

Modelación de isolíneas meteorológicas y cálculo del gradiente térmico para la ciudad de Puebla (México) durante el periodo junio 2005-2006 con apoyo de imágenes satelitales

Rogelio Ramos Aguilar¹, Patricia Máximo Romero², Beatriz Adriana Montiel Peralta³, Yoloxochitl González Castelán³

Modelation of meteorological isolines and calculation of the thermal gradient for the city of Puebla between June 2005-2006 with the support of satellite images

Modelação de isolinhas meteorológicas e cálculo do gradiente térmico para a cidade de Povoá durante o período junho 2005-2006 com apoio de imagens satélites

Resumen

Introducción. En este trabajo se presenta la modelación en 2-D, 3-D y el análisis estadístico de los datos obtenidos por la estación meteorológica automática Cumulus. **Objetivo.** Determinar el comportamiento de isolíneas meteorológicas y su modelación utilizando el programa Surfer. **Materiales y Métodos.** Para el procesamiento de datos se utilizaron los programas Geoeas y Surfer, además de utilizar imágenes satelitales en el espectro visible e infrarrojo para calcular el gradiente térmico de la zona de estudio. **Resultados.** Este trabajo presenta los resultados obtenidos en la modelación estructural y estadística de las isolíneas meteorológicas, además del cálculo del gradiente térmico, mediante el análisis, identificación e información de las bases de datos obtenidas. **Conclusión.** Los datos de las redes de monitoreo ambiental de la Facultad de Ingeniería y del sistema HRPT, tienen diferentes características.

Palabras claves: Isoyetas. Isotermas. Radiación solar. Gradiente térmico. Surfer. AVHRR. Infrarrojo.

Abstract

Introduction. This work shows the 2D and 3D modelation and the statistic analysis of the data

obtained by the meteorological station Cumulus. **Objective.** To determine the behavior of meteorological isolines and their modelation by using the Surfer program. **Materials and methods.** Geoeas and Surfer programs were used for processing the data, and also satellite images were used in the infrared and the visible spectrum to calculate the thermal of the zone studied. **Results.** This work shows the results obtained in the structural and statistic modelations of the meteorological isolines and the thermal gradient, by the analysis, identification and information of the databases gotten. **Conclusion.** The data from the environmental monitoring nets of the Faculty of Engineering and the HRPT system, have different characteristics.

Key words: Isoyet. Isotherm. Sun radiation. Thermal gradient. Surfer. AVHRR. Infrared.

Resumo

Introdução. Neste trabalho se apresenta a modelação em 2-D, 3-D e a análise estatística dos dados obtidos pela estação meteorológica automática Cumulus. **Objetivo.** Determinar o comportamento de isolinhas meteorológicas e sua modelação utilizando o programa Surfer. **Materiais e Métodos.** Para o processamento de dados se utilizaram os progra-

¹ Ingeniero y Maestro en Ciencias, Jefe del Laboratorio de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (México)/ ² Ingeniera y Maestra en Ingeniería. Profesora de la Facultad de Ingeniería de la BUAP. Laboratorio de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (México)/ ³ Estudiante de Ingeniería Topográfica y Geodésica. Becario adscrito al Laboratorio de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (México).

Correspondencia: Rogelio Ramos Aguilar, e-mail: rogelio.ramos@fi.buap.mx

Fecha de recibo: 07/01/2008; fecha de aprobación: 05/02/2008

mas Geoeas e Surfer, além de utilizar imagens satelitales no espectro visível e infravermelho para calcular o gradiente térmico da zona de estudo. **Resultados.** Este trabalho apresenta os resultados obtidos na modelação estrutural e estatística das isolinhas meteorológicas, além do cálculo do gradiente térmico, mediante a análise, identificação

e informação das bases de dados obtidas. **Conclusão.** Os dados das redes de monitoração ambiental da Faculdade de Engenharia e do sistema HRPT, têm diferentes características.

Palavras chaves: Isoietas. Isotermas. Radiação solar. Gradiente térmico. Surfer. AVHRR. Infravermelho.

Introducción

En este trabajo se presenta la modelación en 2-D, 3-D y el análisis estadístico de los datos obtenidos por la estación meteorológica automática Cumulus (dirección del viento, energía, temperatura del aire, humedad, presión, temperatura del suelo, velocidad del viento y precipitación).

La modelación cartográfica se obtuvo utilizando el programa Surfer, el cual interpola y extrapola puntos a partir de una base de datos relacionada a un mapa base, además se presenta su comportamiento en forma gráfica para su fácil interpretación. Obteniéndose así los resultados para el estado y la capital de Puebla^{1,2}.

También se muestra la modelación estructural y estadística del comportamiento de variables meteorológicas durante un año (junio 2005-2006) utilizando datos de la estación meteorológica de la Facultad de Ingeniería de la BUAP con apoyo de datos de la REMA y CNA.

Materiales y métodos

Se realizó un mapa base con coordenadas geográficas para la modelación de las variables meteorológicas procesadas con el programa Surfer (dirección del viento, energía, temperatura del aire, humedad, presión, temperatura del suelo, velocidad del viento y precipitación). Así mismo los datos obtenidos durante el periodo de junio 2005-2006 fueron procesados con el programa Geoeas para el análisis estadístico^{3,4}.

Con el programa de la estación meteorológica automática Cumulus se obtuvieron 13 series de datos durante cada mes de las siguientes variables acumulativas: fecha, hora, dirección del viento (grados), energía (W/m²), temperatura del aire (°C), temperatura máxima y mínima y su

promedio durante 24 horas (°C), humedad (%), presión (mb), temperatura del suelo (°C), promedio del viento (m/s) y precipitación (mm); para modelar durante el periodo señalado su comportamiento. La hora de medición en todos los casos fue las 12:00.

Metodología estadística. Se recabaron datos de las redes de estaciones para el periodo junio 2005-2006 y se formaron 4 matrices estructurándose de la siguiente forma⁷:

Red de monitoreo		
Estación de monitoreo	Max. Tem. Anuales	Promedio diario de 4 estaciones
	Min. Tem. Anuales	

Se utilizó la siguiente ecuación para obtener los promedios diarios para cada matriz de datos de las dos Redes de Monitoreo:

$$E(X) = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}$$

Los totales diarios obtenidos se expresan en la siguiente tabla:

Total de temperaturas máximas (BUAP)	1270
Total de temperaturas mínimas (BUAP)	1270
Total de temperaturas máximas (CNA)	1067
Total de temperaturas mínimas (CNA)	1067
*Total de temperaturas máximas (REMA)	1324
Total de temperaturas mínimas (REMA)	1324

* Se descarta en la aplicación de la ecuación

La similitud del comportamiento de los máximos y mínimos de ambas redes se obtuvieron mediante la siguiente ecuación:

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} = \frac{\Sigma(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\Sigma(x - \bar{x})^2} \sqrt{\Sigma(y - \bar{y})^2}}$$

Tabla. 1. Base de datos anual de las variables sobre la que se trabajó la modelación

Fecha	Dirección del viento (Grados)	Energía (W/m ²)	Temperatura del aire (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Humedad (%RH)	Presión (mb)	Temperatura del suelo (°C)	Promedio del viento (m/s)	Viento Máximo (m/s)	Precipitación (mm)
01/06/05	276,9	501,6	22,2	22,2	9,9	47	793,8	28,1	0,0	0,0	134,3
01/07/05	205,4	994,3	24,2	25,4	13,2	42,9	793,8	31,6	0,0	0,0	157,5
01/08/05	125,2	945,5	25,2	25,8	12,9	40,3	793,3	34,4	0,0	0,0	110,1
01/09/05	84,3	425,3	21,8	25,1	12,0	55,4	793,3	34,4	0,0	0,0	56,4
01/10/05	146,1	264,1	21,6	25,6	11,9	47,8	792,3	31,6	0,0	0,0	4,1
01/11/05	181,5	385,3	23,9	24,4	7,8	43	791,8	31,6	0,0	0,0	1,9
01/12/05	120,4	213,1	19,7	25,4	6,8	70,4	792,3	29,7	0,0	0,0	0,0
01/01/06	253,6	99,8	18,7	20,0	2,0	69,6	792,8	26,3	0,0	0,0	0,
01/02/06	246,5	102,6	16,9	21,0	4,0	83,5	793,8	23,9	0,0	0,0	0,0
01/03/06	253,2	125,7	16,5	22,9	8,1	79,1	794,2	22,0	0,0	0,0	1,2
01/04/06	292,5	233,7	16,3	24,1	8,9	80,4	795,2	20,6	0,0	0,0	2,1
01/05/06	298,2	345,2	16,7	25,1	10,1	76,9	795,2	20,2	0,0	0,0	34,2
01/06/06	190,9	489,9	16,6	23,3	10,1	76,7	795,7	19,7	0,0	0,0	187,4
01/07/06	152,5	523,4	15,6	26,1	12,2	85,9	795,7	19,2	0,0	0,0	289,7

La metodología de datos espaciales describe la distribución estadística de las temperaturas en el estado de Puebla durante el periodo junio 2005-2006. Las matrices de datos que se describen en el apartado anterior se introducen en el programa Surfer, el cual modeló una cartografía digital en 2-D y 3-D.

Resultados

Las condiciones geomorfológicas del estado de Puebla tienen mucho que ver en el comportamiento meteorológico tanto del Estado como de la ciudad de Puebla; se identificó que algunas zonas altamente pobladas e industrialmente importantes presentaban una anomalía en cuanto a su modelación térmica, es decir los contaminantes aeróbicos aumentan la medición de la temperatura. En la figura 1 se puede apreciar la digitalización a través del Surfer de la topografía del estado y ciudad de Puebla (círculo rojo), determinándose que los factores meteorológicos que afectan la región son: ondas tropicales u ondas del Este, ciclones tropicales y frentes fríos o invasión de aire polar.

En la identificación y análisis de las variables meteorológicas del estado de Puebla, se emplearon imágenes satelitales, así como el programa Surfer para la modelación final². Las imágenes utilizadas fueron del sistema digital HRPT y APT, con resolución de 1 km² por pixel, lo que nos permitió trabajar a una escala de 1:2,000,000. Para la región de estudio se utilizó una imagen satelital del sistema digital HRPT con resolución de 1 km² por pixel, una banda en el espectro visible con un rango de 0.55 a 0.90 μm a una escala de 1:2,000,000. La imagen de la figura 2 presenta un acercamiento del estado de Puebla con la siguiente interpretación:

- En color negro las zonas hidrológicas.
- Piso inferior (nubes bajas, color gris oscuro): altitud entre los 0 y 2 km. Tipo de nubes: estratos, nimbos, y estratocúmulus.

Cálculo del gradiente térmico. La constante solar es conocida como el flujo de la radiación solar en la alta atmósfera recibida sobre una superficie en forma perpendicular a la distancia media Tierra-Sol. La constante solar, S, para el Estado de Puebla se determina como:

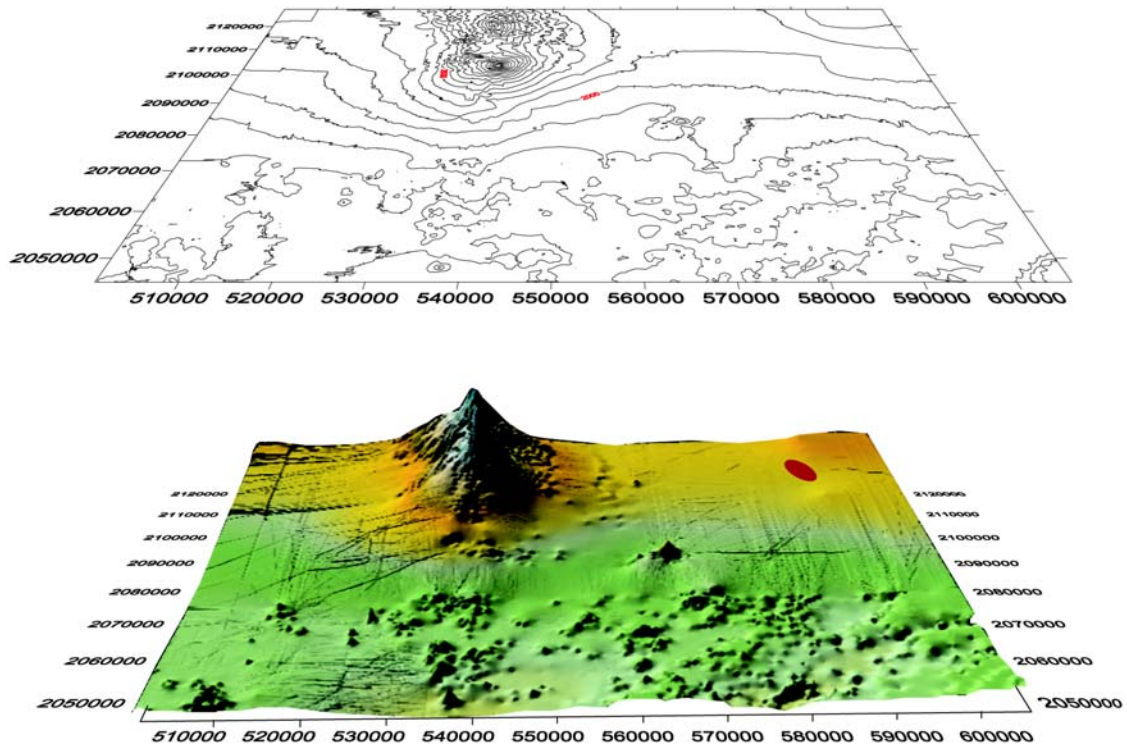


Fig. 1. Digitalización de la topografía del estado y ciudad de Puebla (círculo rojo)

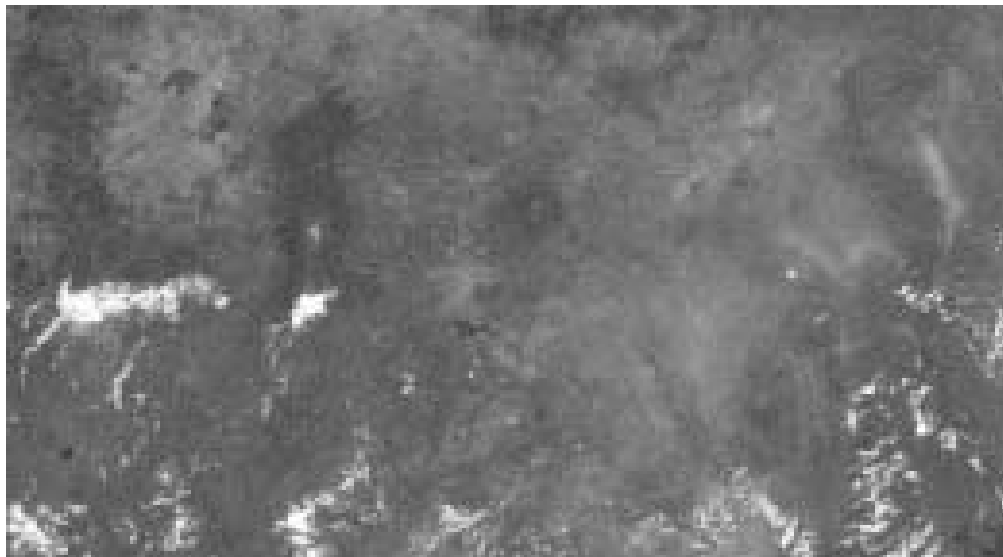


Figura 2. Imagen satelital del sistema digital HRPT

$$S = \frac{56 \times 10^{26} \text{ cal / min}}{4\pi(1,5 \times 10^{13} \text{ cm})^2} = 2,0 \text{ cal / cm}^2 \text{ min}$$

Donde:

- 56×10^{26} cal/min es la energía que el Sol irradia en su superficie, por su temperatura que es alrededor de $5,750 \text{ }^\circ\text{C}$.
- $1,5 \times 10^{13}$ cm es la distancia media Tierra-Sol.
- 1 Langley = $ly = 1 \text{ cal/cm}^2$

Si esta energía es uniformemente rociada sobre la superficie de la Tierra, la cantidad recibida por unidad de área y tiempo en la alta atmósfera es:

$$Q_s = \frac{S}{4} = 0,5 \text{ ly / min}$$

$a =$ radio terrestre = $6,37 \times 10^6$ m

La energía solar total interceptada por la tierra en unidad de tiempo es:

$$St = \pi a^2 S = 2,55 \times 10^{18} \text{ cal / min} = 3,67 \times 10^{21} \text{ cal / día}$$

La energía liberada por un ciclón sería $\sim 1 \times 10^3$ de k

La energía liberada por un huracán sería $\sim 1 \times 10^4$ de k

La energía liberada por una lluvia moderada sería $\sim 1 \times 10^8$ de k

Se considera la radiación solar que llega a la alta atmósfera como el 100%: 16% es absorbida por la atmósfera, 1% lo absorben las nubes; 26% lo absorbe la tierra como radiación directa, 14% como radiación difusa y 11% como radiación dispersa, el 25% es devuelta al espacio exterior por nubes y polvo y 7% reflejada por la superficie terrestre (albedo).

Estas cantidades varían de acuerdo al ángulo de incidencia de los rayos solares así como de la nubosidad, estación del año, latitud, etc. Suponiendo que se desea calcular la temperatura reducida de la Estación A, cuya altura es de 2320 m sobre el nivel del mar (recordemos que la altitud sobre el nivel del mar de la ciudad de Puebla es de 2162 m), y presenta una temperatura media anual de $16,4 \text{ }^\circ\text{C}$, se aplicará la siguiente fórmula:

$$T_R = (h \times gt) + t.$$

Donde:

- $T_R =$ Temperatura reducida
- $h =$ Altitud (metros)
- $gt =$ Gradiente térmico normal
- $t =$ Temperatura de la estación.

Sustituyendo los valores:

$$TR = (2320 \text{ m})(0,0065 \text{ }^\circ\text{C/m}) + 16,4 \text{ }^\circ\text{C} = 31,48 \text{ }^\circ\text{C}$$

Por lo tanto, $31,48 \text{ }^\circ\text{C}$ es la temperatura de la Estación A.

El valor del gradiente térmico se determinó de la modelación de los promedios de los valores máximos de las temperaturas (líneas en azul corresponden al año de 2005 y las rojas al 2006. (En la figura 3 las flechas indican la tendencia del movimiento térmico (color azul corresponden al año 2005 y las moradas al 2006). *El valor del gradiente térmico normal no se aplica cuando se trabaja con precisión en estudios regionales, por lo que a veces es necesario calcularlo. Para ello debe procederse de acuerdo al siguiente caso. (Ver figura 3)*

Si existe una Estación A, cuya altitud es de 2162 m, con una temperatura de $18,5 \text{ }^\circ\text{C}$, y una Estación B, a 2000 m y a $23,8 \text{ }^\circ\text{C}$ y se desea conocer el gradiente entre la Estación A y B, entonces se determina primero la diferencia de altura y temperatura entre ambas:

$$\begin{aligned} \text{Diferencia de altura} &= 2162 \text{ m} - 2000 \text{ m} = 162 \text{ m} \\ \text{Diferencia de temperatura} &= 23,8 \text{ }^\circ\text{C} - 18,5 \text{ }^\circ\text{C} = 5,3 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Esto indica que a 162 m la temperatura varía $5,3 \text{ }^\circ\text{C}$, por lo tanto en 1 m cambiará:

$$5,3 \text{ }^\circ\text{C} / 162 \text{ m} = 3,27 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C/m}.$$

El valor $0,0327 \text{ }^\circ\text{C/m}$ es el gradiente térmico entre las estaciones A y B.

Este dato nos sirve para calcular las temperaturas que se ubican entre los puntos A y B. Por ejemplo, si nos interesa conocer la temperatura del punto Z, localizado entre A y B, y del cual sólo sabemos que su altura es de 649 m:

Se determina la diferencia de altura entre A y Z (u opcionalmente, entre B y Z). Partiendo de A y Z tendremos:

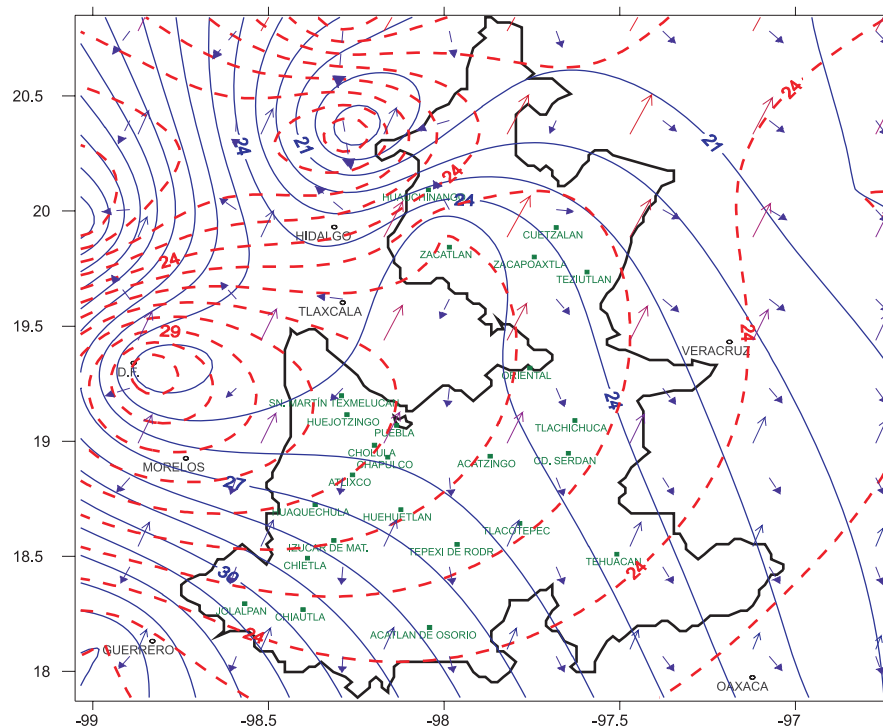


Figura 3. Valor del gradiente térmico

Diferencia de altura entre A y Z = $2162 - 649 = 1513$ m (nótese que se pasa de un lugar alto a uno bajo).

Si en un metro la temperatura varía $0,0327$ °C, en 1513 m se modificará:

$$1513 \text{ m} \times 0,0327 \text{ } ^\circ\text{C/m} = 49,47 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

A este valor se le suma la temperatura del punto A, debido a que se trata de un lugar más bajo, lo cual ocasiona que la temperatura sea mayor, dado que el calentamiento del aire es medido desde la superficie del suelo hacia arriba y la temperatura del aire disminuye con la altura.

La temperatura calculada con el gradiente del punto Z será:

$$18,5 \text{ } ^\circ\text{C} + 49,47 \text{ } ^\circ\text{C} = \mathbf{67,97 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Por lo tanto, el gradiente térmico normal para la ciudad de Puebla es: **GTN = 0,0065 °C/m**

Análisis georreferencial de la zona de estudio utilizando imágenes satelitales. Se digitalizó con coordenadas UTM el estado de y la ciudad de Puebla para correlacionar los da-

tos obtenidos del comportamiento de la curva de distribución de las temperaturas ambientales medidas de los datos obtenidos por la red de estaciones de monitoreo de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y las estaciones de la Red Estatal de Monitoreo Ambiental (REMA), durante el periodo junio 2005-2006⁵.

Se determinó que el clima que ha predominado en los últimos cinco años para el estado de Puebla es el templado subhúmedo (sh) con una gran cantidad de lluvias en verano, en otoño húmedo (h), en invierno de frío (f) a templado (t) y en primavera caluroso (c).

En la figura 4 se observa para la ciudad de Puebla las condiciones climáticas también se han visto alteradas, desde la primavera-verano con un clima subhúmedo (sh) y mayor humedad en el valle, hasta el otoño-invierno con un clima frío (f) y lluvias principalmente en las partes altas del municipio. Para el estado de Puebla en color negro se muestran las condiciones climáticas que imperaron durante el periodo de estudio, y

en color rojo las de la ciudad. Los puntos verdes representan los datos obtenidos de la estación

meteorológica automática de la Facultad de Ingeniería de la BUAP, CNA y REMA.

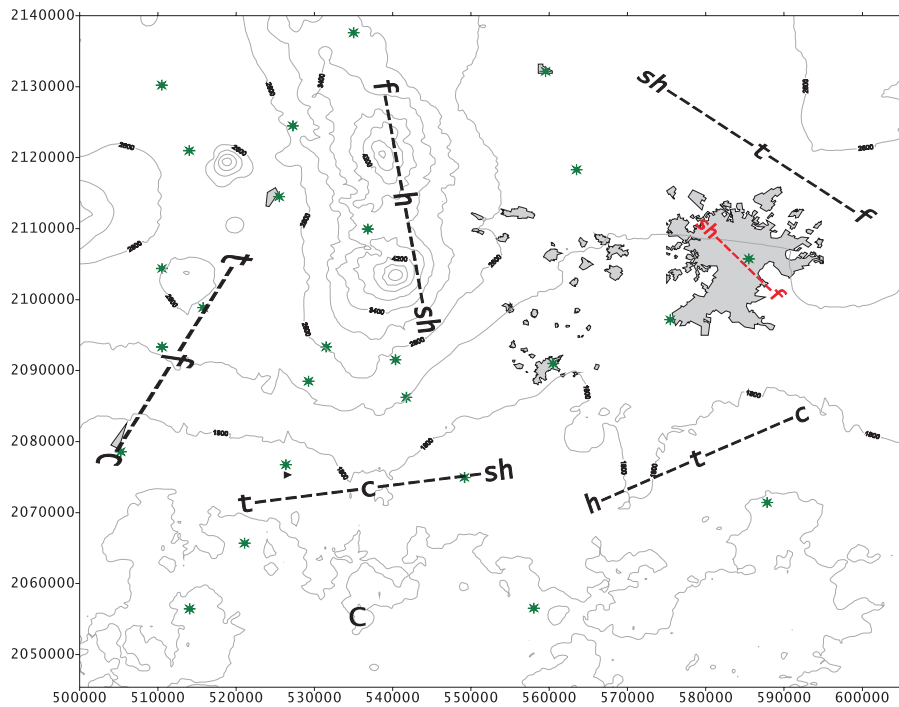


Figura 4. Condiciones climática para el estado de Puebla. Nomenclatura: subhúmedo (sh), húmedo (h), frío (f), templado (t) y caluroso (c).

La temperatura media anual máxima registrada fue de 27°C y la mínima de 12,81°C; la precipitación pluvial en promedio es de 885 mm.

Las características cartográficas son: escala 1:2.000.000, ancho de la imagen 2700 km, altura 920 km.

Las alteraciones climáticas observadas según las modelaciones y datos en el procesamiento de imágenes satelitales se deben a factores como altitud de la zona, vientos predominantes cambiantes durante el periodo de estudio y la acumulación aeróbica de partículas contaminantes en zonas de alta concentración industrial y automotriz y que son trasladadas hasta 90 km de distancia, lo que influye al crear una capa térmica y existiendo una relación clima-contaminación (figura 6).

La filtración y procesamiento de la imagen determinó que el color café claro representa zonas de puntos calientes de la de la relación clima-contaminación, lo que originó que la lectura tuviera de 1 a 2 °C de más en algunos puntos analizados.

Apreciamos en la figura 5 la imagen captada entre los 90° y 115° longitud oeste y 15° y 30° latitud norte en el canal 3 infrarrojo (IR), con una longitud de onda de 3,55-3,39 micrómetros (µm).

Interpretación de una imagen infrarroja sobrepuesta durante el periodo de estudio. La imagen infrarroja de capas es un mapa de temperaturas, en el que cada color indica un rango de temperaturas relacionado con un rango de altitudes de las nubes⁶. El radiómetro del satélite (comparado con el radiómetro de la estación meteorológica automática) coincidió con los ni-

veles de radiación, los cuales dependen de la temperatura del objeto radiante (suelo y nubes) y a estos niveles de radiación (clasificados por rangos) se les asignó un color. En la figura 6

vemos contornos de color blanco indican temperaturas de 20°C, el color amarillo temperaturas de 30°C y los colores rojo y negro temperaturas arriba de los 35°C.

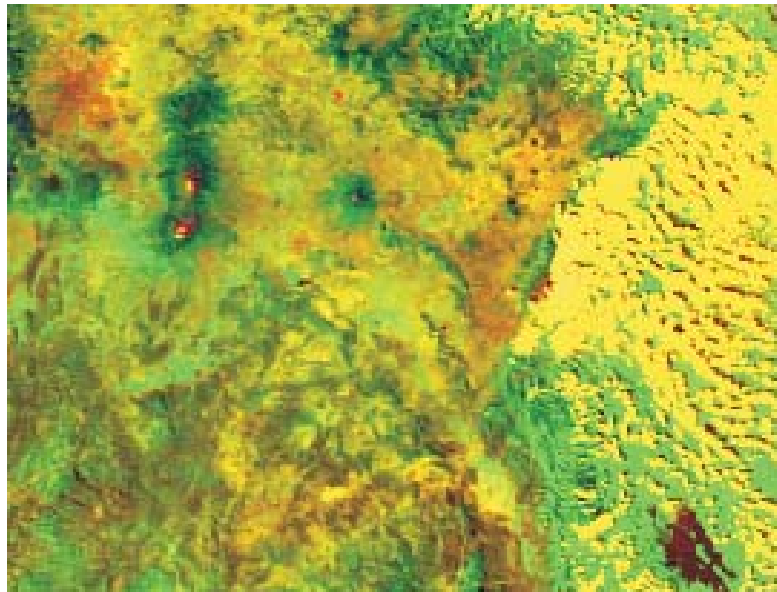


Figura 5. Imagen captada entre los 90° y 115° longitud oeste y 15° y 30° latitud norte.

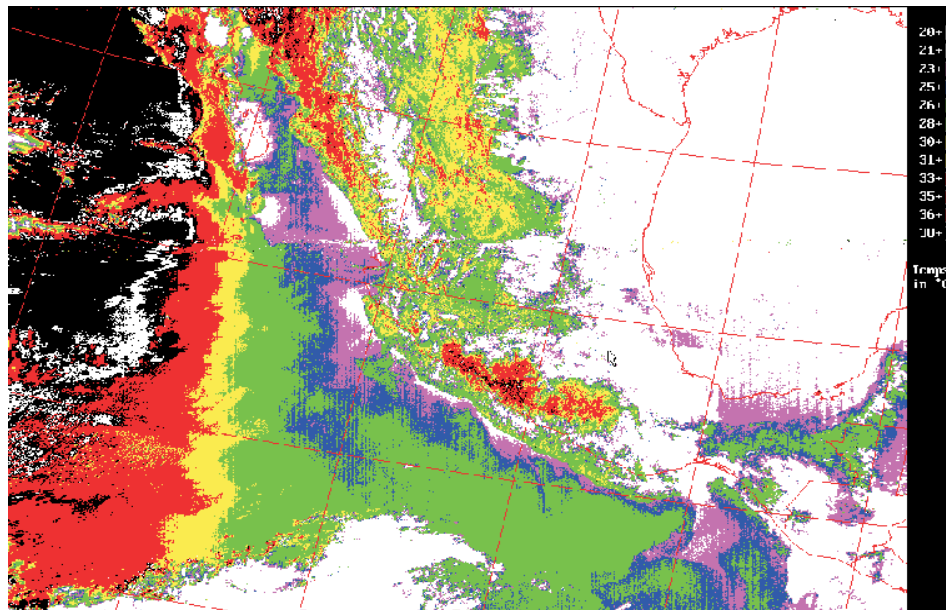


Figura 6. Mapa de temperaturas

Observando los diferentes colores y las formas de los contornos, se puede deducir las temperaturas del suelo, ambiente y los tipos de nubes (extensión vertical y horizontal).

El procesamiento de las imágenes satelitales en infrarrojo, nos sirvió para correlacionar las bases de datos del Cumulus con los datos de la imagen; pudiendo interpretar que en condiciones de buen tiempo las nubes se observan sobre las cordilleras y los valles toman un color negro que indica poca nubosidad y aumento de temperatura. En algunos casos se observan puntos rojos que indican cielo despejado y temperaturas mayores de 30°C.

Los datos de las imágenes procesadas con estación de recepción HRPT, han sido calculados a partir de un modelo estructural del Surfer.

Con el fin de reducir el número de dimensiones propias de las medidas multispectrales a una sola dimensión (cobertura meteorológica), se han definido los valores de radiación solar para el estado y ciudad de Puebla.

Basándose en la diferencia de reflectancia del suelo que nos muestra un 20% en la banda visible y un 60% en el infrarrojo cercano, el intervalo de valores obtenidos para la radiación solar en la zona norte del estado de Puebla fue máximo de 994,3 W/m² y mínimo de 99,8 W/m². (Ver figura 7).

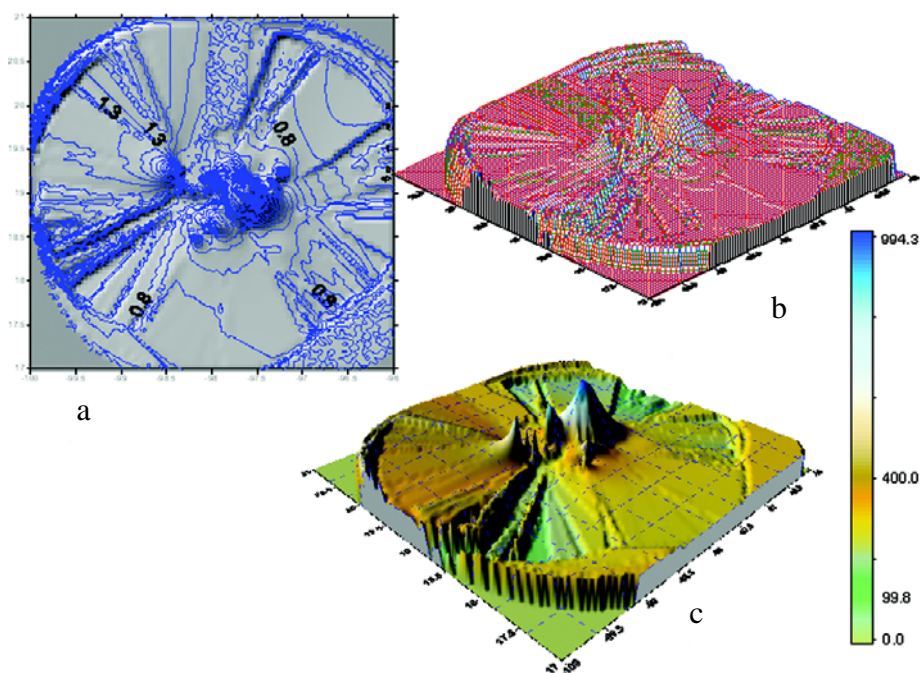


Figura 7. La digitalización con el Surfer en 2-D (a) y en el tejido de datos (b), muestra la radiación solar máxima en el norte del estado de Puebla durante el periodo de estudio con un valor máximo de 994.3 W/m²(c), la escala horizontal muestra el rango del valor en colores

Esta modelación nos llevará a la determinación de mapas de isotermas e isoyetas máximas y mínimas para el estado de Puebla en el periodo junio 2005-2006. La interpretación de la figura 8 es: líneas continuas (temperaturas máximas),

no continuas (temperaturas mínimas), despejado (des), medio nublado (mn), nublado (n), lluvia (lluv), con temperaturas para la Ciudad de Puebla: máxima entre 28,5 y 29,5 °C; mínima entre 11,5 y 12,5 °C.

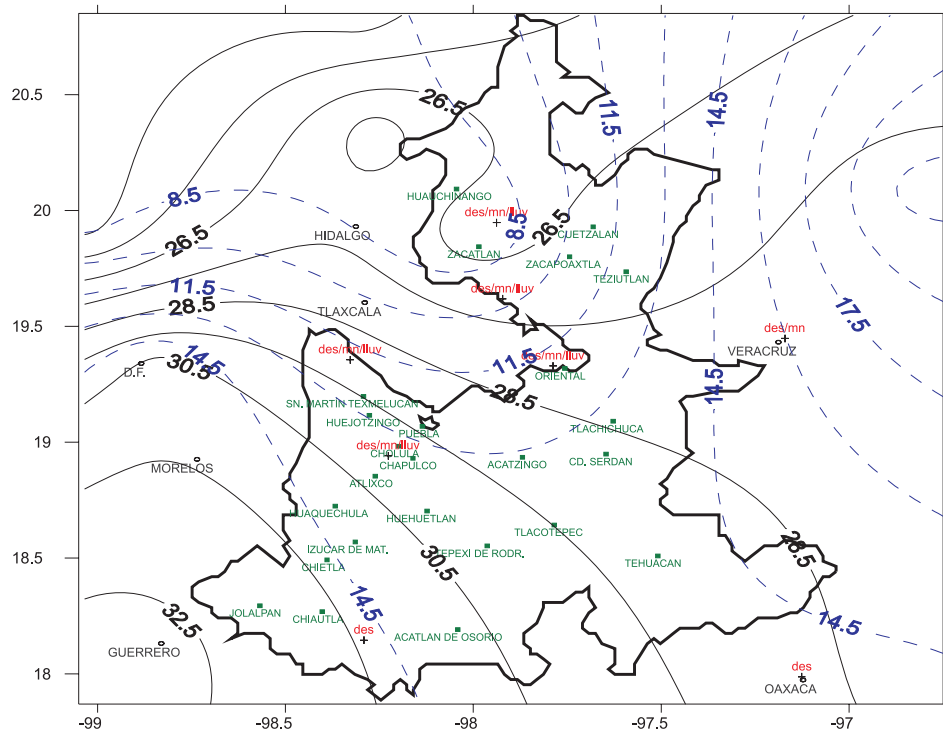


Figura 8. Modelación de las Isotermas máximas y mínimas para el estado de Puebla en el periodo junio 2005-2006.

Discusión

Este trabajo presenta los resultados obtenidos en la modelación estructural y estadística de las isolíneas meteorológicas, además del cálculo del gradiente térmico, mediante el análisis, identificación e información de las bases de datos obtenidas.

El estudio realizado nos ha permitido identificar las zonas de acumulación térmica (isotermas) y de precipitación (isoyetas), tanto máximas como mínimas; presentando durante el periodo de estudio para el estado de Puebla isoyetas promedio de 24 mm, isotermas máximas de 27 °C y mínimas de 12,7 °C (figura 10).

La hipótesis de este trabajo muestra que los datos de las redes de monitoreo ambiental de la Facultad de Ingeniería y del sistema HRPT, tienen diferentes características, ya que estos datos deberían tener un comportamiento similar de cada punto en el rango analizado.

Los resultados de la modelación para la ciudad de Puebla de isoyetas son de entre 19 y 31 mm, mismos que se aprecian en el mapa donde la acumulación de isolíneas tiene una tendencia hacia el noreste (figura 11).

La base de datos procesada y modelada nos da como resultado una serie de comparaciones entre el análisis estadístico y estructural, que nos sirvió para obtener el gradiente térmico de la ciudad de Puebla cuyo valor fue de 67,97 °C.

En resumen, al utilizar la base de datos del Cumulus, apoyados en imágenes HRPT y modelar los datos a través del programa Goeas y Surfer, se determinó tendencia de las variables durante un año y se obtuvo el comportamiento de la energía solar o radiación por mes, lo que nos indica las oscilaciones térmicas finales durante el periodo estudiado.

Referencias

1. RAMOS, R.. Ciencias Atmosféricas, un enfoque general. s.l. : UTP, 2003.
2. _____. et al. Aplicación de imágenes satelitales para determinar el clima y la radiación solar en el estado de Puebla y la geohidrología de su zona norte. México: Ciencia Ergo Sum, 2005.
3. GODMAN, P. Principles of Geographical Information Systems For Land Resources. United States: Springer, 2001.
4. HUERTA, A. Y RAMOS, R. Ciencias Atmosféricas. México: UTP, 2003. pp. 122-132.
5. Juárez, A, Gay, C. Flores, Y. Impact of the Popocatepetl's volcanic activity on the air quality of Puebla City, México: Atmósfera, 2005. p. 57-69.
6. LENNON, R. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. United States: Esa/Esrin, 2002.
7. SPIEGEL, M. R. Probabilidad y Estadística. s.l.: Mc. Graw Hill, 2000.