011_F / Sentido YZ / Norte-Sur



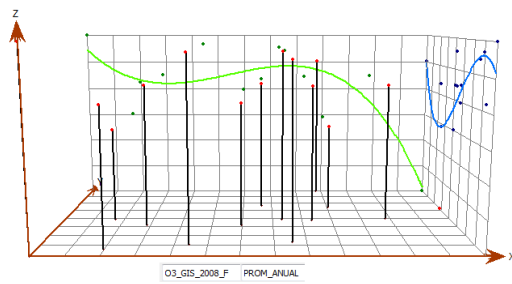
SO2_GIS_2012_F / Sentido XZ / Este - Oeste



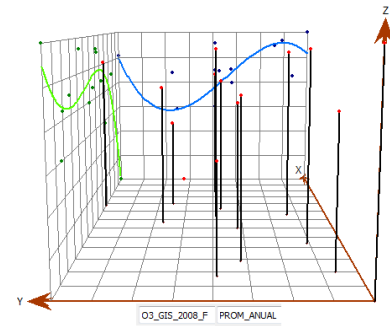
SO2_GIS_2012_F / Sentido YZ / Norte-Sur

Gráfico Nro. 20 Tendencias globales del contaminante SO₂ del periodo 2008 al 2012

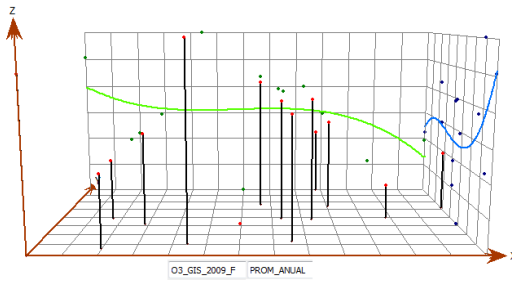
• **Ozono Troposférico (O₃)**



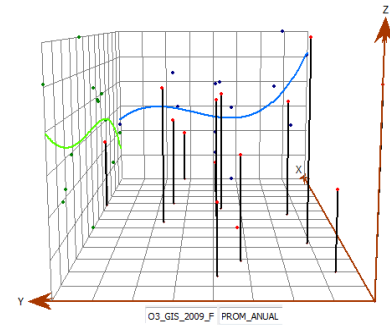
O3_GIS_2008_F / Sentido XZ / Este - Oeste



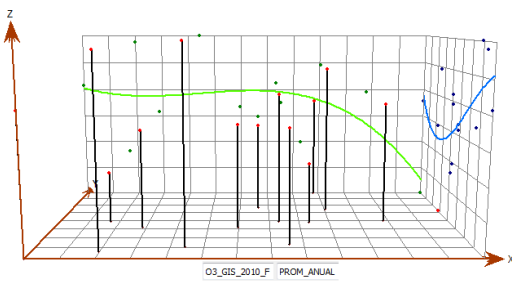
O3_GIS_2008_F / Sentido YZ / Norte-Sur



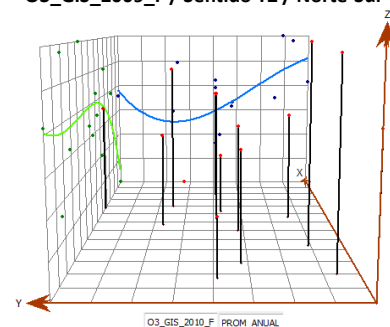
O3_GIS_2009_F / Sentido XZ / Este - Oeste



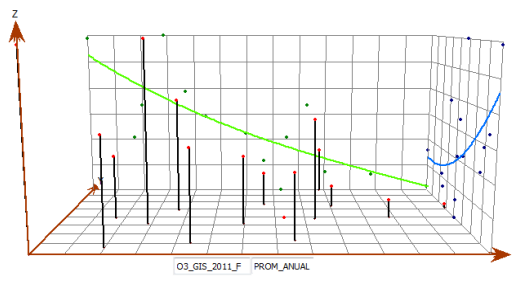
O3_GIS_2009_F / Sentido YZ / Norte-Sur



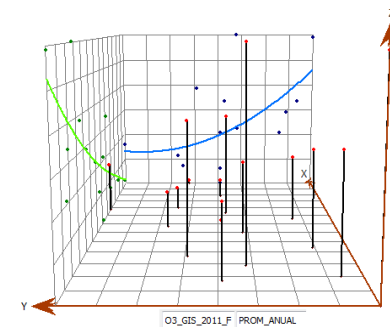
O3_GIS_2010_F / Sentido XZ / Este - Oeste



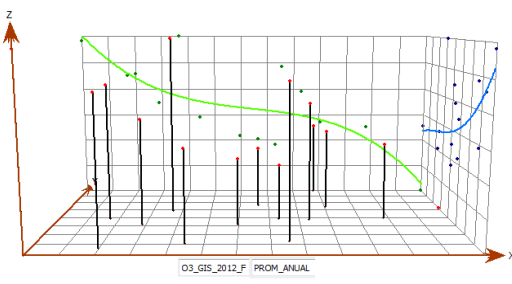
O3_GIS_2010_F / Sentido YZ / Norte-Sur



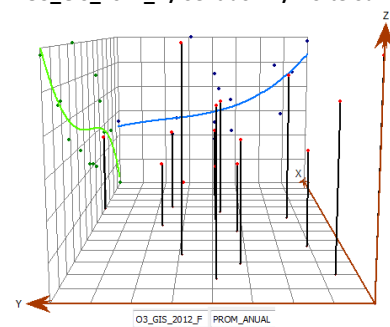
O3_GIS_2011_F / Sentido XZ / Este - Oeste



O3_GIS_2011_F / Sentido YZ / Norte-Sur



O3_GIS_2012_F / Sentido XZ / Este - Oeste



O3_GIS_2012_F / Sentido YZ / Norte-Sur

Gráfico Nro. 21 Tendencias globales del contaminante O₃ del periodo 2008 al 2012

ANEXO NRO. 4 – Semivariogramas de los contaminantes gaseosos NO₂, SO₂ y O₃ en el periodo 2008 – 2012

- **Dióxido de Nitrógeno (NO₂)**

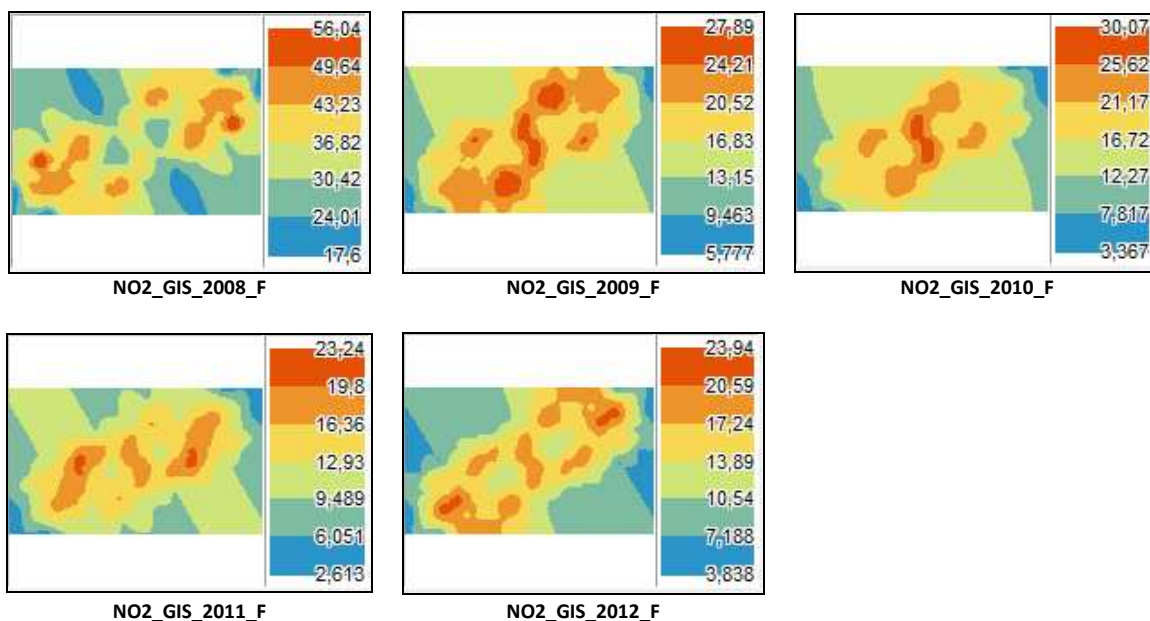


Gráfico Nro. 22 Semivariogramas del contaminante NO₂ del periodo 2008 al 2012

- **Dióxido de Azufre (SO₂)**

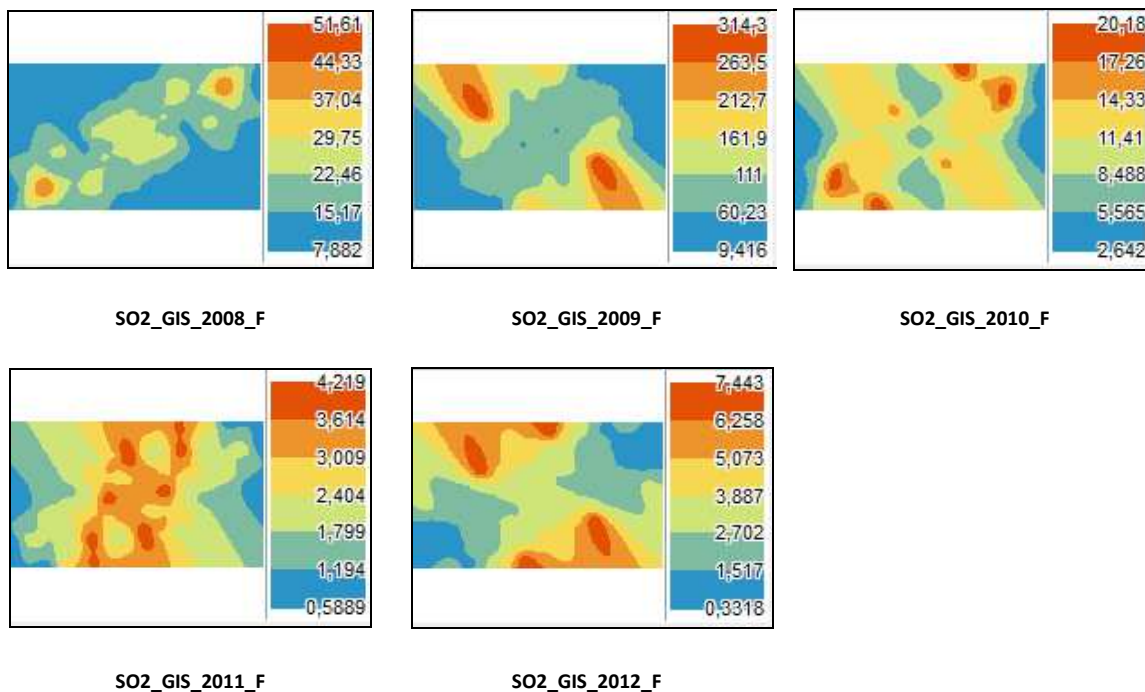


Gráfico Nro. 23 Semivariogramas del contaminante SO₂ del periodo 2008 al 2012

- Ozono Troposférico (O₃)

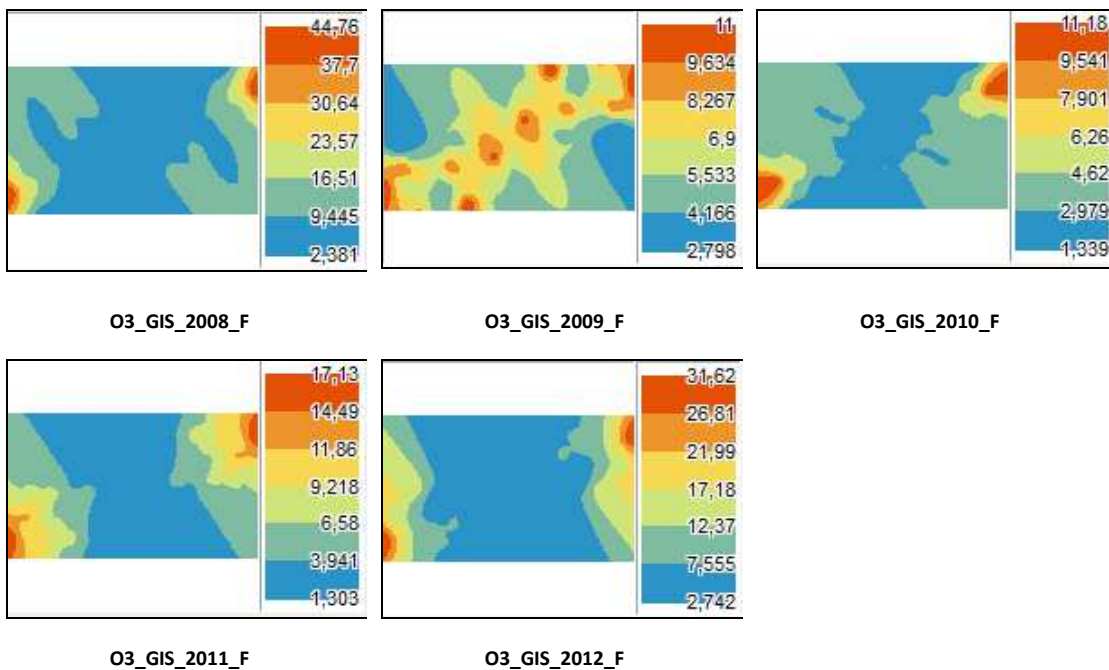


Gráfico Nro. 24 Semivariogramas del contaminante O₃ del periodo 2008 al 2012

ANEXO NRO. 5 – Pruebas realizadas con diferentes valores sobre los parámetros que intervienen en el interpolador IDW de los contaminantes NO₂, SO₂ y O₃ en el periodo 2008 – 2012

• **Dióxido de Nitrógeno (NO₂)**

Contaminante	Año	Power	Neighborhood type	Max neighbors	Min neighbors	Sector Type	Promedio	RMS
NO ₂	2008	2	Standard	15	10	1 Sector	2,232363	6,704497
		2	Standard	14	11	1 Sector	2,085489	6,638808
		2	Standard	14	12	1 Sector	2,011949	6,603341
		3	Standard	14	12	1 Sector	2,537044	7,095593
		2	Standard	5	3	1 Sector	2,633387	7,057481
		3	Standard	5	3	1 Sector	2,877664	7,397760
		2	Standard	15	10	4 Sector	1,946745	6,586348
		2	Standard	14	11	4 Sector	1,936916	6,583514
		2	Standard	14	12	4 Sector	1,926691	6,572520
		2	Standard	5	3	4 Sector	2,189890	6,707861
		2	Standard	15	10	4 sector 45 grados	1,948606	6,600200
		2	Standard	14	11	4 sector 45 grados	1,922215	6,569509
		2	Standard	14	12	4 sector 45 grados	1,923536	6,571532
		2	Standard	5	3	4 sector 45 grados	2,064598	6,600413
		2	Standard	15	10	8 sector	1,926691	6,572520
		2	Standard	14	11	8 sector	1,918554	6,563916
		2	Standard	14	12	8 sector	1,918554	6,563916
3	Standard	14	12	8 sector	2,509747	7,080946		
2	Standard	5	3	8 sector	1,944167	6,577883		
NO ₂	2009	2	Standard	15	10	1 Sector	1,440348	5,349867
		2	Standard	14	12	1 Sector	1,305155	5,283661
		2	Standard	15	10	4 Sector	1,265389	5,273598
		2	Standard	14	12	4 Sector	1,252429	5,260203
		2	Standard	15	10	4 sector 45 grados	1,266078	5,270699
		2	Standard	14	12	4 sector 45 grados	1,253101	5,258359
		2	Standard	15	10	8 sector	1,252429	5,260203
		2	Standard	14	12	8 sector	1,248970	5,255925
NO ₂	2010	2	Standard	15	10	1 Sector	1,355356	5,180927
		2	Standard	14	12	1 Sector	1,227345	5,119497
		2	Standard	15	10	4 Sector	1,191301	5,107530
		2	Standard	14	12	4 Sector	1,179908	5,098728
		2	Standard	15	10	4 sector 45 grados	1,192029	5,108398
		2	Standard	14	12	4 sector 45 grados	1,179763	5,097481
		2	Standard	15	10	8 sector	1,179908	5,098728
		2	Standard	14	12	8 sector	1,176650	5,095553
NO ₂	2011	2	Standard	15	10	1 Sector	1,280763	4,274724
		2	Standard	15	12	1 Sector	1,167160	4,218638
		2	Standard	15	10	4 Sector	1,097727	4,191332
		2	Standard	15	12	4 Sector	1,086378	4,184713
		2	Standard	15	10	4 sector 45 grados	1,093898	4,192818
		2	Standard	15	12	4 sector 45 grados	1,083593	4,181462
		2	Standard	15	10	8 sector	1,086079	4,184063
		2	Standard	15	12	8 sector	1,080161	4,178197
NO ₂	2012	2	Standard	15	10	1 Sector	1,228280	4,501772
		2	Standard	15	12	1 Sector	1,133892	4,452079
		2	Standard	15	13	1 Sector	1,096222	4,436144
		2	Standard	15	10	4 Sector	1,070108	4,432939
		2	Standard	15	12	4 Sector	1,056212	4,425933
		2	Standard	15	13	4 sector	1,050248	4,418453
		2	Standard	15	10	4 sector 45 grados	1,055550	4,423800
		2	Standard	15	12	4 sector 45 grados	1,048313	4,415497
		2	Standard	15	13	4 sector 45 grados	1,050257	4,417020
		2	Standard	15	10	8 sector	1,053393	4,420907
		2	Standard	15	12	8 sector	1,047112	4,414563
2	Standard	15	13	8 sector	1,047112	4,414563		

Tabla Nro. 8 Pruebas realizadas con diferentes valores sobre los parámetros del interpolador IDW del contaminante NO₂ del periodo 2008 al 2012

- Dióxido de Azufre (SO₂)

Contaminante	Año	Power	Neighborhood type	Max neighbors	Min neighbors	Sector Type	Promedio	RMS
SO ₂	2008	2	Standard	15	10	1 Sector	0,862893	5,357600
		2	Standard	14	12	1 Sector	0,800375	5,313124
		2	Standard	15	10	4 Sector	0,754696	5,294547
		2	Standard	14	12	4 Sector	0,752186	5,294214
		2	Standard	15	10	4 sector 45 grados	0,772824	5,312377
		2	Standard	14	12	4 sector 45 grados	0,754607	5,297148
		2	Standard	15	10	8 sector	0,752186	5,294214
		2	Standard	14	12	8 sector	0,748968	5,291001

Contaminante	Año	Power	Neighborhood type	Max neighbors	Min neighbors	Sector Type	Promedio	RMS
SO ₂	2009	2	Standard	15	10	1 Sector	0,771340	9,178229
		2	Standard	14	12	1 Sector	0,576590	9,164339
		2	Standard	15	10	4 Sector	0,517164	9,165293
		2	Standard	14	12	4 Sector	0,509632	9,163868
		2	Standard	15	10	4 sector 45 grados	0,537820	9,188841
		2	Standard	14	12	4 sector 45 grados	0,509623	9,165984
		2	Standard	15	10	8 sector	0,509632	9,163868
		2	Standard	14	12	8 sector	0,505365	9,162402

Contaminante	Año	Power	Neighborhood type	Max neighbors	Min neighbors	Sector Type	Promedio	RMS
SO ₂	2010	2	Standard	15	10	1 Sector	0,320415	3,329789
		2	Standard	14	12	1 Sector	0,242503	3,319746
		2	Standard	15	10	4 Sector	0,205924	3,322688
		2	Standard	14	12	4 Sector	0,203333	3,320321
		2	Standard	15	10	4 sector 45 grados	0,218345	3,333370
		2	Standard	14	12	4 sector 45 grados	0,205604	3,322448
		2	Standard	15	10	8 sector	0,203333	3,320321
		2	Standard	14	12	8 sector	0,201761	3,318691

Contaminante	Año	Power	Neighborhood type	Max neighbors	Min neighbors	Sector Type	Promedio	RMS
SO ₂	2011	2	Standard	15	10	1 Sector	0,063838	1,981559
		2	Standard	15	12	1 Sector	0,071427	1,971934
		2	Standard	15	10	4 Sector	0,057661	1,968207 (* MRM)
		2	Standard	15	12	4 Sector	0,057743	1,966889
		2	Standard	15	10	4 sector 45 grados	0,060444	1,966200
		2	Standard	15	12	4 sector 45 grados	0,061779	1,965972
		2	Standard	15	10	8 sector	0,058660	1,966490
		2	Standard	15	12	8 sector	0,059339	1,966248 (*MRC)

Contaminante	Año	Power	Neighborhood type	Max neighbors	Min neighbors	Sector Type	Promedio	RMS
SO ₂	2012	2	Standard	15	10	1 Sector	-0,166598	1,639058 (* MRM)
		2	Standard	15	12	1 Sector	-0,188655	1,648341
		2	Standard	15	10	4 Sector	-0,186628	1,644814
		2	Standard	15	12	4 Sector	-0,184122	1,642556
		2	Standard	15	10	4 sector 45 grados	-0,180130	1,640242
		2	Standard	15	12	4 sector 45 grados	-0,183831	1,642558
		2	Standard	15	10	8 sector	-0,185596	1,643484
		2	Standard	15	12	8 sector	-0,184294	1,642698 (*MRC)

*MRC = Mejor resultado continuidad

*MRM = Mejor resultado matemático

Tabla Nro. 9 Pruebas realizadas con diferentes valores sobre los parámetros del interpolador IDW del contaminante SO₂ del periodo 2008 al 2012

- Ozono Troposférico (O₃)

Contaminante	Año	Power	Neighborhood type	Max neighbors	Min neighbors	Sector Type	Promedio	RMS	
O ₃	2008	2	Standard	15	10	1 Sector	0,266599	2,838810	
		2	Standard	14	12	1 Sector	0,231624	2,835916	
		2	Standard	15	10	4 Sector	0,224602	2,835855	
		2	Standard	14	12	4 Sector	0,220872	2,831566	
		2	Standard	15	10	4 sector 45 grados	0,223751	2,841200	
		2	Standard	14	12	4 sector 45 grados	0,212883	2,830914	(*MRM)
		2	Standard	15	10	8 sector	0,220872	2,831566	
		2	Standard	14	12	8 sector	0,215277	2,837506	(*MRC)
O ₃	2009	2	Standard	15	10	1 Sector	0,072740	2,935660	
		2	Standard	14	12	1 Sector	0,019191	2,936434	(*MRM)
		2	Standard	15	10	4 Sector	0,037509	2,925778	
		2	Standard	14	12	4 Sector	0,031666	2,928748	
		2	Standard	15	10	4 sector 45 grados	0,028609	2,926586	
		2	Standard	14	12	4 sector 45 grados	0,027107	2,928932	
		2	Standard	15	10	8 sector	0,031666	2,928748	
		2	Standard	14	12	8 sector	0,030704	2,930000	(*MRC)
O ₃	2010	2	Standard	15	10	1 Sector	0,123069	1,834515	
		2	Standard	14	12	1 Sector	0,111522	1,829080	
		2	Standard	15	10	4 Sector	0,106128	1,830119	
		2	Standard	14	12	4 Sector	0,101561	1,832711	
		2	Standard	15	10	4 sector 45 grados	0,103091	1,836268	
		2	Standard	14	12	4 sector 45 grados	0,097573	1,831158	
		2	Standard	15	10	8 sector	0,101561	1,832711	
		2	Standard	14	12	8 sector	0,097918	1,831945	
O ₃	2011	2	Standard	15	10	1 Sector	-0,007208	1,823482	
		2	Standard	15	12	1 Sector	-0,013981	1,823172	
		2	Standard	15	10	4 Sector	0,002166	1,819519	
		2	Standard	15	12	4 Sector	-0,000719	1,830806	
		2	Standard	15	10	4 sector 45 grados	-0,016540	1,826859	
		2	Standard	15	12	4 sector 45 grados	-0,010487	1,832267	
		2	Standard	15	10	8 sector	-0,006072	1,830477	
		2	Standard	15	12	8 sector	-0,004440	1,836994	
O ₃	2012	2	Standard	15	10	1 Sector	-0,053479	2,132496	
		2	Standard	15	12	1 Sector	-0,055003	2,120679	
		2	Standard	15	10	4 Sector	-0,043833	2,130260	
		2	Standard	15	12	4 Sector	-0,046884	2,144960	
		2	Standard	15	10	4 sector 45 grados	-0,060839	2,125027	
		2	Standard	15	12	4 sector 45 grados	-0,058862	2,140224	
		2	Standard	15	10	8 sector	-0,052280	2,140772	
		2	Standard	15	12	8 sector	-0,052818	2,152392	

Tabla Nro. 10 Pruebas realizadas con diferentes valores sobre los parámetros del interpolador IDW del contaminante O₃ del periodo 2008 al 2012

ANEXO NRO. 6 – Pruebas realizadas con diferentes valores sobre los parámetros que intervienen en el interpolador Funciones de Base Radial del contaminante NO₂ en el periodo 2008 – 2012

Contaminante	Año	Función Kernel	Parametro Kernel	OPT	Max neighbors	Min neighbors	Sector Type	Promedio	RMS
NO ₂	2008	Completely Regularized Spline	0,01066452		14	12	1	0,770157	5,896844
		Completely Regularized Spline	0,01066452		14	12	4	0,631291	5,832867
		Completely Regularized Spline	0,01066452		14	12	4s45g	0,622632	5,834673
		Completely Regularized Spline	0,01066452		8	8	8	0,709142	5,910140
		Spline with Tension	0,013475982		14	12	1	0,709509	5,908990
		Spline with Tension	0,013475982		14	12	4	0,548726	5,847899
		Spline with Tension	0,013475982		14	12	4s45g	0,539170	5,849599
		Spline with Tension	0,013475982		8	8	8	0,631194	5,931589
		Spline with Tension	0,008554559	SI	8	8	8	0,697284	5,912103
		Multiquadric	0		14	12	1	1,286772	5,923872
		Multiquadric	0		14	12	4s 45g	1,292749	5,923780
		Multiquadric	0		8	8	8	1,289879	5,920899
		Inverse Multiquadric	394,3420851		14	12	4	0,390962	5,934674
		Inverse Multiquadric	394,3420851		14	12	4s45g	0,372459	5,937459
		Inverse Multiquadric	394,3420851		8	8	8	0,518283	6,066595
		Inverse Multiquadric	532,9757323	SI	8	8	8	0,640627	6,022435
		Thin Plate Spline	0,001181596		14	12	4	1,777747	6,579228
		Thin Plate Spline	0,001181596		14	12	4s45g	1,816526	6,576884
		Thin Plate Spline	0,001181596		8	8	8	1,709371	6,554859
		Thin Plate Spline	1,00E+20	SI	8	8	8	1,691007	6,518246

Contaminante	Año	Función Kernel	Parametro Kernel	OPT	Max neighbors	Min neighbors	Sector Type	Promedio	RMS	
NO ₂	2009	Completely Regularized Spline	0,01066452		14	12	1	0,496052	4,820846	
		Completely Regularized Spline	0,01066452		14	12	4	0,402844	4,779273	
		Completely Regularized Spline	0,01066452		14	12	4s45g	0,415556	4,779131	
		Completely Regularized Spline	0,01066452		8	8	8	0,455114	4,822920	
		Spline with Tension	0,015360749		14	12	1	0,441072	4,762933	
		Spline with Tension	0,015360749		14	12	4	0,333008	4,720930	*MRM
		Spline with Tension	0,015360749		14	12	4s45g	0,345161	4,720732	*MRC
		Spline with Tension	0,015360749		8	8	8	0,389673	4,769878	
		Multiquadric	0		14	12	1	0,913309	5,198565	
		Multiquadric	0		14	12	4s 45g	0,910153	5,196408	
		Multiquadric	0		8	8	8	0,909714	5,195104	
		Inverse Multiquadric	1,18E-38		14	12	4	0,021520	4,644201	
		Inverse Multiquadric	1,18E-38		14	12	4s45g	0,031351	4,643418	
		Inverse Multiquadric	96,17248798	SI	8	8	8	0,171029	4,733323	
		Thin Plate Spline	1,00E+20		14	12	4	1,346899	5,867296	
		Thin Plate Spline	1,00E+20		14	12	4s45g	1,333877	5,863607	
Thin Plate Spline	1,00E+20		8	8	8	1,340174	5,860202			

Contaminante	Año	Función Kernel	Parametro Kernel	OPT	Max neighbors	Min neighbors	Sector Type	Promedio	RMS	
NO ₂	2010	Completely Regularized Spline	0,01066452		14	12	1	0,450941	4,689054	
		Completely Regularized Spline	0,01066452		14	12	4	0,376924	4,656212	
		Completely Regularized Spline	0,01066452		14	12	4s45g	0,383947	4,656272	
		Completely Regularized Spline	0,01066452		8	8	8	0,423172	4,687708	
		Spline with Tension	0,015360749		14	12	1	0,398999	4,635396	
		Spline with Tension	0,015360749		14	12	4	0,310998	4,601654	*MRC
		Spline with Tension	0,015360749		14	12	4s45g	0,317622	4,601675	
		Spline with Tension	0,015360749		8	8	8	0,361697	4,638395	
		Multiquadric	0		14	12	1	0,817806	5,067283	
		Multiquadric	0		14	12	4s 45g	0,816452	5,065198	
		Multiquadric	0		8	8	8	0,816220	5,064794	
		Inverse Multiquadric	1,18E-38		14	12	4	0,022626	4,561705	*MRM
		Inverse Multiquadric			8	8	8	0,126582	4,656580	
		Thin Plate Spline	1,00E+20		14	12	4	1,181677	5,946072	
Thin Plate Spline	1,00E+20		14	12	4s45g	1,193536	5,945677			
Thin Plate Spline	1,00E+20		8	8	8	1,190408	5,948105			

Contaminante	Año	Función Kernel	Parametro Kernel	OPT	Max neighbors	Min neighbors	Sector Type	Promedio	RMS	
NO ₂	2011	Completely Regularized Spline	0,01066452		15	12	1	0,436184	3,752409	
		Completely Regularized Spline	0,01066452		15	12	4	0,347067	3,715768	
		Completely Regularized Spline	0,01066452		15	12	4s45g	0,336718	3,703856	
		Completely Regularized Spline	0,01066452		8	8	8	0,389747	3,746873	
		Spline with Tension	0,015360749		15	12	1	0,402296	3,753641	
		Spline with Tension	0,015360749		15	12	4	0,292722	3,717302	
		Spline with Tension	0,015360749		15	12	4s45g	0,281724	3,704242	*MRC
		Spline with Tension	0,015360749		8	8	8	0,338511	3,752789	
		Spline with Tension	0,014757562	SI	8	8	8	0,341042	3,752074	
		Multiquadric	0		15	12	1	0,665212	3,775077	
		Multiquadric	0		15	12	4s 45g	0,667208	3,768107	
		Multiquadric	0		8	8	8	0,659280	3,764259	
		Inverse Multiquadric	267,4634411		15	12	4	0,163096	3,805082	
		Inverse Multiquadric	267,4634411		15	12	4s45g	0,145243	3,782401	*MRM
		Inverse Multiquadric	267,4634411		8	8	8	0,240081	3,872355	
		Inverse Multiquadric	434,0268392	SI	8	8	8	0,320784	3,829492	
		Thin Plate Spline	1,00E+20		15	12	4	0,818617	4,281877	
		Thin Plate Spline	1,00E+20		15	12	4s45g	0,850035	4,291886	
		Thin Plate Spline	1,00E+20		8	8	8	0,750414	4,210199	
		NO ₂	2012	Completely Regularized Spline	0,01066452		15	12	1	0,457930
Completely Regularized Spline	0,01066452				15	12	4	0,356181	4,038941	
Completely Regularized Spline	0,01066452				15	12	4s45g	0,341925	4,014740	*MRC
Completely Regularized Spline	0,01066452				8	8	8	0,402018	4,073481	
Spline with Tension	0,015360749				15	12	1	0,423191	4,036454	
Spline with Tension	0,015360749				15	12	4	0,300902	4,007495	
Spline with Tension	0,015360749				15	12	4s45g	0,285326	3,981679	
Spline with Tension	0,015360749				8	8	8	0,349013	4,046277	
Multiquadric	0				15	12	1	0,691964	4,170265	
Multiquadric	0				15	12	4s 45g	0,706801	4,165160	
Multiquadric	0				8	8	8	0,701643	4,163808	
Inverse Multiquadric	1,18E-38				15	12	4	0,052916	4,062921	
Inverse Multiquadric	1,18E-38				15	12	4s45g	0,018576	4,015495	*MRM
Inverse Multiquadric	1,18E-38				8	8	8	0,136768	4,149180	
Thin Plate Spline	0,001181596				15	12	4	0,939519	4,525669	
Thin Plate Spline	0,001181596		15	12	4s45g	0,967346	4,544613			
Thin Plate Spline	0,001181596		8	8	8	0,795596	4,475665			

Tabla Nro. 11 Pruebas realizadas sobre parámetros del interpolador
Funciones de Base Radial del contaminante NO₂ en el periodo 2008 al 2012