

MATEMÁTICAS, ESTADÍSTICA

Y MEDIO AMBIENTE

Editores:

Hortensia Josefina Reyes Cervantes

Manuel Ibarra Contreras

Nahun Israel Loya Monares

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas

2011



Matemáticas, estadística y medio ambiente.

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
Dirección General de Fomento Editorial
2011

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Enrique Agüera Ibañez

Rector

José Ramón Eguíbar Cuenca

Secretario General

Lilia Cedillo Ramírez

Vicerrectora de Extensión y Difusión de la Cultura

Carlos Contreras Cruz

Director Editorial

Primera edición, 2011

ISBN: 978-607-487-296-5

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Dirección de Fomento Editorial

2 Norte 1404, CP 72 000

Puebla, Pue.

Teléfono y fax 012222468559

Impreso y hecho en México
Printed and made in Mexico

Prólogo

La era del siglo XX trajo consigo el desarrollo intenso y exhaustivo de varias áreas del conocimiento así como su exitosa repercusión en las herramientas tecnológicas. El crecimiento demográfico ha sido y es un problema que llama la atención de varios sectores de la investigación, ya que tiene implicaciones que perturban el medio ambiente en sus ecosistemas, recursos naturales, clima, condiciones atmosféricas, composición química del suelo y agua, etcétera. Además de conocer la cantidad de procesos que ocurren en un sistema biológico, químico o físico, resulta necesario establecer políticas socio-ambientales que involucren a las poblaciones en la solución de este problema que, al transcurrir el tiempo, podría poner en peligro la existencia de algún tipo de vida.

En el contexto anterior, se organizó el “Primer Encuentro Internacional del Medio Ambiente” a finales del año 2010, y fue al término de éste cuando se decidió escribir un libro de carácter multidisciplinario: “Matemáticas, Estadística y Medio Ambiente”. Se invitó a investigadores de diferentes áreas, tales como Biología, Matemáticas, Química, Estadística y Ciencias de la Atmósfera, a que expusieran los avances metodológicos en el estudio de causas y consecuencias de fenómenos provocados por la urbanización y así poder llegar a comprender de una mejor manera los mecanismos que operan en el cambio de los sistemas naturales, que permitan arrojar soluciones más amplias y bien fundamentadas.

Estamos convencidos que publicaciones como la presente también contribuyen a tener una perspectiva académica más amplia. Aquí se presentan trabajos para evaluar y estimar procedimientos realizados sobre algún tema de contaminación. Todos ellos fueron sometidos a un arbitraje riguroso para garantizar la calidad de la publicación. Agradecemos a todos los autores su participación y a los revisores el tiempo y la disposición que mostraron para que esta obra fuera llevada a feliz término. Esperamos sea de interés para diferentes lectores de diversas áreas del conocimiento.

**Manuel Ibarra,
Nahun Loya y
Hortensia Reyes.**

Índice

1	Cambio climático y su influencia en la calidad del aire del centro de México.	1
	JOSE AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO	
2	Estudio de índices de biodiversidad: el modelo superpoblacional multinomial.	9
	DANTE COVARRUBIAS MELGAR	
3	Estudio de valores extremos ingresando covariables en el parámetro de forma.	19
	SARA RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ	
4	Modelamiento de dispersión de cinco contaminantes en la atmósfera emitidos por dos parques industriales poblanos.	29
	ROBERTO CARLOS SÁNCHEZ TORRES	
5	Modelo de la dinámica de carbono en suelos de sistemas agroforestales.	47
	GUSTAVO ORELLANA RIVADENEYRA	
6	Modelos probabilístico de predicción para variables atmosféricas usando el método de perturbación geoestadístico y modelos jerárquicos Bayesianos de tiempo y espacio.	57
	LILIA LETICIA RAMÍREZ RAMÍREZ	
7	Muestreo por conjuntos ordenados (Ranked Set Sampling) y su aplicación en población de maguey silvestre.	67
	LORENA ALONSO GUZMÁN	
8	Predictores de las concentraciones de manganeso en interiores de viviendas en dos comunidades rurales de un distrito manganesífero, Hidalgo, México.	77
	MARLENE CORTEZ LUGO	
9	Procesos de Poisson no-homogéneos aplicados a ozono usando covariables químicas y atmosféricas.	85
	NAHUN ISRAEL LOYA MONARES	
10	¿Qué podemos hacer ante el cambio climático global? El caso del Estado de Puebla.	95
	APOLONIO JUÁREZ NÚÑEZ	
11	Selección Bayesiana de Variables para la Construcción de un Modelo de Regresión.	107
	ARTURO ABRAHAM LÓPEZ PÉREZ	

12 El Impacto social y ambiental en la producción de energía eléctrica en La Ventosa, Oaxaca.	117
URSULA MARÍA DEL CARMEN FAJARDO AGUAYO	
13 Especies arbóreas como recurso energético de uso doméstico, en Santo Domingo Huehuetlán el Grande, Puebla.	129
ANA LAURA GARCÍA FRAGOSO	

Cambio Climático y su Influencia en la Calidad del Aire del Centro de México

García Reynoso, J. A.¹

Caetano, E.¹

Cruz-Pastrana, D.¹

Suárez-Lastra, M.²

Ruiz Suárez, L.G.¹

y Jazcilevich, A.¹

¹ Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM,

² Instituto de Geografía, UNAM. *Centro de Ciencias de la Atmósfera,*

Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.

*e-mail:*¹*agustin@atmosfera.unam.mx*

Resumen

Se presentan los resultados de los efectos del cambio regional del clima y, de la calidad del aire sobre la región centro de México utilizando la técnica de reducción de escala dinámica (dynamical downscaling). La región de estudio abarca la corona regional de las ciudades de México, Toluca, Cuernavaca, Puebla, Tlaxcala, Pachuca. En la evaluación se emplearon proyecciones de población y las variables de temperatura y precipitación en la determinación de los efectos en el cambio regional del clima y calidad del aire. Se determinó la depositación de contaminantes, exposición potencial, severidad, persistencia, intensidad de episodios e índices de riesgo.

Palabras clave: cambio climático, calidad del aire, México.

1. Introducción

Dos de los aspectos ambientales más importantes que han emergido recientemente son el cambio climático y la calidad del aire en escalas regionales y globales. Se ha observado e identificado el calentamiento global, y los cambios a futuro de éste pueden degradar la calidad del aire regional, y a su vez la contaminación atmosférica puede contribuir al cambio climático [5]. Ambos aspectos ambientales se encuentran interrelacionados mediante procesos físicos y químicos. Las variaciones en el clima pueden modificar los parámetros meteorológicos (p.e. temperatura, humedad, mezclado vertical, etc.) que pueden influir en las emisiones antropogénicas y biogénicas, estas emisiones influyen en la calidad del aire que a

su vez pueden generar partículas y gases que interviene en los procesos radiactivos que controlan el clima.

Por lo anterior es importante conocer cual es la influencia del cambio climático en la calidad del aire en el centro de México, para estudiar este efecto se empleó un modelo acoplado de meteorología y química atmosférica [4]. Los resultados muestran la interrelación que existe entre la meteorología y la calidad del aire, así como la influencia de la temperatura en la reactividad atmosférica. Los índices de riesgo, la extensión y severidad son empleados para observar las diferencias entre los resultados de manera objetiva.

2. Desarrollo del trabajo.

Mediante la información meteorológica producida en la reducción de escala dinámica de escenarios de cambio climático, y con el inventario de emisiones para la región centro de México se determinó la calidad del aire en la región para el escenario A2. Para ello se aplicó el modelo MCCM, [4] éste es un modelo que acopla directamente los procesos meteorológicos y químicos, incluye la química de fase gaseosa, la depositación, emisiones antropogénicas y biogénicas, incorpora una descripción explícita de los procesos de precipitación y nubes, posee la capacidad de múltiples anidamientos, es aplicable en arquitecturas computacionales en paralelo. MCCM posee dos mecanismos detallados de la fase gaseosa conocidos como RADM2 y RACM [7] con 39 y 47 especies químicas respectivamente y se incluye las partículas (PM10) como un trazador pasivo. En asociación con la química de la fase gaseosa se encuentran los sub-modelos que contienen 21 y 23 frecuencias de fotólisis y se calculan de acuerdo a la cobertura de nubes, ozono, temperatura y presión en la atmósfera del modelo. Las emisiones biogénicas se calculan con base en los datos de uso de suelo, temperatura superficial y radiación. El modelo calcula simultáneamente los cambios meteorológicos y químicos en el dominio del modelo y genera las distribuciones tridimensionales dependientes del tiempo de las principales especies orgánicas e inorgánicas relevantes a la formación de oxidantes. Una ventaja del acoplamiento en línea de la meteorología y la química es que provee resultados consistentes sin la interpolación de datos en contraste con modelos no acoplados de química y transporte. Este modelo posee un desempeño aceptable para reproducir el fenómeno de la calidad del aire en la región.

Los escenarios generados fueron el de climatología del período de 1983 a 1990 y el escenario de cambio climático abarca de 2071 a 2079. Sólo se presentan los resultados para el mes de abril que es representativo de secas caliente y en el que se han medido los máximos de ozono en los años recientes, para observar sólo la influencia del cambio de temperatura se realizaron tres ejercicios, el primero considerando las emisiones, zonas urbanas y población fija para el 2005 con la climatología de 1980, en el segundo se cambió la climatología para el período 2070 y

en el tercer ejercicio adicionalmente se actualizaron las emisiones, la distribución urbana y densidad de población para el año 2020 y se empleó la climatología del 2070. De la información generada se realizaron las comparaciones de temperatura, altura de capa de mezcla y concentraciones. Una descripción mas detallada del procedimiento, los modelos empleados y el análisis de resultados se puede encontrar en [1] y en [2]. En el modelo MCCM se ajustaron los valores de fondo de las concentraciones de los gases de efecto invernadero como se muestra en el Cuadro 1. La distribución de la mancha urbana, emisiones y población en el dominio se proyecto para los caos de los años en el futuro.

Cuadro 1: Concentraciones empleadas en los experimentos.

	CO ₂ ppm	CH ₄ ppb	N ₂ O pbb	CFC-F11 ppb	CFC-F12 ppt
Climatico 1980	347.9	1670	307	228.9	401.4
Escenario 2070	645.1	3555	416	82.5	316.8

En la Figura 1 se observa la distribución de las emisiones de monóxido de carbono (CO) y el dominio de empleado para la modelación. En ese mismo dominio se tiene la distribución de la población, el tipo de uso de suelo y los datos de elevación.

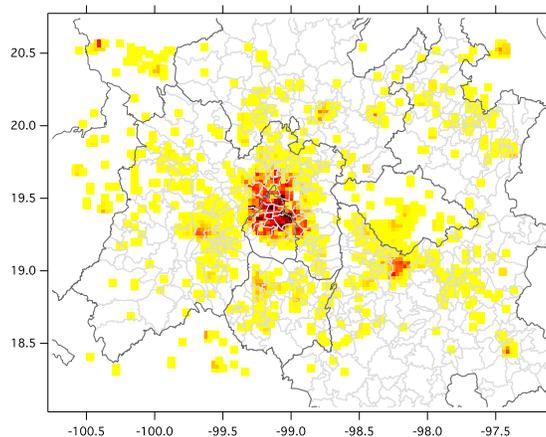


Figura 1: Dominio de modelación y distribución de emisiones de CO (u.a)

De los resultados de las modelaciones de calidad del se generan las distribuciones de frecuencias para temperatura, altura de mezclado y concentración promedio horaria de ozono, de la misma forma se calcularon la media, la desviación

típica, el mínimo y máximo para comparar cualitativamente ambos escenarios.

Con el objeto de hacer una comparación objetivas del efecto de los gases criterio, y poder hacer el estudio comparativo se calculan tres métricas, [3]: extensión, severidad y exposición potencial integrada de la población, empleado los resultados de las mallas generadoras por el modelo.

DEFINICIÓN 2.1 *Extensión E_{c^*} suma los elementos de malla que durante el episodio han sobrepasado la norma de contaminación para cada gas y se calcula mediante la fórmula:*

$$E_{c^*} = \sum_{n=1}^m N_{c^*,n} \quad (1)$$

donde $N_{c^*,n}$ es el número de celdas que exceden una concentración c^* , durante m horas de duración del episodio.

DEFINICIÓN 2.2 *Severidad S suma las veces que las concentraciones de un gas criterio han sobrepasado la norma ambiental y se calcula mediante el siguiente procedimiento:*

$$S = \sum_{n=1}^m \sum_{i,j} c_{i,j,n} H_{i,j}(c^*) \quad (2)$$

donde

$$H_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si } c_{i,j} > c^* \\ 0 & \text{si } c_{i,j} < c^* \end{cases} \quad (3)$$

y $c_{i,j,n}$ es la concentración en la celda i,j al tiempo n . Las unidades son las correspondientes al gas criterio.

DEFINICIÓN 2.3 *Exposición potencial integrada Ψ cuantifica la magnitud de la exposición en tiempo y espacio, incorporando el tamaño de la población potencialmente expuesta a niveles no saludables de algún gas criterio y se calcula mediante la fórmula:*

$$\Psi = \frac{\sum_{n=1}^m \sum_{i,j} \bar{\omega}_{i,j,n} c_{i,j}}{m \bar{\omega}_{max}} \quad (4)$$

donde $\bar{\omega}_{i,j,n}$ es la población en la celda i,j y $\bar{\omega}_{max}$ es la población máxima en la región de estudio.

Mientras mayor sea el valor de estas métricas, pero será la calidad del aire. Las normas de concentración que se utilizaron fueron las normas ambientales mexicanas. Así se tiene que para el ozono (O_3) la norma horaria usada fue de 0.11 ppm.

2.1. Resultados

En la Figura 2 se observa la diferencia entre las distribuciones de temperatura para ambos experimentos, se observa que para el caso de 1980 se tiene valores de temperatura menores que en el caso de los años 2070. Para la altura de capa de

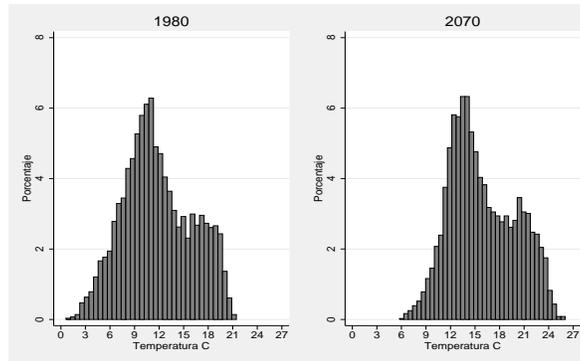


Figura 2: Distribuciones de temperaturas

mezclado ocurre algo similar, en el caso de escenario futuro se encuentra que la distribución se desplaza hacia alturas de mezclado mayores ver Figura 3.

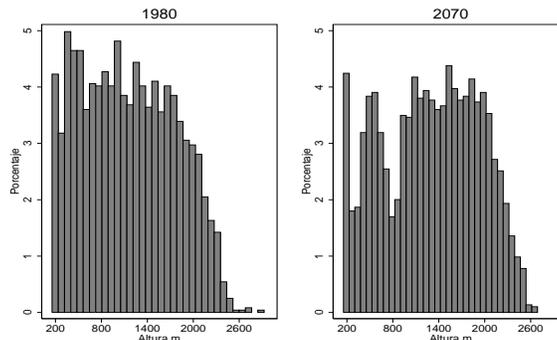


Figura 3: Distribuciones de alturas de capa de mezclado

Lo anterior ocasiona que se tenga mayor volumen disponible para la dilución de contaminantes por lo que el ozono disminuye en el caso de escenario con temperaturas y alturas de mezclado mayores como se muestra en la Figura 4.

Parámetros estadísticos para la altura de capa de mezclado (ACM), temperatura (T) y concentración de ozono (O_3) ppb se presentan en el Cuadro 2. Donde

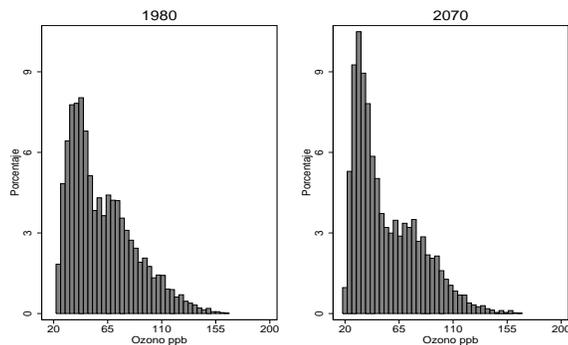


Figura 4: Distribuciones de concentración de ozono

se confirma lo observado con las distribuciones. La comparación de ambos periodos

Cuadro 2: Estadísticos de las variables estudiadas.

	Prom.	σ	Min.	Máx.
ACM 1980	579	850	0	3,970
ACM 2070	648	931	0	3,516
T 1980	13.6	5	0.6	25.1
T 2070	18.0	4.9	5.9	29.5
O ₃ 1980	42	46.1	0.2	221
O ₃ 2070	39.1	43.1	0.1	245

con las métricas de riesgo se observan en el Cuadro 3 en ésta se presenta sólo para el área urbana de la ciudad de México en dicho Cuadro donde se observa que en todos los casos los valores se disminuyen en los episodios influenciados por el incremento de temperatura. El que se tengan una temperatura mayor induce un mezclado en la vertical mas intenso por lo que se disminuyen las concentraciones de contaminantes haciendo que en un escenario mas caliente se tenga en promedio concentraciones menores pero con máximos de ozono mayores, como se observa en el Cuadro 2. Cabe aclarar que las emisiones de compuestos biogénicos son diferentes ya que estas depende de la temperatura.

3. Conclusiones

Mediante la modelación de la calidad de aire se pudo conocer la influencia del incremento de temperatura en la calidad del aire en la región centro de México,

Cuadro 3: Comparación de la exposición, extensión y severidad.

	1980	2070
Exposición	0.33	0.314
Extensión	17.9	14.2
Severidad	24.0	18.4

observándose, que para el caso estudiado, un decremento en los niveles de ozono en períodos más con temperaturas mayores lo anterior es debido a que esto induce un incremento en la altura de la capa de mezclado, teniendo se así una mayor dilución, aunque el valor máximo de concentración de ozono en el caso mas cálido es el mayor que en el caso base.

Adicionalmente al evaluar la exposición potencial, severidad y extensión de ambos períodos se observa que se tienen valores menores y favorables para el caso del escenario 2070.

Agradecimientos:

Este proyecto fue parcialmente financiado por el SEMARNAT- CONACYT 23496, y con el apoyo de DGSCA-Kambalam.

Referencias

- [1] Cruz-Pastrana, D. *Comunicación personal*.
- [2] García Reynoso, J. A., Caetano, E., Cruz-Pastrana, D., Suárez-Lastra, M. y Ruiz Suárez, L.G. *Climate Change Influence in Air Quality in Central Mexico* Geophysical Research Abstracts Vol. 12, EGU2010-14087, 2010 EGU General Assembly 2010
- [3] Georgopoulos, P. G., Arunachalam, S., 1997. Alternative Metrics for Assessing the Relative Effectiveness of NO_x and VOC Emission Reductions in Controlling Ground-level Ozone. *Journal of the Air and Waste Management Association* 47, 383–850.
- [4] Grell, G.A., Emeis, S., Stockwell, W.R., Schoenemeyer, T., Forkel, R., Michalakes, J., Knoche, R., Seidl, W. *Application of a multiscale, coupled MM5/chemistry model to the complex terrain of the VOTALP valley campaign* Atmospheric Environment, 34 (9), Pages 1435-1453 2000
- [5] IPCC, 2007. *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change*, 4 volumes, http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.htm#1, Última visita 29 octubre 2010.

- [6] Tao, W.-K. and J. Simpson, *The Goddard Cumulus Ensemble Model. Part I: Model description*. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 4, 19-54, 1993
- [7] Stockwell W.R., Middleton R.P., Chang J.S. and Tang X. *The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling*. Journal of Geophysical Research 95, 16343-16367. 1990
- [8] Tao, W.-K. and J. Simpson, *The Goddard Cumulus Ensemble Model. Part I: Model description*. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 4, 19-54, 1993
- [9] Tao, W.-K., *Goddard Cumulus Ensemble (GCE) model: Application for understanding precipitation processes*, AMS Monographs - Cloud Systems, Hurricanes and TRMM. 103-138, 2003

Estudio de índices de biodiversidad: el modelo superpoblacional multinomial

Carlos Bouza Herrera¹

Dante Covarrubias Melgar²

¹ Universidad de la Habana

²Unidad Académica de Matemáticas, UAGRO.

Av. Lázaro Cárdenas S/N, C.U. Chilpancingo, Gro., México

e-mail:bouza@matcom.uh.com,dcova@uagro.mx

Resumen

La diversidad es una característica importante en las comunidades, y por lo general está relacionada con otras propiedades, así como a su estabilidad y las condiciones ambientales a que está expuesta, por lo que en este trabajo se analiza como la distribución de Dirichlet describe modelos superpoblacionales Multinomiales al usar los índices de biodiversidad de Simpson y Fager, aplicados a la comunidad ecológica, lo que permite evitar la toma de muestras aleatorias y la representatividad se da por los criterios asociados al modelo, esto permite simular el comportamiento de los estimadores en la comunidad. Para el estudio de los índices se realiza un estudio numérico con fines ilustrativos usando una simulación con datos de la investigación desarrollada en la Sierra de Guerrero, México, en la cual se mide la diversidad de especies encontrada en dicho lugar.

Palabras clave: modelo superpoblacional, varianza esperada, Simpson, Fager, comunidad ecológica.

1. Introducción

En el estudio de la biodiversidad podemos usar diversos enfoques. Ellos se asocian a varios requerimientos básicos a tomar en cuenta al planear la recolección de datos. El enfoque experimental por su parte es activo respecto a la adaptación del manejo. En el se hacen experiencias bajo diferentes tratamientos para desarrollar comparaciones entre ellos. El uso de modelos para hacer la inferencia permite escapar de la necesidad de tomar muestras aleatorias. La representatividad viene dada por criterios asociados al modelo asumido como generador de las variables o de la medida de biodiversidad. Existen diversas medidas para caracterizar la

biodiversidad; muchas de ellas no tienen un diseño o tratamiento estadístico debido al hecho mismo de que fueron propuestas sin tomar en cuenta el uso de estudios estadísticos, pensando en hacer inferencias. Los ecólogos, comúnmente usan medidas para caracterizar la biodiversidad y evaluar la resistencia de los ecosistemas. Su disminución indica la atención sobre el stress medio ambiental del mismo. La diversidad es evaluada mediante un sin número de medidas, propuestas puntualmente por ecólogos, ejemplo de esto se observa en Magurran [8].

2. Metodología

En este trabajo se investiga sobre el ajuste de los índices de Simpson y Fager mediante modelos superpoblaciones Binomiales. Se analizan los datos, mediante simulación, utilizando el método de Monte Carlo de la investigación desarrollada en la Sierra de Guerrero.

3. Los Modelos

Es usual enfrentar la necesidad de caracterizar la comunidad vegetal en áreas o superficies muy grandes. Kepton (2002), (visto en Bouza y Covarrubias [2]) discute como las medidas de diversidad deben ser estudiadas a partir de decisiones. Por ello es muy necesario él desarrolla estudios empíricos sobre el desempeño de estimadores muestrales. Simpson [10], propuso un índice de biodiversidad, Fager [6] propuso otro índice que se basa en rangos. Bouza y Covarrubias [2] y [3] estudiaron estos índices utilizando el marco teórico de muestreo de poblaciones finitas.

El modelo básico de la teoría del muestreo se asocia a la búsqueda de una medida de probabilidad llamada diseño muestral. Esto permite seleccionar una muestra aleatoria de una población finita $\{1, \dots, N\}$ al asignarle la probabilidad $d(s)$, la estimación parte de considerar la existencia de una variable Y la que al evaluarse en todo $i \in U$ determina un vector:

$$Y(U) = (Y_1, \dots, Y_N)^T.$$

Sea s la muestra seleccionada. En la selección de un sitio de muestreo usamos un modelo probabilístico caracterizado por las variables aleatorias independientes con distribución Bernoulli de parámetro π_i :

$$I(j | s) = \begin{cases} 1, & \text{si } j \in U_i \\ 0, & \text{si } j \notin U_i \end{cases}$$

donde $E(I(j/i)) = \pi$

Para todo $i = 1, \dots, K$ y $j = 1, \dots, n$.

Un enfoque que puede ser utilizado en este contexto es el de Superpoblación. Este considera que $Y(U)$ es generado por un mecanismo aleatorio Π que es caracterizado por una distribución a priori perteneciente a una clase $\Phi = \{\phi\}$. Nos va a interesar determinar relaciones estructurales entre esperanzas de funciones de las variables conocidas. Esto permite simular el comportamiento de las estrategias a partir de calcular las esperanzas de los errores de muestreo de las estrategias, esto es:

$$E[ECM_d(\theta^*)].$$

Un modelo superpoblacional suficientemente general se encuentra en Chaudhuri y Stenger [5] es:

$$\Pi = E_{\Pi}(Y_i) = \mu_i, V_{\Pi}(Y_i) = \sigma_i^2 \text{ y } C_{\Pi}(Y_i Y_j) = \rho \sigma_i \sigma_j$$

Los parámetros envueltos son desconocidos en general. Se considera en ocasiones la existencia de una variable auxiliar X , conocida para todo $i \in U$. Los parámetros superpoblacionales son descritos por un modelo que depende de X . Es muy util considerar que $\mu_i = \alpha_i + \beta X_i + \varepsilon_i$, donde α_i y β pueden ser conocidos o no pero X_1, \dots, X_N si lo es.

El índice de biodiversidad de Simpson es:

$$\lambda_{Simp} = 1 - \sum_{i=1}^K \left(\frac{n_i}{n}\right)^2$$

Al utilizar el método de la substitución tendremos como su estimador a

$$\hat{\lambda}_{Simp} = 1 - \sum_{i=1}^K \left(\frac{n_i}{n}\right)^2$$

Su sesgo es:

$$bias(\hat{\lambda}_{Simp}) = - \sum_{i=1}^K \frac{\pi_i(1 - \pi_i)}{n}$$

Al hacer una corrección del estimador se obtiene el estimador insesgado:

$$L_s = 1 - \sum_{i=1}^K \frac{n_i(n_i - 1)}{n(n - 1)}$$

cuya varianza es:

$$V\{L_s\} = \frac{2}{n(n-1)} \left\{ \left[\sum_{i=1}^k \pi_i^2 + 2(n-2)\pi_i^3 \right] - (2n-3) \left(\sum_{i=1}^k \pi_i^2 \right)^2 \right\}$$

Ver Bouza y Covarrubias [3].

Tomando el vector paramétrico $\pi(U) = (\pi_1, \dots, \pi_K)^T$ como aleatorio al considerar el MSP

$$\begin{aligned} \varphi : E_\varphi(\pi_i) &= \theta_i, V_\varphi(\pi_i) = \sigma_i^2, \forall i, i' = 1, \dots, K; \\ Cov_\varphi(\pi_i, \pi_{i'}) &= \rho\sigma_i\sigma_{i'} = \sigma_{ii'}, \forall i \neq i', i, i' = 1, \dots, K. \end{aligned}$$

Note que estos supuestos nos permiten utilizar los resultados asociados a los momentos de una Multinomial. Se tiene dos predictores alternativos.

El separado para el índice de Simpson está definido como

$$L_{ss} = \sum_{j=1}^m \frac{L_{sj}}{m}$$

El estimador combinado

$$L_{sc} = 1 - \sum_{i=1}^k \frac{n_i^*(n_i^* - 1)}{n^*(n^* - 1)}$$

también es insesgado, ver Bouza y Covarrubias [3]. La varianzas esperadas aproximadamente son:

$$E_\varphi V \{L_{sc}|B\} \cong \left\{ \frac{2}{n^*(n^* - 1)} [(2n^* - 4) \sum_{i=1}^k \theta_i^3] \right\} - (2n^* - 3) \left(\sum_{i=1}^k \theta_i^2 \right)$$

$$E_\varphi V \{L_{sc}|B\} \cong \frac{1}{m^2} \sum_{j=1}^m A(j) - B(j)$$

Siendo

$$A(j) = \frac{2}{n(j)(n(j) - 1)} [(2n(j) - 4) \sum_{i=1}^k \theta_i^3]$$

$$B(j) = \frac{2}{n(j)(n(j) - 1)} [(2n(j) - 3) \left(\sum_{i=1}^k \theta_i^2 \right)^2]$$

Bouza y Schubert [4] y Bouza y Covarrubias [2] han estudiado el índice de biodiversidad debido a Fager [6]. Este es definido como:

$$\lambda_F^* = [N(K + 1) - J(K - J)]/2 - \sum_{i=1}^K N_i R_i$$

donde $J \in [0, K)$ es un entero y R_1, \dots, R_K son rangos asignados a las especies de interés en orden decreciente de importancia.

Considerando que la población está estratificada de acuerdo a $U = U_1 + \dots + U_K$, donde U_i es el conjunto de individuos de la especie i en la comunidad. N_i denota el número individuos de la especie i por lo que $N = N_1 + \dots + N_K$.

El modelo usual considera que se selecciona un sitio aleatoriamente y se mide n_1, \dots, n_K .

Sean las variables aleatorias independientes con distribución Bernoulli:

$$I(j|i) = \begin{cases} 1, & sij \in U_i \\ 0, & sij \notin U_i \end{cases}$$

Su suma en j, n_j , es el número de individuos de U_i en el sitio muestreado y su distribución conjunta es una Multinomial. Fager [6] asumió que $R_i = Rank(N_i)$ es fijado por el ecólogo de antemano. Entonces su estimador es

$$L_F = \lambda_0 - \sum_1^K p_i R_i$$

y bajo el modelo

$$E_{\varphi} V(L_F(S)) = m^{-2} \sum_{s(t) \in \mathcal{C}} \left[\sum_{i=1}^K R_i^2 \theta_i (1 - \theta_i) - \left(\sum_{i \neq i'} R_i R_{i'} \sigma_{ii'} + \sum_{i=1}^K R_i^2 \sigma_i^2 \right) / n(t) \right]$$

$$E_{\varphi}V(L_F(C)) = \left[\sum_{i=1}^K R_i^2 \theta_i (1 - \theta_i) - \left(\sum_{i \neq i'} R_i R_{i'} \sigma_{ii'} + \sum_{i=1}^K R_i^2 \sigma_i^2 \right) \right] / n^*$$

4. Comparación de los Estimadores

La base de datos proporcionada forma parte de la investigación Ordenamiento Ecológico Territorial desarrollada en la subcuenca del río San Juan al norte del Estado de Guerrero, México. Esta Investigación financiada por el SIBEJ Sistema de Investigación Benito Juárez, ver Almazán [1]. Para generar la base de datos de este trabajo, se registraron las especies con un número de individuos mayor de 9, de esta manera la población artificial quedó conformada por los 60 sitios y 820 individuos clasificados en 66 especies.

Los datos tomados son usados para determinar valores hipotéticos de los parámetros superpoblacionales en cada sitio. Los rangos son los fijados en la investigación. Se generaron $H = 1000$ muestras de tamaño 500 se reconstruyó la base de datos como una muestra generada por esos parámetros superpoblacionales. Los resultados obtenidos se brindan en la Tabla 1. Se calcularon las precisiones relativas, mediante la siguiente fórmula:

$$\tau(AB) = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H \frac{L_{AB(h)}}{\sqrt{E_{\varphi}V\{L_A\}}}, A = S, F \quad B = C, S$$

Al generar 1000 muestras, se calcularon los estimadores de la Tabla 1.

Indice	Combinado	Separado
Simpson	31668	64477
Fager	20381	47629

Tabla 1: Precisiones relativas de los estimadores bajo el modelo superpoblacional

Note el estimador de Fager es el más preciso y el combinado el mejor criterio de condensación. En cada realización de la naturaleza se genera una muestra $\vec{\tau}/\vec{n} = (n_1, \dots, n_K)/n$.

La distribución de Dirichlet $\text{Dir}(\alpha), \alpha \in \mathbb{R}^K$, es usada como la conjugada de la distribución multinomial. Esta es utilizada en los estudios Bayesianos. Las probabilidades envueltas π_i/s en la descripción de los índices de Simpson y Fager son generadas mediante esta distribución cuya densidad es:

$$f(\pi_1, \dots, \pi_K | \alpha_1, \dots, \alpha_K) = \begin{cases} \frac{\prod_{i=1}^K \pi_i^{\alpha_i - 1}}{\beta(\alpha_1, \dots, \alpha_K)}, & \text{para todo } i = 1, \dots, K \pi_i > 0 \text{ y } \sum_{i=1}^K \pi_i = 1 \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$\text{donde } \beta(\alpha_1, \dots, \alpha_K) = \frac{\prod_{i=1}^K \Gamma(\alpha_i)}{\Gamma(\sum_{i=1}^K \alpha_i)}$$

Entonces el MSP está fijado por:

$$E(\pi_i) = \frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^K \alpha_i} = \theta_i$$

$$V(\pi_i) = \frac{\alpha_i (\sum_{j \neq i} \alpha_j)}{(\sum_{i=1}^k \alpha_j)^2 (\sum_{i=1}^k \alpha_i + 1)} = \frac{\theta_i (1 - \theta_i)}{\sum_{i=1}^k \alpha_i + 1}$$

$$Cov(\pi_i, \pi_j) = \frac{-\alpha_i \alpha_j}{(\sum_{i=1}^k \alpha_i)^2 (\sum_{i=1}^k \alpha_i + 1)} =$$

$$\rho \sqrt{\frac{\alpha_i (\sum_{j \neq i} \alpha_j)}{(\sum_{i=1}^k \alpha_i)^2 \sum_{i=1}^k \alpha_i + 1}} \sqrt{\frac{\alpha_j (\sum_{i \neq j} \alpha_i)}{(\sum_{j=1}^k \alpha_j)^2 \sum_{j=1}^k \alpha_j + 1}}$$

Entonces la distribución latente (hidden) de las proporciones de las especies, que son los parámetros, π_1, \dots, π_K de la distribución discreta de las m muestras dada la distribución a priori $Dir(\alpha)$ es $Dir(\vec{\alpha} + \vec{\tau})$ donde $\vec{\tau}$ es el histograma correspondiente determinado por las muestras.

Usaremos estos modelos para analizar el comportamiento de los estimadores. Para simplificar consideramos solo las dos especies con mayor frecuencia y una tercera donde se agrupan las demás. Fijamos $n(j) = n(0) = 10$ y que se toman $m = 5$ muestras y $\alpha = (6, 3, 1)$. Los resultados de la precisión son bajo el MSP generando los datos obtenidos en la Tabla 2.

Note que si la biodiversidad es generada por $\alpha = (6, 3, 1)$ o $\alpha = (1, 7, 2)$ la mejor opción es confiar en LSC mientras que si $\alpha = (4, 4, 2)$ caracteriza el MSP es mejor el uso de LSS. Por su parte los estimadores de Fager mejoran y son alternativas adecuadas al tener un error esperado pequeño, ver en la Tabla 3, que al considerar los errores relativos estos pasan a ser en general.

Por su parte los estimadores de Fager aparecen como alternativas adecuadas al tener un error esperado pequeño. Observe en la Tabla 3 que al considerar los errores relativos los estimadores de Fager pasan a ser menos variables.

Estimador	$\alpha = (6, 3, 1)$	$\alpha = (4, 4, 2)$	$\alpha = (1, 7, 2)$
L_{SS}	0,033	0,021	0,118
L_{SC}	0,099	0,707	0,014
L_{FS}	0,052	0,027	0,052
L_{FC}	0,052	0,027	0,052

Tabla 2: Varianza esperada bajo el MSP para $n(0) = 10$

Estimador	$\alpha = (6, 3, 1)$	$\alpha = (4, 4, 2)$	$\alpha = (1, 7, 2)$
L_{SS}	0,224	0,179	0,421
L_{SC}	0,113	0,945	0,133
L_{FS}	0,245	0,029	0,245
L_{FC}	0,245	0,029	0,245

Tabla 3: Coeficiente de variación esperado bajo el MSP para $n(0) = 10$

5. Conclusiones

Al utilizar modelos superpoblacionales, se pueden interpretar los valores de los parámetros de la distribución inicial, es decir, la idea es recoger la actividad realizada por ecólogos donde la idea es combinar individuos de cada especie recolectados en diferentes sitios para los índices de Simpson y Fager con m sitios de muestreo, para la simulación realizada el estimador de Fager es el más preciso y el combinado el mejor criterio de condensación.

Referencias

- [1] Almazán A. (2003): “Ordenamiento Ecológico Territorial de La Subcuenca del Río San Juan del Estado de Guerrero”, Reporte Técnico de Investigación, SIBEJ-UAGro.
- [2] Bouza C.N. y Covarrubias D. (2005a): “Estudio Estadístico del Índice de Biodiversidad de Fager”. Presentado en el “6th International Workshop on Operations Research”, La Habana, Cuba.
- [3] Bouza C.N. y Covarrubias D. (2005b): “Estimación del Índice de Diversidad de Simpson en m Sitios de muestreo”. Revista Investigación de Operaciones. 26, 187-195.

- [4] Bouza C.N. and Schubert L. (2004): “The Estimation of Bio-diversity and the Characterization of the Dynamics: an Application to the Study of a Pest”. *Revista Matemática e Estatística*. 21, 85-98.
- [5] Chaudhuri A. and H. Stenger (1992): “Survey Sampling: Theory and Methods”, Marcel Dekker, New York.
- [6] Fager, E.W. (1972): “Diversity: a sampling study”. *American Naturalist*. 106, 293-310.
- [7] Gelman A. And J. B. Carlin and h. S. Stern and d. B. Rubin (2003). “Bayesian Data Analysis”, 2nd ed.
- [8] Magurran A. E (2007); “Species Abundance Distributions Over Time”; *Ecology Letters*, 10, 347-354
- [9] Patil G. P. AND Taillie C. (1982): “Diversity as a Concept and its Measurement”. *Journal of the American Statistical Association* 77, 548-567.
- [10] Simpson, E. H. (1949): “Measurement of diversity”. *Nature* 163, 688.

Estudio de valores extremos ingresando covariables en el parámetro de forma

Sara Rodríguez Rodríguez¹
Hortensia J. Reyes Cervantes¹
Humberto Vaquera Huerta²
y Paulino Pérez Rodríguez²

¹Facultad de Ciencias Fisico Matemáticas, BUAP

²Colegio de postgraduados.

Avenida San Claudio y 18 Sur, Colonia San Manuel

Ciudad Universitaria, Puebla, Pue. C.P. 72570

e-mail: rguez.sara@gmail.com, hreyes@fcfm.buap.mx,

hvaquera@colpos.mx, perpdgo@colpos.mx

Resumen

Se presenta un análisis de las concentraciones de ozono suponiendo que siguen una Distribución de Valores Extremos, para este estudio se usan datos que proceden de una estación llamada Pedregal que pertenece al Sistema de Monitoreo de la Ciudad de México (SIMAT). Se incluyen un modelo de regresión lineal de variables ambientales y químicas, en los parámetros de escala (σ) y de forma (ε) y de esta manera comparar el comportamiento en los resultados obtenidos para cada uno de los modelos. Se analizan y se comparan los modelos resultantes en el periodo de 1990 a 2009.

1. Introducción

Uno de los principales problemas en el mundo es la contaminación ambiental, *Blacksmith, 2010* en [1] da una lista de los 10 lugares más contaminados en suelo, aire y agua, mostrando que la ciudad más contaminada del mundo es Linfen, China. En este trabajo se realiza un análisis relacionado con la contaminación del aire, en específico se hace un estudio de las concentraciones de ozono de la ZMCM.

Los contaminantes criterio están regulados por una norma, ésta norma define los niveles de concentración en el aire de tales contaminantes; siendo esta la forma; de proteger la salud humana. Entre estos contaminantes tenemos al ozono (O_3) el cual está presente en la atmósfera y tiene muy importantes repercusiones para la vida, a pesar de que se encuentra en cantidades muy bajas. Cuando el O_3 está en

las zonas de la atmósfera más cercanas a la superficie, es un contaminante que suele formar parte del smog.

El ozono se considera como uno de los contaminantes de mayor preocupación en la actualidad, ya que es altamente oxidante y afecta a los tejidos vivos, se asocia con diversos padecimientos en la salud humana. Los individuos que viven en zonas donde se registran regularmente concentraciones altas de ozono, presentan diversos síntomas, como: irritación ocular, de nariz y garganta, tos, dificultad y dolor durante la respiración profunda, dolor subesternal, opresión en el pecho, malestar general, debilidad, náusea y dolor de cabeza. Existe gran interés en el mundo por monitorear y analizar la contaminación atmosférica, además de involucrar variables ambientales que influyen en el aumento de los contaminantes.

En el caso particular de México, varios científicos de diferentes disciplinas, están investigando conexiones importantes entre el ozono, cambio climático y calidad del aire, para crear nuevos compuestos químicos que no afecten el medio ambiente. *Molina y Molina, 2002* en [7] comenta que en México se analiza el problema de calidad del aire el cual beneficiará al cambio climático y si se mejora la eficiencia de transporte, se disminuirían las emisiones de dióxido de carbono. Por lo cual, recomienda cambiar la fórmula de la gasolina, modernizar el cambio del parque vehicular y hacer reprogramación del transporte público, entre otras medidas.

En la línea que se ha estado trabajando estos dos años es en la modelación de Valores Extremos ya que se puede estimar y predecir el comportamiento del ozono. Esto es, en un trabajo se verifica la influencia de variable ambientales en las tendencias de las concentraciones de ozono, en *Rodriguez et al., 2009* en [8]. En *Rodriguez et al., 2009* en [9] ya se incluyen variables ambientales y químicas en tres estaciones de monitoreo atmosférico y se observa diferencias en la cantidad de concentraciones de ozono para cada estación lo cual esto depende en diferente escala de todas las covariables antes mencionadas.

En el presente trabajo se presenta una comparación en modelos de Valores Extremos, donde la regresión lineal de las covariables se incluyen en el parámetro de forma y de escala, dando resultados muy parecidos al modelo obtenido *Rodriguez et al., 2009* en [9].

2. Distribución de Valores Extremos Generalizada

La distribución de valores extremos surge del teorema límite de Fisher-Tippet en [6] sobre valores extremos o máximos en muestras de datos.

El modelo se enfoca sobre el comportamiento estadístico de

$$Y_n = \text{máx}\{X_1, \dots, X_n\}, \quad (1)$$

donde X_1, \dots, X_n es una sucesión de variables aleatorias independientes idénticamente distribuidas, con función de distribución F .

El teorema límite demuestra que Y_n tiene por función de distribución a G que es no degenerada y pertenece a la familia de Valores Extremos (VE) tales como la Gumbel, Fréchet o Weibull.

La distribución de Valores Extremos Generalizada (VEG) unifica la representación paramétrica de las tres diferentes familias de distribuciones de VE (*Coles, 2004* en [2], *Reiss, 2001* en [4]). La expresión de la distribución VEG estandarizada, está dada por:

$$G_{\mu, \sigma, \varepsilon}(z) = \exp\left\{-\left[1 + \varepsilon\left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{1}{\varepsilon}}\right\} \quad (2)$$

$$1 + \varepsilon\left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right) > 0$$

$$G_{\mu, \sigma, 0}(z) = \exp\left(-\exp^{-\frac{z - \mu}{\sigma}}\right) \quad (3)$$

en el caso de $\varepsilon = 0$
con $\theta = (\mu, \sigma, \varepsilon) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}$.

Los parámetros μ , $\sigma > 0$ y ε son los parámetros de localización, de escala y forma, respectivamente.

Uno de los modelos que se utiliza en este trabajo es propuesto por *Reyes et al., 2009* en [5], en tal artículo se muestra la convergencia de la función cuantil de la distribución VEG a una normal estandarizada y la ventaja de esta propiedad es el ajuste del ozono parecido al de los modelos de regresión lineal. Lo cual permite obtener pruebas de hipótesis e intervalos de confianza para los parámetros de interés.

El término cuantil se refiere a que dado un valor $0 < \alpha < 1$, el cuantil α de la función de distribución $F_X(x; \theta)$ es el valor q_α tal que $\alpha = P(X \leq q_\alpha) = F_X(x \leq q_\alpha) \Leftrightarrow F_X^{-1}(\alpha; \theta) = q_\alpha$, q_α es la Función Cuantil de $F_X(x; \theta)$.

Para valores muy grandes de q_α , se considera que hay un $(1 - \alpha)x100$ de observaciones más altas. En el caso de la distribución VEG, la función cuantil para un umbral alto en las observaciones, con α fijo en *Coles, 2004*, en [2] $\alpha = P(Z \leq q_\alpha) = G_{Z;\mu,\sigma,\varepsilon}(q_\alpha)$
 $\Leftrightarrow G_Z^{-1}(\alpha; \theta) = Z_\alpha(p) = q_\alpha$ con

$$Z_\alpha(p) = \begin{cases} \mu - \frac{\sigma}{\varepsilon}(1 - y_p^{-\varepsilon}), & \varepsilon \neq 0; \\ \mu - \sigma \log(y_p), & \varepsilon = 0. \end{cases} \quad (4)$$

con $y_p = -\log(1 - p)$ con $0 \leq p \leq 1$.

3. Metodología

Sean y_1, \dots, y_n realizaciones independientes de una variable aleatoria Y que tiene densidad de probabilidad $VEG(y; \mu, \sigma, \varepsilon)$, donde $\sigma = \sigma(X^t \beta) = e^{X^t \beta}$ ésta información son máximos de un periodo de la variable de interés para un tiempo fijo, propone Cox en 1996 el modelo de Regresión de la Distribución Pareto Generalizada (PG) a X^t como el vector de covariables y $\underline{\beta}$ es el vector de parámetros desconocidos, $\sigma = \sigma(\underline{x}^t \underline{\beta})$. En el caso de VEG, como $\sigma > 0$, es natural suponer que $\sigma(\underline{x}^t \underline{\beta}) = \exp(\underline{x}^t \underline{\beta})$. En esta expresión se introducen los máximos de las covariables para el periodo de tiempo que se tome.

La función de verosimilitud en esta propuesta es $L(Y; \mu, \underline{\beta}, \varepsilon) = \prod_i^n g(y_i; \mu, \underline{\beta}, \varepsilon)$

En forma equivalente se tiene

$$\exp\left(-\sum_i^n \left[1 + \frac{\varepsilon(y_i - \mu)}{\exp[\mu + \sum_i^k \beta_j x_{ij}]}\right]^{-\frac{1}{\varepsilon}}\right) \exp(n\mu + \sum_i^n \sum_j^k \beta_j x_{ij}) \quad (5)$$

$$\left\{ \prod_i^n \left(1 + \frac{\varepsilon(y_i - \mu)}{\exp(\mu + \sum_i^k \beta_j x_{ij})}\right) \right\}^{(-\frac{1}{\varepsilon}-1)}. \quad (6)$$

Al obtener los estimadores máximo verosímiles, de la función $-\log L(Y; \mu, \underline{\beta}, \varepsilon)$, se utiliza el método de Nelder que maneja el módulo ismev de software libre R ver [3], encontrando los estimadores de los parámetros $\mu, \underline{\beta}$ y ε . Para el caso particular, de tener sólo la covariable tiempo para una muestra del modelo anterior, se tendría que μ es el parámetro de localización, β_1 es el parámetro que se está asociando a la tendencia y t_i representa al i -ésimo periodo de tiempo. Es decir, $-\log L(X; \mu, \exp(\beta_0 + \beta_1 t_i), \varepsilon)$, entonces si $\beta_1 = 0$ se tiene que no existe

tendencia, si $\beta_1 > 0$ implica que hay tendencia creciente y por último, $\beta_1 < 0$ habrá tendencia decreciente, para mayor información ver *Reyes, 2009* en [5].

Cuando se tiene una muestra de n observaciones y k covariables meteorológicas, solo se analizará si influye o no en la tendencia. Para analizar la tendencia en la variable tiempo o para probar que alguna de las covariables ($j:1,\dots,k$) está contribuyendo en la tendencia de Y , se tiene que probar la hipótesis, $H_0 : \beta_j = 0$ vs $H_a : \beta_j \neq 0$ con todos los coeficientes de las k variables. Se rechazar H_0 si $|\frac{\widehat{\beta}_j}{\sqrt{v_{jj}}}| > z_{\alpha/2}$ donde α es el nivel de confianza y v_{jj} es el j -ésimo término de la diagonal de la matriz $(E(-\frac{\partial^2 \log L}{\partial \beta_i \partial \beta_j} |_{\beta_j = \widehat{\beta}_j}))^{-1}$

En el caso de que se rechace la hipótesis nula, habrá evidencia a un nivel α de significancia, que existe influencia en la tendencia en las observaciones de Y .

4. Procedimiento

Se obtiene datos de la estación Pedregal, a partir de enero de 1990 a septiembre de 2009, lo que se desea es analizar la tendencia del ozono en relación al conjunto covariables. Los datos utilizados son concentraciones de ozono (O_3) con unidad de medida en partículas por millón (ppm) de los cuales se verificará la tendencia en el tiempo(t), entre las covariables ambientales y químicas :

- Ozono (o_3), unidad de medida *ppm*.
- Temperatura (tmp), unidad de medida en grados *Celsius*.
- Velocidad del Viento (wsp), unidad de medida *m/s*.
- Humedad Relativa (rh), %.
- Dirección del viento (wdr), grados desde el norte natural
- Monóxido de Carbono (co), unidad de medida *ppm*.
- Dióxido de Nitrógeno (no_2), unidad de medida *ppm*.
- Dióxido de Azufre (so_2), unidad de medida *ppm*.

Sin embargo para evitar diferencias en las escalas de las diferentes variables se ha decidido estandarizarlas ver *Rodríguez et al., 2009* en [8]. El paso siguiente

es estimar los parámetros del modelo, se muestra el que contiene a todas las co-variables, cuando se ingresan las covariables en el parámetro de escala:

$$VEG(\hat{\mu}, \hat{\sigma}, \hat{\varepsilon}) \quad (7)$$

donde $\hat{\sigma} = \exp(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_0 x_1 + \hat{\beta}_1 x_2 + \hat{\beta}_2 x_3 + \hat{\beta}_3 x_4 + \hat{\beta}_5 x_5 + \hat{\beta}_6 x_6 + \hat{\beta}_7 x_7 + \hat{\beta}_8 x_8)$.
Aquí $x_1 = t$, $x_2 = tmp$, $x_3 = rh$, $x_4 = wsp$, $x_5 = wdr$, $x_6 = co$, $x_7 = no2$ y $x_8 = so2$.

El modelo completo cuando se ingresan las covariables en el parámetro de forma es el siguiente:

$$VEG(\hat{\mu}, \hat{\sigma}, \hat{\varepsilon}) \quad (8)$$

donde $\hat{\varepsilon} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_0 x_1 + \hat{\beta}_1 x_2 + \hat{\beta}_2 x_3 + \hat{\beta}_3 x_4 + \hat{\beta}_5 x_5 + \hat{\beta}_6 x_6 + \hat{\beta}_7 x_7 + \hat{\beta}_8 x_8$.
Aquí $x_1 = t$, $x_2 = tmp$, $x_3 = rh$, $x_4 = wsp$, $x_5 = wdr$, $x_6 = co$, $x_7 = no2$ y $x_8 = so2$.

5. Resultados

En la Figura 1 se observa que las gráficas de máximos para la estación Pedregal con todas las covariables.

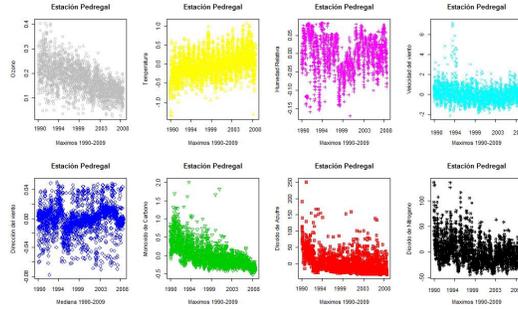


Figura 1: Máximos de la estación Pedregal

En la Tabla 1 mostramos los estimadores de máximo verosimilitud del modelo donde se incluye la regresión lineal en el parámetro de escala y en la Figura 2 se

Parámetro	E.M.V.	d.e.
$\hat{\beta}_0$	-1.9470	1.83e-02
$\hat{\beta}_1$	-0.0008	1.99e-06
$\hat{\beta}_2$	0.10068	6.59e-02
$\hat{\beta}_3$	0.0045	7.86e-04
$\hat{\beta}_4$	-0.0514	1.97e-02
$\hat{\beta}_5$	0.0024	6.80e-04
$\hat{\beta}_6$	2.6421	9.36e-01
$\hat{\beta}_7$	-1.2019	1.26e-01
$\hat{\beta}_8$	1.4980	3.31e-01

Tabla 1: Modelo o_3 con t , tmp , no_2 , wsp , so_2 , wdr , co y rh , en el parámetro σ

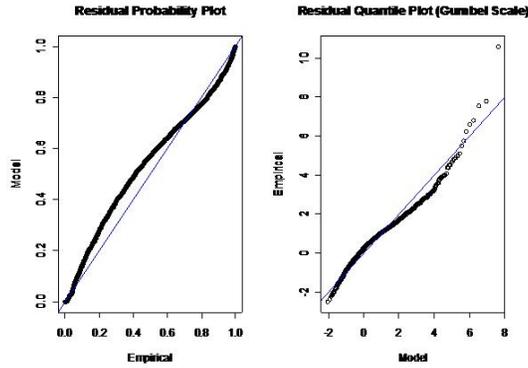


Figura 2: Gráfica de residuales para el modelo (7)

presenta la gráfica:

En la Tabla 2 mostramos los estimadores de máximo verosimilitud del modelo donde se incluye la regresión lineal en el parámetro de forma y en la Figura 3 se presenta la gráfica:

6. Conclusiones

Se observa que los niveles altos de ozono en las estaciones de Pedregal han disminuido hasta el 2009. Al incluir las covariables en el parámetro de escala se hacen a través de la liga exponencial, sin embargo el programa no arroja resultados si se usa la liga exponencial para el parámetro ε , por lo que en el parámetro de forma solo se usa la función identidad.

Parámetro	E.M.V.	d.e.
$\hat{\beta}_0$	0.05445	3.43e-03
$\hat{\beta}_1$	0.05839	1.84e-02
$\hat{\beta}_2$	-0.0092	1.24e-03
$\hat{\beta}_3$	0.1958	5.23e-02
$\hat{\beta}_4$	0.02611	3.43e-03
$\hat{\beta}_5$	0.0002	1.99e-06
$\hat{\beta}_6$	0.0001	2.82e-06
$\hat{\beta}_7$	0.0458	5.95e-04
$\hat{\beta}_8$	-0.1979	1.82e-03

Tabla 2: Modelo o_3 con t , tmp , no_2 , wsp , so_2 , wdr , co y rh , en el parámetro ε

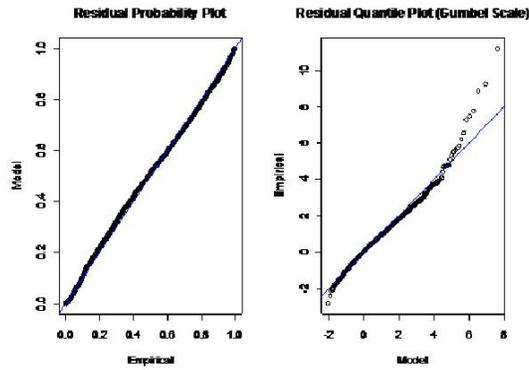


Figura 3: Gráfica de residuales para el modelo (8)

Para la estación Pedregal concluimos que la velocidad del viento no influye en las concentraciones de ozono, mientras que las variables restantes influyen en que las concentraciones disminuyan.

En la gráfica de residuales, obtenemos que para el modelo, donde se incluye la regresión en el parámetro de forma, los datos se acercan más a línea teórica, a comparación del modelo donde se incluyen las covariables en el parámetro de escala.

Referencias

- [1] Blacksmith Instituto, “Los lugares más contaminados del mundo”, <http://www.reportajes.org/2010/04/21/los-lugares-mas-contaminados-del-mundo/>, 2010.
- [2] Coles A., An introduction to statistical modeling of extreme values, tercera edición , pp. 18-73, 108-110, editorial Springer Verlag, Great Britain, 2004.
- [3] Stephenson y Gillel, “ismev Package:Extreme Values in R”, R Foundation for Statistical Computing, <http://www.r-project.org>, 2004.
- [4] Reiss R. y Thomas M., Statistical analysis of extreme values, segunda edición, pp. 3-138, editorial Birkhauser Verlag, Germany, 2001.
- [5] Reyes H., Vaquera H. y Villaseñor J., Estimation of trends in high ozone levels using the quantiles of the distribution GEV, Environmetric, <http://www.interscience.wiley.com.>, 2009.
- [6] Pickands J. III, Statistical inference using extreme order statistics, the annals of statistics, vol. 3(1), pp. 119-131, 1975.
- [7] Molina M. y Molina L., Air quality in the Mexico megacity: An Integrated Assessment, Kluwer Academia Publishers, 2002.
- [8] Rodríguez S., Reyes H., Vaquera H. y Linares G., Modelación estadística en contaminación del aire para dos estaciones vecinas del estado de México, Aportaciones y Aplicaciones de la Probabilidad y la Estadística, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla dirección general de fomento editorial, primera edición, vol. 3, pp. 43-53, 2009.
- [9] Rodríguez S., Reyes H., Vaquera H. y Linares G., Modelación de los factores ambientales en niveles altos de ozono, Memorias del XXIV Foro Nacional De Estadística / Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Asociación Mexicana de Estadística, 2009.

Modelamiento de dispersión de cinco contaminantes en la atmósfera emitidos por dos parques industriales poblanos

Roberto Carlos Sánchez Torres¹

Sonia Emilia Silva Gómez²

y José Silvestre Toxtle Tlamani³

¹Facultad de Ingeniería Química, BUAP

²Departamento Universitario para el Desarrollo Sustentable, BUAP

³Escuela de Biología, BUAP.

Ave. 14 Sur 6303 Colonia San Manuel,

Ciudad Universitaria, Puebla, Pue. C.P. 72570

e-mail: rocasato@gmail.com, soemsgo@yahoo.com, stoxtle@siu.buap.mx

Resumen

El presente trabajo muestra una metodología para el modelamiento de dispersión de cinco contaminantes criterio PM_{10} , SO_2 , NO_x , C_xH_y y CO generados por la combustión de derivados de petróleo en la zona norte de la ciudad de Puebla, tomando como fuentes puntuales de emisión los parques industriales *Puebla 2000* y *5 de Mayo* mediante el modelo Gaussiano de dispersión atmosférica de contaminantes.

Palabras clave: Modelamiento de emisiones, Modelo de Gauss, Contaminación atmosférica, Parques Industriales.

1. Introducción

La importancia de conocer las concentraciones de contaminantes atmosféricos tanto a nivel del suelo como disueltos en el aire, radica en contar con información útil y práctica para el desarrollo de políticas públicas que protejan adecuadamente a los seres humanos y al medio ambiente.

En las últimas décadas, la modelación se convirtió en una herramienta habitual de diversas disciplinas que buscan explicar o reproducir sus respectivas observaciones; existen modelos diseñados o paquetes de programas para cada tarea que se pueda plantear incluida la modelación de emisiones al aire. El ciclo de estancia aérea de un contaminante tiene tres fases, emisión: a través de una pluma formada

por conductos como chimeneas o escapes; transporte: por la turbulencia mecánica o gradientes de temperatura y difusión: esta última sobre suelo, agua, edificios. Desde el punto de vista de la dispersión de contaminantes, la modelación se utiliza para saber, entre otras cosas, cómo cambia en el tiempo y en el espacio la concentración o la razón de mezcla de una sustancia o traza habitualmente identificada como un contaminante criterio, a objeto de predecir y analizar la calidad del aire y de esta forma colaborar en las decisiones políticas y de planificación respecto a la gestión, mediante el desarrollo de planes, programas, proyectos y normas de emisión o calidad del aire.

El alcance de los resultados obtenidos, podrá tener impacto sobre la creación de políticas públicas, planeación y gestión de riesgos ambientales, planeación de riesgos a la salud de la población y monitoreo de la calidad del aire de la zona de estudio.

2. Objetivo general

Establecer el posible comportamiento de los contaminantes criterio PM_{10} , SO_2 , NO_x , H_xC_y y CO , debajo de la línea central de la pluma de emisión y a un costado de la misma a favor del viento dominante.

Objetivos específicos:

- Evaluar los parámetros necesarios para la ejecución del modelo.
- Estimar las concentraciones de estos contaminantes a nivel del suelo.

3. Marco Teórico

3.1. Modelo de Difusión Turbulenta

El enfoque más completo de la teoría del transporte se basa en el modelo de difusión turbulenta, esto constituye el punto inicial del desarrollo de un modelo para la dispersión en la atmósfera, visto en Ec. 1.

$$\frac{dC}{dt} = K_{xx} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) + K_{yy} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + K_{zz} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right)$$

Ec. 1

Donde C es la concentración, t es el tiempo y las magnitudes K_{ii} son coeficientes de difusión turbulenta en la dirección de los tres ejes de coordenadas. Esta ecuación se conoce como la ecuación de difusión de Fick. No obstante, este resultado es de difícil aplicación, en el caso del proceso natural en la atmósfera (Lowry & Bowdel, 1967). Por tanto, se hacen usualmente las siguientes suposiciones: La concentración del contaminante emana de una fuente puntual continua. El proceso es de estado estacionario, esto es, $dc/dt=0$. Se escoge la principal dirección de

transporte debida al tiempo, para que vaya a lo largo del eje de las x . Se selecciona la dirección del viento u , para que sea constante en cualquier punto del sistema de coordenadas x, y, z . El transporte de contaminantes debido al viento en la dirección x predomina sobre la difusión descendente, esto es, $u \frac{dC}{dx} \gg K_{xx} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ de aquí resulta que la ecuación de Difusión de Fick se reduce a la Ec. 2.

$$u \frac{\partial C}{\partial x} = K_{yy} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

Ec. 2

3.2. Modelo de Dispersión de Gauss (MDG)

El modelo muestra la distribución normal que se sugiere por la siguiente ecuación:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi r (K_{yy} K_{zz})^{1/2}} \exp \left[\frac{-u}{4x} \left(\frac{y^2}{K_{yy}} + \frac{z^2}{K_{zz}} \right) \right]$$

Ec. 3

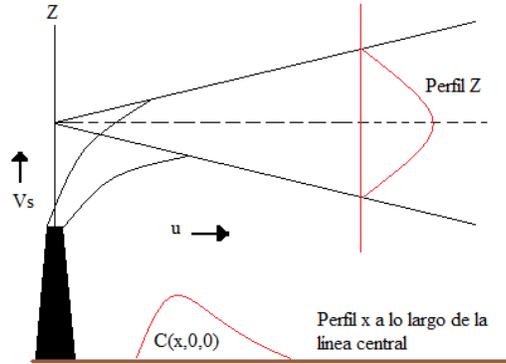
Los modelos de pluma de Gauss asumen que las concentraciones del contaminante en la pluma (x, y) puede representarse por curvas basadas en el función estadística de distribución estándar normal (Ec. 4)

$$f(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \left[\exp - \left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right) \right] \left[\exp \left(\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2} \right) + \exp \left(\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2} \right) \right]$$

Ec. 4

Donde Q es el flujo de salida del gas, u representa la velocidad del viento, σ_y es la desviación normal en el eje y , σ_z es la desviación normal en el eje z y H es la altura efectiva de la chimenea. El MDG utiliza los datos de entrada para calcular la concentración sobre puntos receptores distribuidos en una malla colocada sobre los ejes x, y, z . Para este trabajo se modificó la Ec 4 para calcular la concentración máxima al nivel del suelo, a través de la línea central de la pluma, eje x (Fig. 1) y para el cálculo de la concentración de contaminantes en dirección del viento dominante, eje y (Ec. 5 y Ec. 6) respectivamente.

Fig. 1 Perfil de concentración a lo largo de la línea central



Fuente: Wark & Warner, 2005.

$$C = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-0.5 \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2} \quad \text{Ec. 5}$$

$$C_{(x,y,0)} = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{\left(\frac{-H^2}{2\sigma_z^2} \right)} e^{\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2} \right)} \quad \text{Ec. 6}$$

Para esta modelación se tomaron en cuenta las siguientes suposiciones: El sistema se encuentra en estado estacionario. La difusión de masa es despreciable en x . La velocidad del viento es constante. Las difusibilidades D_x , D_y , D_z son constantes en masa. Además las unidades de concentración se manejaron de acuerdo al Sistema Internacional (S.I.) que expresa la concentración en $\mu\text{g m}^{-3}$.

3.3. Velocidad y dirección del viento

La Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales del estado de Puebla (llamada así hasta febrero de 2011) cuenta con estaciones meteorológicas a cargo del Sistema Estatal de Monitoreo Ambiental (SEMA), encargadas de medir hora a hora datos respecto a velocidad y dirección del viento, entre otros (Tabla 1).

Tabla 1 Datos meteorológicos

Mes	Máximo	Vientos (m/s)			Temperaturas (°C)			Precipitación (mm)
		Prome día	Mínimo	Dir.	Máxim a	Prome día	Mínimo	
Enero	11.8	1.4	0.6	NNE	23.3	14.9	6.7	23.5
Febrero	13.9	1.9	0.4	N	24.2	15.6	7	58.8
Marzo	12.7	1.6	0.2	NNE	26.2	17.2	8.3	12.8
Abril	14.4	2.1	0.2	NE	28.7	19.7	11.1	29.8
Mayo	18.3	3.4	0	NNE	26.2	19.2	12.3	91.7
Junio	22.5	1.4	0	ENE	26.3	19.6	13	168.8
Julio	18.45	1.15	0	NE	25.6	18.8	11.8	153
Agosto	14.4	0.9	0	S	26.6	19.5	12.4	164.3
Septiembre	19.4	0.8	0	NNE	24.8	19.8	13.4	349.9
Octubre	20.6	1.4	0	ENE	25	18.6	12.1	132.6
Noviembre	16.4	0.7	0	ESE	23	15.8	8.6	30.8
Diciembre	10.1	2.8	0.2	SE	23.3	15.7	8.6	20.3

Fuente: Sistema Estatal de Monitoreo Ambiental, 2009.

Nota: las velocidades superiores a 20m/s se deben a rafagas de viento atípicas o mal funcionamiento de los equipos de monitoreo (SEMA 2009).

3.4. Categoría de Estabilidad Atmosférica

La estabilidad atmosférica indica la capacidad de la atmósfera para dispersar los contaminantes. Existen seis categorías de estabilidad, *A* es la más inestable, *B* moderadamente inestable, *C* ligeramente inestable, *D* es neutra, *E* ligeramente estable y *F* es la más estable (Tabla 2).

Tabla 2 Condiciones de estabilidad

U (m/s)	Día: Insolación				Cielo cubierto nubosidad 10/10, altura <2133.6m	Noche: nubosidad	
	Fuerte $\alpha > 60i_{\frac{1}{2}}$	Moderada $35i_{\frac{1}{2}} < \alpha < 60i_{\frac{1}{2}}$	Ligera $15i_{\frac{1}{2}} < \alpha < 35i_{\frac{1}{2}}$	Débil $\alpha < 15$		>4/10	<4/10
0-0.77	A	A	B	C	D	F	F
0.77-1.80	A	B	B	C	D	F	F
1.80-2.83	A	B	C	D	D	E	F
2.83-3.34	B	B	C	D	D	E	F
3.34-3.86	B	B	C	D	D	D	E
3.86-4.89	B	C	C	D	D	D	E
4.89-5.40	C	C	D	D	D	D	E
5.40-5.92	C	C	D	D	D	D	D
> 5.92	C	D	D	D	D	D	D

Fuente: Turner, 1969

3.5. Coeficientes de Desviación Normal

Los valores de σ_y e σ_z están relacionados con los coeficientes de difusión o difusibilidades de masa de un gas a través de otros medios en las direcciones *y* e *z*. Muchas mediciones experimentales en la atmósfera han llevado a una evaluación y correlación de los valores de σ_y e σ_z (Turner, 1969).

Se han aislado un grupo de valores (Tabla 3), tomados de gráficas y estandarizados para usarse en las Ec. 7 y Ec. 8, que proporcionan valores más confiables de los coeficientes de desviación normal (Martin, 1976), así las desviaciones normales estarán expresadas en una forma algebraica.

Tabla 3 Valores de las ecuaciones de Martin

Estabilidad	x < 1km				X > 1km		
	a	c	d	f	c	d	f
A	213	440.8	1.941	9.27	459.7	2.094	-9.6
B	156	106.6	1.149	3.3	108.2	1.098	2.0
C	104	61	0.911	0	61	0.911	0
D	68	33.2	0.725	-1.7	44.5	0.516	-13.0
E	50.5	22.8	0.678	-1.3	55.4	0.305	-34.0
F	34	14.35	0.740	-0.35	62.6	0.180	-48.6

Nota: El valor de b es siempre 0.894 y se ha de expresar en km

Fuente: Martin, 1976.

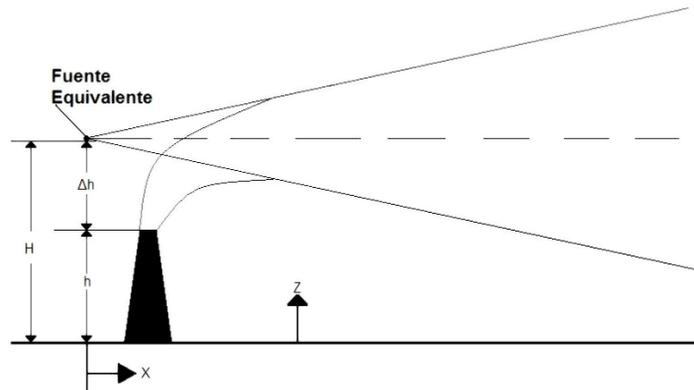
$$\sigma_y = ax^b \quad \sigma_z = cx^d + f$$

Ec. 7 Ec. 8

3.6. Altura de la Chimenea

Para fuentes localizadas en un punto, como en el caso de una chimenea, el aspecto general de la pluma se representa por el siguiente esquema:

Fig. 2 Altura efectiva de la chimenea



Fuente: Wark & Warner, 2005

A pesar de que la pluma tiene su origen a una altura h de la chimenea, se eleva a una altura adicional Δh , debido a la capacidad de flotación de los gases calientes, y a la cantidad de movimiento de los gases que salen verticalmente por la chimenea a una velocidad V_s . Por tanto, la pluma aparece como si se originara en una fuente puntual a una altura equivalente de la chimenea, $H = h + \Delta h$.

Para el cálculo de dicha Δh existen diferentes ecuaciones aplicables como las ecuaciones de Briggs que han sido utilizadas ampliamente en los modelos de dispersión de la EPA y están en función de la estabilidad, pero ecuaciones desarrolladas

anteriormente, como las de Concawe, Holland y Carson y Moses son importantes cuando las condiciones se ajustan a aquellas bajo las cuales fueron obtenidas o se cuenta con datos suficientes para utilizarlas (Carpenter, 1970). La ecuación de Moses y Carson, para condiciones atmosféricas inestables descrita en la Ec. 9 representa para esta modelación una alternativa viable ya que es razonablemente exacta cuando se usan datos de fuentes secundarias (Patiño, 2007).

$$\Delta h = 3.47 \frac{V_s d}{u} + 5.15 \frac{(Q_h)^{0.5}}{u}$$

Ec. 9

Dónde: V_s es la velocidad de salida del gas, d representa el diámetro de la chimenea, u la velocidad del viento, Q_h es el índice de emisión. Así mismo para calcular el índice de emisión se utiliza la Ec. 10

$$Q_h = m C_p (T_s - T_a)$$

Ec. 10

Donde: m es el flujo másico del gas en la chimenea, C_p es el calor específico a $P=\text{cte}$. T_s es la temperatura de salida del gas y T_a es la temperatura ambiental. Dado que no se disponía de datos físicos de la chimenea, esta modelación se llevó a cabo con valores experimentales propuestos por el Sistema de Información Ambiental (SIA) de Bolivia para modelos de dispersión de Gauss. En la Tabla 4 se puede encontrar un concentrado de dichos valores que incluye los valores típicos recomendados y los valores usados en este trabajo, estos últimos supuestos en base a los valores típicos cuando no se disponía de valores reales.

Tabla 4 Parámetros de entrada

Parámetro	Unidad	Rango	Valor Típico	Valor Usado
Altura efectiva de la Chimenea	m	>0	<65	35*
Altura de la Chimenea	m	>0	<65	10
Diámetro de la chimenea	m	0.1 a 10	0.5 a 2	1
Índice de emisión	$\mu\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$	>0	<10	ERFCA ⁺
Temperatura de descarga	K	>273	500 a 600	500
Velocidad de salida del gas	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	>0, <20	1 - 10	5

Sistema de Información ambiental de Bolivia, 2008.

Notas: *Valor obtenido mediante las ecuaciones de Moses y Carson, su cálculo se explica más adelante en la sección 5 de este documento.

⁺Estos valores fueron obtenidos para cada contaminante criterio mediante la técnica ERFCA, la metodología se explica en el siguiente apartado.

3.7. Índice de Emisión

Se usó la técnica de Evaluación Rápida de Fuentes de Contaminación Ambiental (ERFCA) y los inventarios obtenidos por la Red de Calidad Ambiental y Desarrollo Sustentable, para obtener los índices de emisión.

La ERFCA se basa en factores de emisión para obtener cantidades de contaminantes en unidades de masa por unidad de tiempo (PNUMA, 1986). Para fines de este trabajo, se utilizan los rubros contaminantes emitidos al aire por fuentes de combustiones fijas, móviles y procesos industriales contenidos en dicha técnica. En la Tabla 5 se muestra un resumen de los valores obtenidos mediante la ERFCA y usados en esta modelación.

Tabla 5 Índices de Emisión

Contaminante	P.I. 5 de Mayo	P.I. Puebla 2000
PM ₁₀ [$\mu g s^{-1}$]	2.2	3.4
SO ₂ [$\mu g s^{-1}$]	71.9	201.2
NO _x [$\mu g s^{-1}$]	44.3	36.2
H _x C _y [$\mu g s^{-1}$]	0.2	0.6
CO [$\mu g s^{-1}$]	1.7	3.2

Fuente: Red Calidad Ambiental y Desarrollo Sustentable, 2009.

4. Metodología

4.1. Selección del área de estudio.

En el estado de Puebla se ubican 23 parques industriales (SEAPI, 2009) de administración privada y gubernamental, de manera similar al norte de la capital del Estado existen cuatro parques industriales (P.I.) importantes tanto por el área ocupada como por el número de industrias asentadas en ellos (Tabla 6).

Tabla 6 Parques Industriales ubicados al Norte de la Ciudad de Puebla

P.I.	Área Ocupada (Has)	Administración
Resurrección	40	Privada
FINSA	300	Privada
Puebla 2000	91	Gubernamental
5 de Mayo	33	Gubernamental

Fuente: SIMPPI, 2009.

Los P.I.'s Puebla 2000 y 5 de Mayo (Fig. 3) se delimitaron como área de estudio, pues ambos son de administración gubernamental y la distancia entre ellos no

es mayor a 3 km. Las industrias asentadas dentro de estos parques incluyen las dedicadas a las ramas metal mecánica, química, textil y de transporte, además algunas de ellas dotadas de calderas u hornos para su proceso.

Fig. 3 Parques Industriales Puebla 2000 y 5 de Mayo



Fuente: Elaboración propia con base en SIG del estado de Puebla.

4.2. Selección del Modelo.

Se seleccionó el ya mencionado MDG pues requiere menor cantidad de información de entrada en comparación con el de DT. Además el MDG puede aplicarse en diversas estabildades atmosféricas y los datos de entrada no requieren intervalos cortos de tiempo, es decir que pueden ser a partir de mediciones cada hora o día, proporcionando al modelo una exactitud por debajo del 30 %.

4.3. Ejecución del modelo

El MDG fue generado para cada uno de los gases definidos en el objetivo principal y repetido para cada P.I.; en la sección resultados se podrán observar las gráficas de concentración. Se ejecutó el MDG en el zona de estudio durante los meses de Junio y Julio del 2009 y se tomaron las suposiciones mencionadas en la sección 3.2. Se manejó una rejilla de 300x300 receptores o entradas de una matriz, se utilizaron hojas de cálculo de Microsoft Excel© para realizar las operaciones del modelo, las matrices así obtenidas se graficaron con Matlab R2006a© para las concentraciones debajo de la línea central de la pluma $(x, 0, 0)$ y a favor del viento $(x, y, 0)$.

Las operaciones para determinar los parámetros σ_y , σ_z , Δh y conversiones de unidades se realizaron con Mathcad 2001© y los valores de concentración se

verificaron con el Industrial Source Complex Short Term o ISCST3 (USEPA, 1989).

5. Procedimiento

5.1. Datos de entrada

Como primer paso se determinó la velocidad de viento u mediante un promedio algebraico de los valores de vientos promedio correspondientes a los meses de Junio y Julio (Tabla 1) obteniéndose así $u = 1.27m/s$ valor que se utilizó en el MDG.

A continuación se estableció la estabilidad atmosférica, tomando el valor $u = 1.27m/s$ y suponiendo un día con insolación moderada por ser primavera/verano entonces los valores proporcionados por Turner (1969) en la Tabla 2 muestran que la estabilidad para esta modelación corresponde a la categoría B moderadamente inestable.

Los receptores de la rejilla virtual fueron colocados cada 10m en x e y hasta una distancia de 3km, es decir, 300x300 receptores y en base a ellos se estimaron los coeficientes de dispersión normal σ_y , σ_z mediante las Ec. 7 y Ec. 8, los valores para a , b , c , d y f se encuentran en la Tabla 2. Al final se obtuvieron coeficientes de dispersión normal para cada uno de los receptores virtuales.

5.2. Cálculo de la Altura Efectiva de la Chimenea

Los valores de entrada para hallar la altura efectiva fueron tomados de fuentes secundarias en su mayoría y se explican en la Tabla 7.

Tabla 7 Valores de entrada para la ecuación de Moses & Carson

	Parámetro	Valor	Comentarios
V_s	Velocidad de salida del gas [m/s]	5	Valor de fuente secundaria tomado de la Tabla 4 usando la media del valor típico.
u	Velocidad del viento [m/s]	1.27	Valor obtenido del promedio reportado en la Tabla 1. Utilizado sin tomar en cuenta el cambio del perfil del viento en la vertical pues como se indicó en la sección 3.2 el valor de u se mantiene constante en todo el modelo.
Q_h	Tasa de emisión de calor [kJ/s]	8	Calculado mediante la Ec 10.
d	Diámetro de la chimenea [m]	1	Valor de fuente secundaria tomado de la Tabla 4 usando la unidad por ser el número entero más cercano a la media del rango de valores típicos.

Fuente: Elaboración propia con base en fuentes secundarias, 2009.

Por otro lado para determinar Q_h se utilizaron los valores de la Tabla 8 para la Ec. 10.

Tabla 8 Valores de entrada para la Ec.10

	Parámetro	Comentarios
m	Flujo másico del gas [gr/s]	Valor tomado del índice de emisión (Tabla 5) con cambio de unidades de μg a gr , este valor cambia para cada gas modelado.
C_p	Calor específico del gas [$kJ/kg K$]	Valor hallado en tablas de propiedades físicas para gases, este valor cambia para cada gas modelado. Exceptuando las PM_{10} para ellas se utilizó como valor 1 ya que se trata de una mezcla con varios componentes de diferentes C_p .
T_s	Temperatura de descarga [K]	Valor de fuente secundaria tomado de la Tabla 4 usando el valor mínimo dentro del rango de valores típicos.
T_a	Temperatura ambiental [K]	Valor tomado del promedio de temperaturas reportadas por el SEMA.

Fuente: Elaboración propia con base en fuentes secundarias, 2009.

5.3. Modelamiento de la dispersión de contaminantes

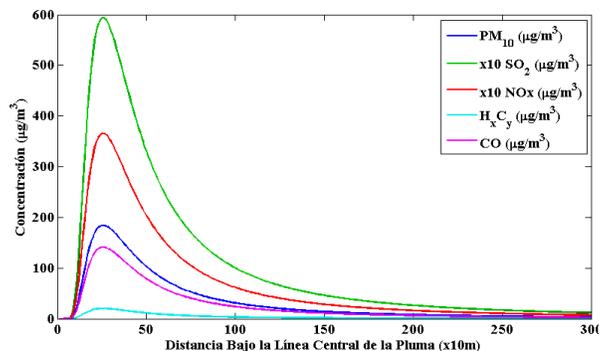
Las ecuaciones 5 y 6 se introdujeron en Microsoft Excel©, las constantes del modelo fueron Q , π , u y H , las variables fueron x , σ_y , σ_z se eligió este software

dada la amigable interfaz que presenta, se realizaron las iteraciones para la Ec. 5 y los datos obtenidos se graficaron con MatLab© ya que este software es capaz de graficar matrices superiores a 244x244 entradas lo que no es permitido en Microsoft Excel©, este procedimiento fue repetido para cada uno de los gases emitidos por ambos Parques Industriales. Para la Ec. 6 se introdujeron las variables x , y , σ_y , σ_z mientras que las constantes fueron las mismas de la ecuación anterior, una vez obtenidas las iteraciones de las matrices de cada uno de los gases de ambos Parques, se graficaron en Matlab©. Se realizó una comprobación con el software *ISCST3* para los valores de concentración más elevados SO_2 y NO_x , dicha comprobación fue para la línea central debajo de la pluma sin reflexión, es decir, la ecuación más sencilla de este modelador y los resultados fueron similares a los obtenidos por el MDG. Es conveniente mencionar que la modelación no se llevó a cabo en el *ISCST3* pues la interfaz es muy complicada ya que se trata de un software basado en el lenguaje de programación fortran y requiere de cierto conocimiento de programación para introducir las variables.

6. Resultados y discusión

Como se muestra en las Gráficas 1 y 2 los resultados obtenidos durante la modelación de dispersión de contaminantes emitidos por los Parques Industriales mostraron una tendencia hacia la función estadística de distribución estándar normal similar a las reportadas en la bibliografía consultada (Wark & Warner, 1994). Debido a limitaciones de espacio disponible, las gráficas correspondientes al P.I. Puebla 2000 para x,y se omiten, aunque la tendencia y forma son similares a la serie de Gráficas 3 a 7 cambiando los valores de concentración, estos pueden apreciarse a detalle en la Gráfica 2 y compararse con los mencionados en cada una de las Gráficas de los contaminantes criterio.

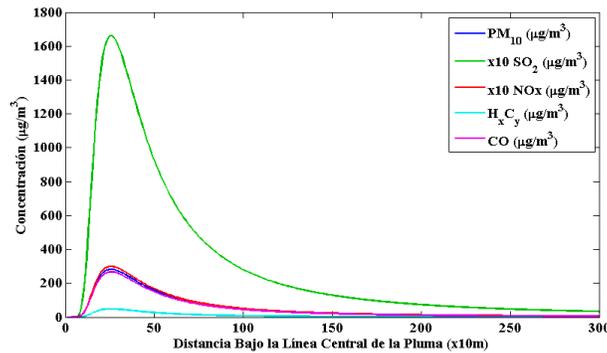
Gráfica1 Concentraciones bajo la línea central de la pluma para el P.I 5 de Mayo



Fuente: Elaboración propia, 2009

Para el P.I. 5 de Mayo los contaminantes emitidos alcanzan el máximo punto de emisión a los 260m de la fuente puntual, si se centran estas emisiones en un punto virtual situado en el centro del P.I. la dispersión importante se lleva acabo hacia el NNE quedando dentro de los límites del Parque. La mayor concentración corresponde al SO_2 seguido por el NO_x , debido probablemente al tipo de combustible utilizado para las calderas y motores.

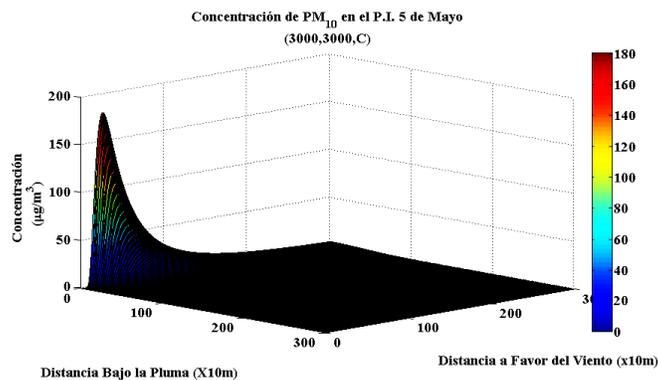
Gráfica 2 Concentraciones bajo la línea central de la pluma en el P.I. Puebla 2000



Fuente: Elaboración propia, 2009

Para el P.I. Puebla 2000 los mayores valores de concentración fueron para el SO_2 y NO_x , así mismo los valores respecto a distancia de concentración máxima se hallaron alrededor de los 260m. Además se aprecia que los valores de concentración en este P.I. son tres veces mayores que los del 5 de Mayo ya que hay más industrias asentadas por que la superficie del Parque es mayor en una relación 3:1.

Gráfica 3

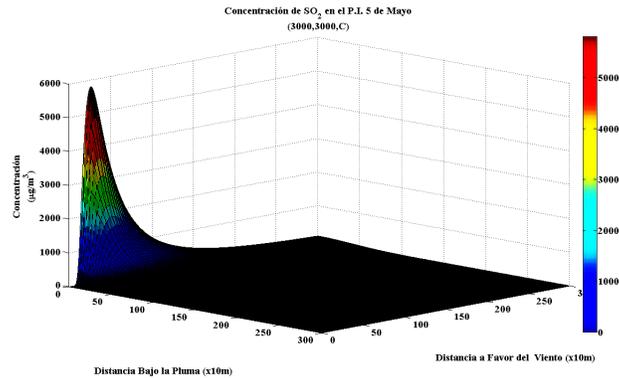


Fuente: Elaboración propia, 2009

Como se observa en la Gráfica 3 la máxima concentración es de $180\mu g/m^3$, de acuerdo a la NOM-025-SSA1-1993 las concentraciones permisibles de exposición

de este contaminante son $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas.

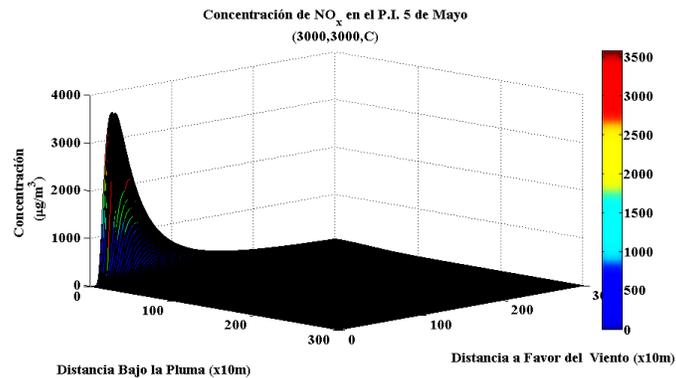
Gráfica 4



Fuente: Elaboración propia, 2009

Los límites máximos normados para este contaminante según la NOM-022-SSA1-1993 son $341 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas y $79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por año como se observa en la Gráfica 4 la concentración hallada fue $5900 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

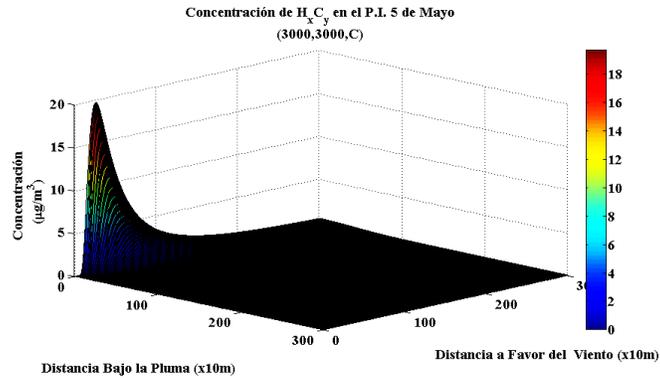
Gráfica 5



Fuente: Elaboración propia, 2009

Los límites máximos permisibles según la NOM-023-SSA1-1993 para NO_2 es $395 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hora, como se muestra en la Gráfica 5 la concentración hallada fue $3500 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

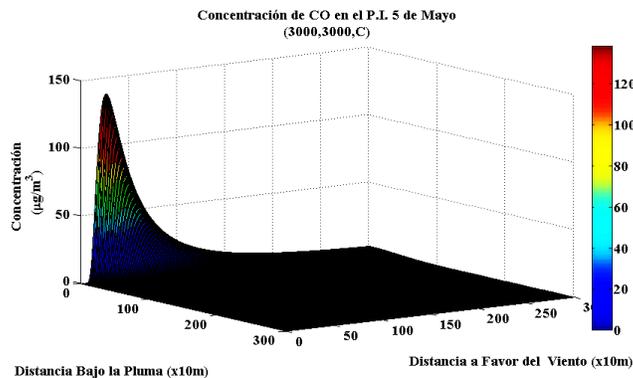
Gráfica 6



Fuente: Elaboración propia, 2009

La Gráfica 6 muestra que la concentración máxima de hidrocarburos fue de $20 \mu g/m^3$, no se dispone aún de normatividad para establecer límites máximos permisibles de hidrocarburos en el aire por procesos de combustión.

Gráfica 7



Fuente: Elaboración propia, 2009

El límite máximo permitido para este gas según la NOM-021-SSA1-1993 es $12.595 \mu g/m^3$ en un periodo de 8 horas, la concentración obtenida por el MDG según la Gráfica 7 es de $120 \mu g/m^3$. En las leyendas que acompañan a las Gráficas 1 y 2 los valores de SO_2 y NO_x deben multiplicarse $\times 10$, esta medida se tomó para dar simetría al resto de las curvas.

7. Conclusiones

Los valores graficados tanto para el P.I. 5 de Mayo como para el Puebla 2000 muestran resultados similares (Grafica 1 y 2), esto es debido a que comparten las mismas variables atmosféricas; la variación es respecto a la concentración en función de la distancia.

La modelación muestra distancias máximas de concentración dentro de los límites de ambos P.I.s, esto se explica porque en verano, la velocidad de los vientos es menor y la temperatura ambiental mayor, que son condiciones para una estabilidad atmosférica más fuerte, que reduce la dispersión.

La máxima dispersión se alcanza en los meses invernales, pues son los que cuentan con mayor velocidad de vientos y menor temperatura, propiciando una inestabilidad atmosférica.

Finalmente, la modelación Gaussiana limita el área geográfica por restricciones matemáticas, es decir, aísla en un cubo de dimensiones constantes el espacio modelado, lo que no ocurre en la realidad. Para conseguir modelaciones más exactas, se deben tomar en cuenta, tantas variables como complejo es el entorno, es decir, se deben usar modelos que incluyan variables como propiedades fisicoquímicas de las moléculas gaseosas, contener las reacciones químicas que se llevan a cabo con otras sustancias en la atmosfera, las difusibilidades en los tres ejes, además de los ejes x e y incluir cálculo de concentraciones en z para los diferentes perfiles de viento, incluir rugosidad del terreno y edificios circundantes entre otras.

Referencias

- [1] Carpenter S., (1970). Principal Plume Dispersion Models, TVA. Power Plants. 63d. Annual Meeting, Air Pollution Control Association.
- [2] Carson J.E., Moses H., (1969). The Validity of Several Plume Rise Formulas, Journal of Air Pollution Control Association, 19, No. 11.
- [3] Lowry W.P., Boubel R.W., (1967). Meteorological Concepts in Air Sanitation, Corvallis, Oregon State University.
- [4] Martin D.O., (1976). The Change of Concentration Standard Deviation with Distance, Journal of Air Pollution Control Association, 26, No.2.
- [5] Patiño A.M., (2007). Modelos de Dispersión Gaussianos, Principales Parámetros que afectan la Dispersión de Contaminantes del Aire. Seminario de Combustión Industrial Aplicada, Escuela Superior Politécnica del Litoral.

- [6] PNUMA/CPPS/ECO-CEPIS (1986). Evaluación Rápida de Fuentes de Contaminación de Aguas y Suelos en el Pacífico Sudeste, edición primera, editorial PNUMA, Lima, Perú.
- [7] Secretaria Estatal de Administración de Parques Industriales (SEAPI), (2010). Reservas, áreas y parques industriales en Puebla .Puebla México.
- [8] SIA-Bolivia, (2008). Modelo de dispersión atmosférica, la guía del usuario, edición primera, editorial Publicaciones del Sistema de Información Ambiental. Bolivia.
- [9] Sistema Mexicano de Promoción de Parques Industriales (SMPPPI), (2010). Programa PYME de la Secretaria de Economía del gobierno federal. México.
- [10] Turner D.B., (1969). Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates, Washington, D.C.
- [11] United States Environmental Protection Agency, (2009). The Industrial Source Complex Short Term (ISCST3) model. Current Regulatory Model. USA.
- [12] Wark K., Warner F., (1994). Contaminación del aire. Origen y Control, edición primera, editorial Limusa, México.

Modelo de la dinámica de carbono en suelos de sistemas agroforestales

Gustavo Orellana Rivadeneyra¹,
Gladys Linares Fleites²,
María de Lourdes Sandoval Solís³,
Norma Eugenia García Calderón⁴,
José Víctor Tamariz Flores²,
José Antonio Ticante Roldán²,
Miguel Angel Valera Pérez²

¹Posgrado en Ciencias Ambientales, Instituto de Ciencias,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

²DICA, Instituto de Ciencias de la
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

³Facultad de Ciencias de la Computación,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

⁴Facultad de Ciencias, UNAM.

*14 Sur 6303, Ciudad Universitaria, San Manuel,
Puebla, Puebla, México, C.P.72000,
e-mail:tavoorellana@yahoo.com.mx*

Resumen

El cambio climático es consecuencia del aumento en la atmósfera de la cantidad de gases de efecto invernadero, de estos, el CO₂ es el más abundante. El manejo de suelos agrícolas y forestales representa una alternativa para reducir el CO₂ atmosférico. Estos suelos actúan como sumideros de carbono. El conocimiento de la dinámica del carbono en ellos permitirá diseñar estrategias para reducir el CO₂ atmosférico. En este trabajo se propone un modelo que describe la dinámica del carbono en suelos basado en el concepto de reservorios. El modelo que aquí se presenta está sustentado en el análisis de características físico - químicas del suelo.

Palabras clave: Modelación, Carbono, Suelos, Cambio climático.

1. Introducción

De acuerdo con los estudios realizados a partir de las iniciativas del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), hoy se sabe que el cambio climático ha sido acelerado por el actuar del hombre [3].

Los principales agentes del cambio climático son gases de efecto invernadero (GEI) [2]. El GEI más abundante es el CO₂, resultante en su mayor parte, del consumo de

combustibles fósiles, de la deforestación y quema de bosques. Particularmente en México, aproximadamente un 30 % de las emisiones de GEI están relacionadas con algún tipo de actividad rural [1, 6].

El manejo de los suelos repercute en el cambio climático. Esto se debe al papel que desempeña el suelo en la captura y retención de carbono orgánico, es decir, puede ser secuestrador o emisor dependiendo del uso [5, 12]. El conocimiento de la dinámica del carbono en ellos permitirá diseñar estrategias para reducir el CO₂ atmosférico.

Un método poderoso para el estudio de la dinámica del carbono en los suelos es el desarrollo de modelos matemáticos que consideren la importancia del ciclo de descomposición de la materia orgánica [8, 9, 13] que posteriormente puedan aplicarse en escenarios reales.

En este trabajo se propone un modelo teórico que describe la dinámica del carbono en suelos basado en el concepto de reservorios. El modelo de reservorios supone que los diferentes estados de la materia orgánica del suelo constituyen masas homogéneas. Este modelo se enfoca en el intercambio de materia orgánica entre dichas masas [8]. El modelo propone relaciones de transformación de materia orgánica en ácidos húmicos y fúlvicos, y la transferencia de CO₂ a la atmósfera. La dinámica comienza por la acumulación de materia orgánica fresca en la superficie (primer reservorio) y la acumulación de detritos vegetales en el subsuelo (segundo reservorio); posteriormente, la materia se descompone y fluye hacia los reservorios de ácidos húmicos y ácidos fúlvicos (tercero y cuarto reservorios) donde se define la acumulación o pérdida de carbono. El modelo que aquí se presenta está sustentado en el análisis de características físico – químicas del suelo.

2. Desarrollo

2.1. Análisis físico – químico

Se empleó información de campo y de laboratorio obtenida en fincas cafetaleras de la Sierra Norte de Puebla, localizadas en los municipios de Zihuateutla, Cuetzalan del Progreso, Xicotepec de Juárez, Hueytamalco y Tlatlauquitepec. Las fincas están entre los 97° 4.2' y los 97° 57' de longitud Oeste, y entre los 20° y los 20° 22' de latitud Norte. La altitud va de 590 msnm a 1130 msnm. La temperatura media anual en algunos sitios es menor a 18°C y en otros puede alcanzar 24°C. La precipitación pluvial media anual está entre 2597 mm y 3362 mm. Los distintos tipos de suelo de la región son: Listosol, Regosol, Luvisol, Andosol, Vertisol, Acrisol, Cambisol, Castañosem y Feozem [11].

Se usó datos de densidad aparente del suelo (DA), porcentaje de carbono orgánico del suelo (COS), porcentaje de materia orgánica del suelo (MOS), porcentaje de nitrógeno total (N) y relación C:N obtenidos para los diferentes perfiles de cafetales. Otra información incluida en el estudio fue la razón entre ácidos fúlvicos y ácidos húmicos (AF:AH) y la acidez del suelo (pH).

Se realizó una comparación cualitativa de MOS y DA entre cafetales al Sol y cafetales a la sombra mediante gráficas de cada una de estas cantidades como funciones de la profundidad del suelo.

Se efectuó un análisis de varianza de los datos para una comparación cuantitativa [4] tomando como factor el tipo de cafetal (Sol, Sombra). Las cantidades que se incluyeron en el análisis fueron el porcentaje de MOS, porcentaje de COS, DA, el porcentaje de N total y la razón C:N. En este caso, se consideró el valor del punto medio como referente de

profundidad para cada uno de los perfiles. Los datos de entrada en el análisis de varianza se obtuvieron de una descripción estadística y la construcción de la matriz de correlaciones de la información de campo y laboratorio. En el caso de la razón AF:AH y del pH del suelo, únicamente se hizo la descripción estadística.

2.2. Resultados del análisis

En el cuadro 1 se muestra la información estadística que describe a ambos tipos de cafetales. En este cuadro se incluyó, como variables, la profundidad media del suelo, la DA, el porcentaje de MOS (% MOS), el porcentaje de COS (% COS), el porcentaje de N (% N), la relación C:N, la razón AF:AH y el pH del suelo. La estimación de las variables se efectuó mediante las siguientes técnicas:

- a) La DA por el método de la probeta;
- b) El porcentaje de N total por el método Semi-microKjeldahl;
- c) El pH por el método potenciométrico: (CONDUCTRONIC pH 20), en H_2O y en KCl relación 1:2.5;
- d) El porcentaje de MOS por el método de Walkley y Black;
- e) La relación C:N, es la razón entre el porcentaje de COS y el porcentaje de N total;
- f) La relación AF:AH es la razón entre AF y AH.

La aplicación de las técnicas y operaciones mencionadas se describe en [11].

En la descripción de suelos de cafetales se consideró el perfil de cada finca cafetalera como una muestra.

El cuadro 2 muestra la matriz de correlaciones entre seis de las variables consideradas. En el cuadro, el valor de correlación está acompañado de su valor de p , esto es, del grado de falsedad de la hipótesis inicial. La hipótesis de partida es que todas las variables están correlacionadas. La matriz muestra que existen correlaciones entre: el porcentaje de N y la profundidad media del suelo, la DA y el porcentaje de MOS, la DA con el porcentaje de COS, la relación C:N con el porcentaje de MOS, y la relación C:N y el porcentaje de COS. Es notable la correlación de 1 con $p = 0.0$ entre el porcentaje de COS y el porcentaje de MOS; pero ésta se debe a que el porcentaje de COS se calcula mediante la relación $\%COS = (\%MOS)/1.724$. Utilizando un análisis de varianza (ANOVA) se encontró que a un nivel de significación del 10 % la relación C:N es significativa [4]. Este resultado se presenta en el cuadro 3. En el cuadro 3 se muestra los grados de libertad, DF, la suma de cuadrado ajustada, Aj SS, el cuadrado medio ajustado, Aj MS, el estadístico de prueba que se distribuye con la distribución F de Fisher, F, y el valor empírico de la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando es cierta, p [4]. Para el análisis gráfico, en la figura 1 se muestra el comportamiento de la MOS, y su relación con la profundidad, en cuatro perfiles de cafetales a la sombra [11]. Se puede observar en la figura 1 que el contenido de MOS disminuye de manera aproximadamente exponencial en función de la profundidad. Tal comportamiento es esperado en suelos donde el aporte constante de materia orgánica (MO) fresca favoreciendo la humificación.

La gráfica (figura 1) también sugiere que ni la reincorporación de la MO a la biomasa ni la mineralización o degradación produce disminuciones importantes de MOS.

En la figura 2 se muestra el comportamiento de la MOS, en su relación con la profundidad, en cinco perfiles de cafetales al Sol [11]. El comportamiento mostrado por los

Cuadro 1: Estadística descriptiva

Variable	Tipo de Cafetal	Total de muestras	Media	Desviación estándar	Valor mínimo	Mediana	Valor máximo
Profundidad media	Sol	6	9.75	6.04	3.50	9.50	17.00
	Sombra	11	10.14	7.92	0.75	7.50	28.50
DA	Sol	6	0.8483	0.0854	0.700	0.875	0.92
	Sombra	11	0.8473	0.0942	0.700	0.880	0.98
% MOS	Sol	6	9.32	5.48	3.40	8.90	19.10
	Sombra	11	9.16	5.58	2.10	7.70	24.00
% COS	Sol	6	5.380	3.120	1.94	5.18	10.90
	Sombra	11	5.301	3.195	1.80	4.47	13.80
% N	Sol	6	0.7467	0.1908	0.50	0.73	1.02
	Sombra	11	1.2870	1.2520	0.60	0.74	4.90
C:N	Sol	6	8.080	4.660	2.15	7.15	14.50
	Sombra	11	5.104	2.477	1.20	4.50	8.60
Razón AF:AH	Sol	6	1.756	0.1314	1.66	1.66	1.9
	Sombra	11	1.81	0.3298	1.49	1.7	2.3
pH	Sol	6	4.664	0.3649	4.05	4.6	6.1
	Sombra	11	4.725	0.5875	3.6	4.9	6.4

Cuadro 2: Matriz de Correlaciones

	Profundidad media	DA	% MOS	% COS	% N
DA	0.109 p: 0.677				
% MOS	-0.304 p: 0.236	-0.649 p: 0.005			
% COS	-0.299 p: 0.244	-0.652 p: 0.005	1.000 p: 0.000		
% N	0.594 p: 0.012	0.017 p: 0.948	0.076 p: 0.779	0.077 p: 0.768	
C:N	-0.333 p: 0.192	-0.357 p: 0.160	0.631 p: 0.007	0.630 p: 0.007	-0.297 p: 0.248

Cuadro 3: Análisis de Varianza para la relación C:N, usando SS ajustado

Fuente	DF	Aj SS	Aj MS	F	P
Tipo de cafetal	1	34.28	34.28	3.03	0.102
Error	15	169.75	11.32		
Total	16				

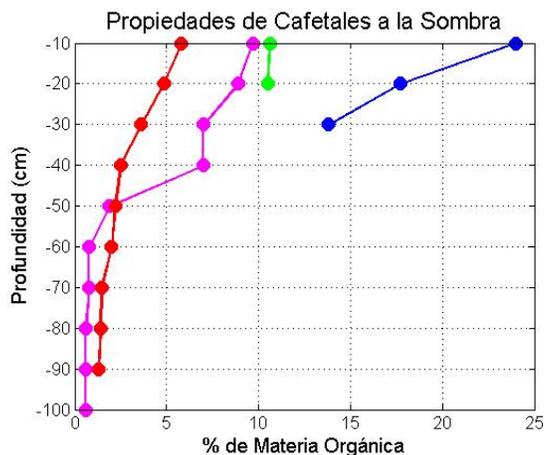


Figura 1: Relación entre % MOS y profundidad en cafetales a la sombra

perfiles a, b y d indica que el aporte de MO fresca superficial no alcanza a reemplazar a la MO del suelo que se pierde por mineralización, incorporación a la biomasa, flujo, degradación o erosión. Esto evidencia una pobre humificación. En las figuras 3 y 4 se muestran las funciones de DA en relación a la profundidad. En la figura 3 se tiene la DA de cuatro perfiles de cafetales a la sombra. En esta gráfica se muestra un comportamiento creciente. La gráfica en la figura 3 sugiere que el suelo es estable, pues la compactación aumenta lentamente conforme aumenta la profundidad y, probablemente, existe un buen contenido de humedad.

En contraste, la figura 4, que corresponde a perfiles de cafetales al Sol, muestra un comportamiento inicialmente decreciente. Tal comportamiento sugiere que el suelo se está compactando desde la superficie y la MOS es inestable, esto es, pierde agregados y humedad.

3. Modelo

Los resultados obtenidos con la comparación de propiedades del suelo nos permiten identificar las características del suelo más relevantes en la selección de variables para la modelación matemática del comportamiento del carbono orgánico en suelo.

A partir del modelo de reservorios para la dinámica de carbono planteado en [8], y

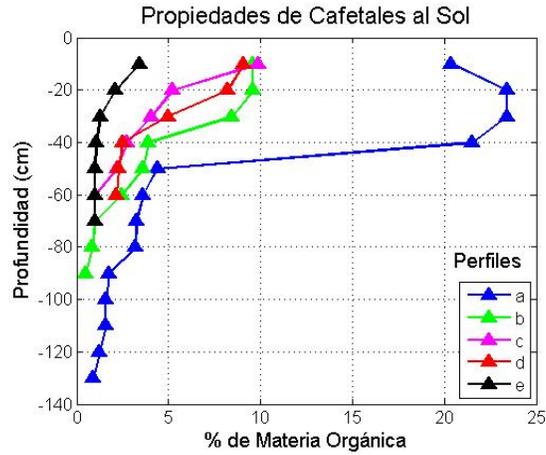


Figura 2: Relación entre % MOS y profundidad en cafetales al Sol

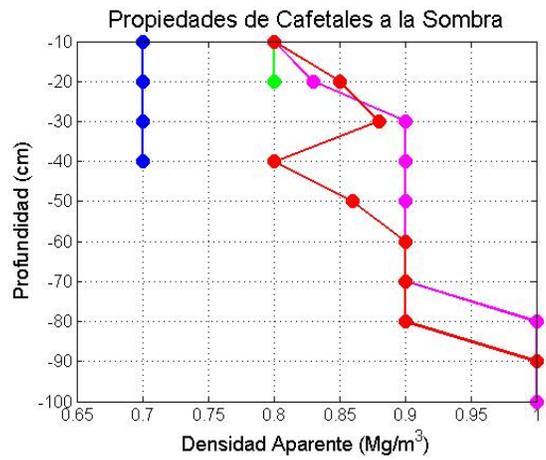


Figura 3: Relación entre DA y profundidad en cafetales a la sombra

empleando los resultados expuestos en la sección 2.2, aquí se propone el modelo esquematizado en la figura 5.

Con base en el modelo de reservorios se propone describir la dinámica del carbono orgánico mediante un sistema de ecuaciones de flujo lineal. El flujo está dado por el

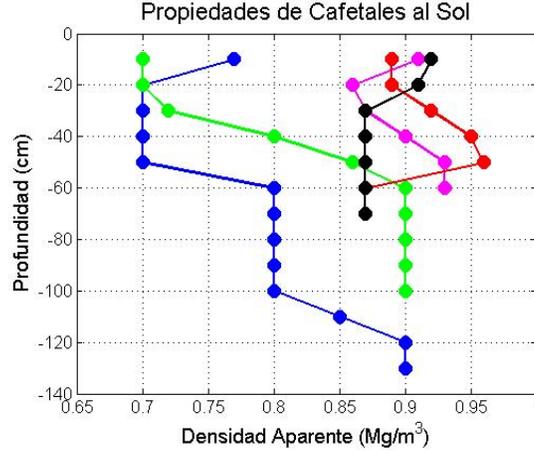


Figura 4: Relación entre DA y profundidad en cafetales a la Sol

sistema de ecuaciones (1).

$$\begin{aligned}
 \frac{dM_0}{dt} &= L - \nu_A (1 + 1/\delta_A) M_0 \\
 \frac{dM_d}{dt} &= \sigma R_f - \nu_d (1 + 1/\delta_d) M_d \\
 \frac{dA_H}{dt} &= (\nu_A/\delta_A) M_0 + (\nu_d/\delta_d) M_d + \kappa_F A_F - (\kappa_H + \mu_H) A_H - E_H \\
 \frac{dA_F}{dt} &= \kappa_H A_H - (\kappa_F + \mu_F + \alpha) A_F - (E_H + \Phi)
 \end{aligned} \tag{1}$$

La tabla del cuadro 4 muestra la nomenclatura de variables y coeficientes incluidos en el flujo (1).

De [7, 8] y otros estudios se sabe que L depende la densidad de biomasa aérea, y que ν_A , ν_d , μ_H y μ_F dependen principalmente de la temperatura y humedad del suelo [10]. Del análisis de suelos efectuado para este trabajo, se encontró que $\kappa_H A_H$ y $\kappa_F A_F$ dependen principalmente de la actividad microbiológica y de las condiciones físico-químicas que le favorezcan a ésta; E_H y E_F dependen de los factores climáticos, pero también de la biomasa, la exposición al Sol, la pendiente y la humedad. La solubilidad y el flujo de materia orgánica de la fracción fúlvica depende del pH y la humedad del suelo. Finalmente, αA_F depende principalmente de la acción de la rizósfera y sus condiciones.

4. Conclusiones

Puede verse que el análisis gráfico indica que los cafetales a la sombra favorecen un aumento en las reservas de COS. Lo contrario sucede con los cafetales al Sol, donde la MOS se pierde, y esto puede ser por mineralización, incorporación a la biomasa, flujo, degradación o erosión. El ANOVA aplicado a la razón C:N confirma cuantitativamente estos hechos.

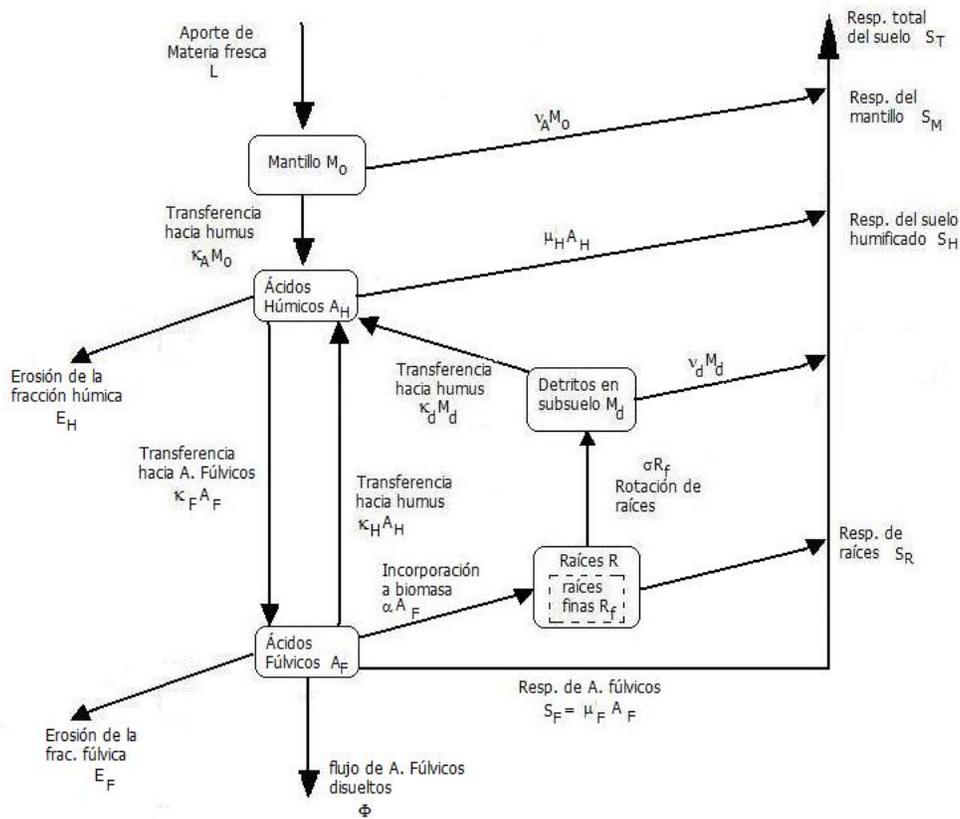


Figura 5: Esquema del modelo propuesto

En la causa de pérdida de MOS está involucrada la razón AF:AH. La razón AF:AH indica que la cantidad de ácidos fúlvicos es mayor que la cantidad de ácidos húmicos del suelo (cuadro 1). Se sabe también que la solubilidad de los ácidos fúlvicos es mayor cuanto mayor sea la acidez del suelo. Si bien esto aumenta la biodisponibilidad de la MOS, también favorece la pérdida de MOS fluida.

Por otra parte la comparación entre la DA de los dos tipos de cafetales, nos indica que mientras que el cultivo de café a la sombra mantiene las condiciones de un suelo saludable, cuya estructura es parecida a la que se esperaría en un suelo de bosque, el cultivo de café al Sol desestabiliza el suelo al exponerlo a la erosión por factores climáticos y reducir su captación de MO fresca.

En la medida en que se establezcan las relaciones entre los coeficientes mencionados en la sección 3 y las condiciones físicas, químicas y biológicas de que dependen, el modelo podrá describir con mayor precisión la dinámica del carbono orgánico en el suelo y predecir sus condiciones futuras.

Finalmente, realizar estudios que incluyan construcción de modelos, pruebas y análisis

Cuadro 4: Nomenclatura

M_0	Acumulación de mantillo	gCm^{-2}
M_d	Acumulación de raíces finas muertas	gCm^{-2}
A_H	Acumulación de ácidos humicos	gCm^{-2}
A_F	Acumulación de ácidos fúlvicos	gCm^{-2}
ν_A	Tasa relativa de descomposición del mantillo	$tiempo^{-1}$
ν_d	tasa relativa de descomposición de las raíces muertas	$tiempo^{-1}$
δ_A	Razón de transporte de materia de M_0 a A_H	
δ_d	Razón de transporte de materia de M_d a A_H	
σ	Tasa relativa de rotación de raíces	$tiempo^{-1}$
μ_H	Tasa relativa descomposición del ácidos humicos	$tiempo^{-1}$
μ_F	Tasa relativa descomposición del ácidos fúlvicos	$tiempo^{-1}$
L	Tasa de caída de hojas	$gCm^{-2}tiempo^{-1}$
E_H	Erosión de la fracción húmica	$gCm^{-2}tiempo^{-1}$
E_F	Erosión de la fracción fúlvica	$gCm^{-2}tiempo^{-1}$
κ_H	t. rel. de transferencia de materia orgánica de A_H hacia A_F	$tiempo^{-1}$
κ_F	t. rel. de transferencia de materia orgánica de A_F hacia A_H	$tiempo^{-1}$
α	t. rel. de reincorporación de A_F a la biomasa	$tiempo^{-1}$
Φ	Flujo de ácidos fúlvicos disueltos	$gCm^{-2}tiempo^{-1}$

permitirá llegar gradualmente a tener herramientas altamente confiables en la toma de decisiones sobre uso de suelos, y a obtener resultados positivos en la mitigación del cambio climático por captura de gas carbónico.

Referencias

- [1] De Jong, B.H.J.; Tipper, R. and Taylor, J.; 1997 A framework for monitoring and evaluating carbon mitigation by farm forestry projects: example of a demonstration project in Chiapas, México. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 2: 231-246.
- [2] INE-SEMARNAT 2006 La investigación ambiental para la toma de decisiones (informe 2006).
- [3] IPCC, 2007 Cambio climático 2007, informe de síntesis (www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf).
- [4] Linares Fleites, G., 2006. Análisis de Datos Multivariados Ed. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de Computación. 277p
- [5] Luis-Mejía, Salomón, Gómez-Guerrero, Armando, Etchevers-Barra, Jorge D, Ángeles-Pérez, Gregorio, López-López, Miguel A.y Horwath, William R. (2007), Acumulación de carbono orgánico en el suelo en reforestaciones de pinus michoacana. Agrociencia 41: 711-721.

- [6] Masera, R.O.; Bello, M.R. y Segura, G., 1995 Forest management options for sequestering carbon in México. *Biomass and Bioenergy* 8 (5) 357-367
- [7] Nakane, Kaneyuki; 2001, Quantitative evaluation of atmospheric CO₂ sink into forest soils from the tropics to the boreal zone during the past three decades, *Ecological Research* 16, 671-685
- [8] Nakane, K; Tsubota, H. y Yamamoto, M. (1987). Simulation of soil carbon cycling following clear cutting in a Japanese red pine forest, *Journal of Japanese Forest Society* 69: 417-426.
- [9] Schulze, E.D.; Wirth, Ch. and Heimman M.; 2000 Managing forest after Kyoto. *Science* 289 (5487) 2058-2059.
- [10] Shuto, Katsuyuki and Nakane, Kaneyuki, (2007) Model simulation of soil carbon dynamics with stand development in Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantations, *Ecol. Res.* 22: 515-526
- [11] Ticante Roldán, J.A. (2000). Investigaciones edafológicas sobre el estado de degradación de agrosistemas cafetaleros y otros agrosistemas en la Sierra Norte de Puebla. Tesis de Maestría. UNAM, México D.F.
- [12] Villalobos, S.F. Septiembre del 2005. Estimación del Costo Marginal de los Servicios de Fijación de Carbono en Costa Rica.
- [13] Yadav, Vineet and Malanson, George; 2007 Progress in soil organic matter research: litter decomposition, modelling, monitoring and sequestration, *Progress in Physical Geography* 31(2) 131-1154.

Modelos probabilístico de predicción para variables atmosféricas usando el método de perturbación geoestadístico y modelos jerárquicos Bayesianos de tiempo y espacio

Lilia Leticia Ramírez Ramírez¹

Yulia Gel¹

y Fabrizio Ruggeri²

¹ University of Waterloo

² Istituto di Matematica Applicata e Tecnologie Informatiche

e-mail: lramire@math.uwaterloo.ca, ygl@math.uwaterloo.ca,

fabrizio@mi.imati.cnr.it

Resumen

Los modelos probabilistas de predicción, en contraste con las predicciones puntuales o numéricas, tienen la ventaja de proveer de medidas de plausibilidad esenciales para realizar tareas de planeación y administración de riesgos.

En este trabajo proponemos obtener un modelo probabilista utilizando la información de los modelos deterministas para la predicción de variables climatológicas que generalice los supuestos de homogeneidad que existen en el método de perturbación geoestadística de resultados (GOP). Planteamos un modelo jerárquico que resolvemos con metodología bayesiana e ilustramos su desempeño utilizando datos de temperaturas en estaciones climatológicas del Noroeste de Estados Unidos.

1. Introducción

En este trabajo obtenemos predicciones probabilistas basadas en modelos lineales jerárquicos que incluyen como elementos a las predicciones deterministas de la variable atmosférica de interés. Estas predicciones puntuales o deterministas se denominan predicciones numéricas de clima y consisten en la solución de complicadas ecuaciones diferenciales que modelan la evolución de las variables atmosféricas basadas en leyes físicas. Debido a la complejidad del fenómeno, la solución que se debe obtener es numérica y utiliza enormes recursos computacionales.

El sistema de ecuaciones que los modelos deterministas resuelven, consideran condiciones iniciales y de frontera que a vez tienen que ser estimadas basándose en las observaciones de variables atmosféricas y previas predicciones.

Con el fin de aprovechar la información contenida en las predicciones puntuales se han realizados dos tipos de metodologías para obtener predicciones estocásticas [2, 7]. Una perturba las variables que luego son procesadas para obtener las condiciones iniciales de las ecuaciones diferenciales y la otra perturba directamente estas condiciones iniciales. En ambos casos las variaciones son resueltas numéricamente para cada variación originada para obtener un conjunto de predicciones.

Como se comenta [3] la desventaja de utilizar la segunda metodología radica en posiblemente obtener conjuntos de condiciones iniciales que violen las condiciones físicas de equilibrio atmosférico.

En este trabajo, al igual que GOP [3], utilizamos un modelo probabilista basado directamente en las predicciones hechas por los métodos numéricos y la contribución que se hace es generalizar los supuestos de homogeneidad espacial usados en GOP. Con este propósito usamos un modelo jerárquico lineal que incluya las predicciones numéricas y algunas de las variables espaciales y temporales que tengan mayor influencia en el posible sesgo de las predicciones deterministas.

Es de suma importancia relajar el supuesto de homogeneidad sobre todo cuando el conjunto de datos considera sitios que tienen una gran dispersión espacial, debido a que esta característica puede tener como consecuencia una clara violación a esta hipótesis.

En la Sección 2 presentamos el modelo general y en la Sección 3 lo implementamos considerando dos modelos diferentes para el particular caso de obtener predicciones de temperatura con los datos que en la Sección 3.1 se describen. La Sección 3.3 presenta los resultados de ambos modelos y su evaluación.

Finalmente, en la Sección 4 exponemos algunas conclusiones y comentamos sobre las posibles generalizaciones a los modelos presentados.

2. Modelo Jerárquico

Los modelos jerárquicos son modelos definidos en varios niveles que permiten describir la variación entre grupo de datos. Una clara introducción a estos modelos se encuentra en [4, 8, 5].

Sea $Y(s, t)$ la predicción de la variable de interés en el sitio $s \in \mathcal{S} \subset \mathbb{R}^2$ al tiempo $t \in \mathcal{T} \subset \mathbb{R}$ y sea $\tilde{Y}(s, t)$ su predicción numérica. Consideramos en el conjunto $Y(t) = \{Y(s, t) : s \in \mathcal{S}\}$ que es simultánea para los sitios.

Similarmente, sea $X(s, t)$ el conjunto de p variables que tienen influencia sobre el sesgo de las predicciones puntuales. Este conjunto puede incluir funciones en el tiempo o espacio tales como latitud, altitud, uso de tierra, estación, etc. Denotamos como $X(t)$ a la matriz de variables explicativas para los sitios $s \in \mathcal{S}$.

El modelo que proponemos es:

$$Y(t) = A\tilde{Y}(t) + X(t)\beta + \epsilon, \quad (1)$$

donde A es una matrix ($|\mathcal{S}| \times |\mathcal{S}|$) y β es vector (de longitud p) de coeficientes. Consideramos que el vector ϵ no tiene información significativa y solo incluye ruido que puede ser diferente entre estaciones pero con misma distribución a lo largo del tiempo.

La relación en (1) es el primer nivel del modelo jerárquico. En el segundo nivel a los parámetros definidos se les da, a su vez, un modelo de probabilidad donde los hiperparámetros constituyen los parámetros y al igual que los parámetros, son estimados basados en los datos observados.

Esta estructura permite modelar la variación entre grupos, que en este tipo de aplicaciones, naturalmente se constituyen por los sitios o localizaciones en el espacio.

El modelo general propuesto por GOP [3], al igual que el primer nivel del model presentado arriba, incluye covariables que tienen el objetivo de explicar el sesgo en las predicciones puntuales, pero debido a que GOP no es un modelo jerárquico, los parámetros-coeficientes, son fijos. GOP introduce la información de variabilidad espacial en el término “error como función del espacio ($\epsilon(s)$) el cual considera se Normal Multivariado con media cero y matriz de covarianzas descrito por un variograma isotrópico. Debido a que en [3] el modelo utilizado en la modelación de temperatura no utiliza covariables relacionadas con el espacio, esta información solo radica en $\epsilon(s)$ que es un proceso estacionario (homogéneo en el espacio).

3. Caso de Estudio

En esta sección ajustamos el tipo de modelo descrito para obtener las predicciones de temperatura diaria usando las predicciones numéricas originadas por el modelo determinista de mesoescala, denominado MM5.

En esta sección describimos las características de los datos, posteriormente presentamos los modelos usados y finalmente las evaluaciones de las predicciones obtenidas.

3.1. Datos

Para estimar el modelo usamos las temperaturas observadas (en grados Kelvin) y sus predicciones deterministas durante el periodo de enero del 2001 a diciembre del 2002 en 198 estaciones meteorológicas situadas en el noroeste de Estados Unidos y suroeste de Canadá. En la Figura 1 se muestra la localización de estas y su altura con respecto al nivel del mar (de acuerdo a sus cuartiles).

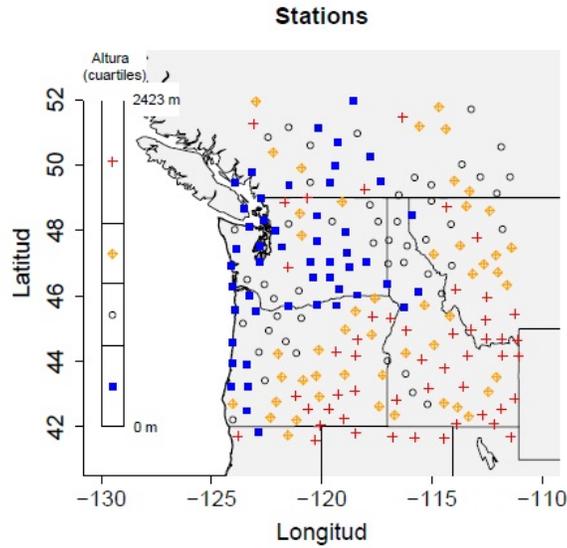


Figura 1: Localizacion de las 198 estaciones metereologicas.

Las predicciones numéricas de temperaturas están realizadas con 48 horas de anticipación, utilizando el modelo meteorológico de mesoescala MM5 desarrollado por el Centro de Investigación Nacional de la Atmósfera en Pensilvania.

Las temperaturas observadas y sus predicciones numéricas corresponden a la lectura diaria hechas a las 0hrs con respecto al meridiano de Greenwich.

La información correspondiente al periodo enero-diciembre 2001 se uso para entrenar el modelo y estimar los parámetros, mientras que la información del año siguiente se utilizó para evaluar las predicciones hechas con los parámetros obtenidos.

En el Cuadro 1 se presentan un resumen de las variables correspondientes al año 2001.

Cuadro 1: Resumen de las variables (198 estaciones, 2001).

	Temp. observada	Temp. predecida	Longitud	Latitud	Altitud
Min	237.6	254.3	-124.1	41.58	0
1er cuartil	276.5	275.2	-121.5	43.82	598
Mediana	284.4	283.0	-118.4	46.11	1058
Media	285.4	283.6	-118.0	46.16	1046
3er cuartil	294.3	291.8	-114.5	48.27	1502
Max	316.5	311.1	-111.0	51.96	2423

3.2. Modelo

Para obtener las predicciones de las temperaturas en cada una sitio s ($s \in \{1, \dots, S\}$), además de considerar a las predicciones $\tilde{Y}(s, t)$, se incorporaron las coordenadas estaciones metereológicas (en terminos de longitud, latitud), su altura y el periodo del año. Formalmente, el modelo es:

$$Y(t) = \text{diag}(\alpha_1, \dots, \alpha_S)\tilde{Y}(t) + W\beta + \text{sen}(t^*\pi)\delta + \epsilon \quad (2)$$

donde W es la matriz cuyas columnas son los vectores: $1_{|S| \times 1}$, longitud, latitud y altitud. El parámetro t^* es la fracción del año al que el día t corresponde. Es decir, $t^* = \text{día del año}/365$.

Como se puede observar, el término $X(t)$ en (1) se presenta descompuesto en dos partes, una que es constante con respecto al tiempo y otra que es serie trigonométrica. En la notación del modelo general se tiene $X(s_i, t^*) = (W[s_i]|\text{sen}(t^*\pi))$, $s_i \in \{1, \dots, S\}$.

El siguiente nivel del modelo corresponde a la especificación de la distribución de sus parámetros. En este nivel definimos dos diferentes modelos. El que llamamos *Modelo 1* contempla:

$$\alpha \sim \text{Normal.Mult}(\mu_\alpha, \text{diag}(\sigma_\alpha^2)), \quad \sigma_\alpha^2 = (\sigma_{\alpha_1}^2, \dots, \sigma_{\alpha_S}^2) \quad (3)$$

$$\beta \sim \text{Normal.Mult}(\mu_\beta, \text{diag}(\sigma_{\beta_0}^2, \sigma_{\beta_1}^2, \sigma_{\beta_2}^2, \sigma_{\beta_3}^2)) \quad (4)$$

$$\delta \sim \text{Normal.Mult}(\mu_\delta, \text{diag}(\sigma_\delta^2)), \quad \sigma_\delta^2 = (\sigma_{\delta_1}^2, \dots, \sigma_{\delta_S}^2) \quad (5)$$

$$\epsilon \sim \text{Normal.Mult}(0, \sigma_Y^2 I) \quad (6)$$

Por otro lado, la distribución de las los parámetros correspondientes a las medias y las varianzas, en las expresiones anteriores, se consideran ser las independientes conjugadas:

$$\begin{aligned} \mu_\alpha &\sim \text{Normal.Mult}(1, a_1) \\ \sigma_{\alpha_i}^2 &\sim \text{Gamma.Inversa}(b_1, c_1), \quad i \in \{1, \dots, S\} \\ \mu_\beta &\sim \text{Normal.Mult}(0, a_2) \\ \sigma_{\beta_i}^2 &\sim \text{Gamma.Inversa}(b_2, c_2), \quad i \in \{0, 1, 2, 3\} \\ \mu_{\delta_i} &\sim \text{Normal.Mult}(0, a_3) \\ \sigma_{\delta_i}^2 &\sim \text{Gamma.Inversa}(b_3, c_3), \quad i \in \{1, \dots, S\} \\ \sigma_Y^2 &\sim \text{Gamma.Inversa}(b_4, c_4), \end{aligned}$$

donde $a_1, a_2, a_3, b_1, \dots, b_4, c_1, \dots, c_4$ son tales que las distribuciones son muy dispersas. En este caso se consideraron ser iguales a $a_1 = a_2 = a_3 = 1000$, $b_1 = \dots = b_4 = 0.005$ y $c_1 = \dots = c_4 = 0.001$.

El segundo modelo que estudiamos tiene especificación similares en el segundo nivel. Este modelo, al que llamamos *Modelo 2*, utiliza las mismas relaciones (2) y (6), pero no así (3), (4) y (5), que se substituyen, respectivamente, por:

$$\begin{aligned}\alpha &\sim N(\mu_\alpha, \Sigma_{\lambda_\alpha}) \\ \beta &\sim \text{Normal.Mult}(\mu_\beta, \sigma_\beta^2 I_{4 \times 4}) \\ \delta &\sim N(\mu_\delta, \Sigma_{\lambda_\delta})\end{aligned}$$

donde las matrices de correlación Σ 's, parametrizada con respecto a x , denotan a la matrix con elemento i, j :

$$[\Sigma_x]_{i,j} = [\exp^{-\text{dist}(s_i, s_j)/x}],$$

y donde $\text{dist}(s_i, s_j)$ es la distancia entre las estaciones s_i y $s_j \in \{1, \dots, S\}$.

Debido a que se introducen las nuevas variables λ_α y λ_δ , es necesario especificar una distribución a priori para ellas. Como no existe información previa de los valores de estos parámetros, se considera que sus a priori se distribuyen uniformemente sobre un rango de valores lo suficientemente amplio que incluyan sus valores plausibles. Con el fin, además de utilizar directamente el muestreo de Gibbs, se les tiene que imponer a estas distribuciones la restricción de ser uniformes pero sobre un soporte discreto. Esto debido a que la función Σ_x no es lineal en el parámetro. Esta restricción no resta flexibilidad al modelo cuando el soporte de las variables tienen puntos que son cercanos entre sí. Para esta aplicación, ambas se consideran ser uniformes en el conjunto de valores discretos $\{0.001, 0.501, 1.001, \dots, 100\}$.

Aunque el Modelo 1 es muy flexible, permitiendo describir diversos escenarios de interacción de las variables, el Modelo 2 no solo introduce la posibilidad de que los parámetros α y β estén correlacionados, sino que ellos están descritos bajo la idea de que deben tener tendencias similares si las estaciones son cercanas.

El segundo modelo además considera que la variabilidad de los coeficientes β no es significativamente diferente, por lo que se toma un solo parámetro σ_β^2 .

3.3. Resultados

El modelo jerárquico se resuelve utilizando la metodología denominada *muestreo de Gibbs* y su idea central es obtener estimaciones de las distribuciones a posteriori basadas en las marginales a posteriori que se asumen ser independientes.

A partir de las simulaciones de las a posteriori marginales entonces se puede recuperar simulaciones de las predicciones y con base en estas, obtener intervalos de probabilidad.

Este proceso se realiza utilizando los valores de la variables para el año 2002. Es decir, utilizamos todas las variables, temperaturas diarias, predichas y observadas, que corresponden al año 2002 y usando los parámetros simulados obtenidos con el

conjunto de datos de entrenamiento se obtienen las simulaciones de predicciones para el 2002.

Usamos dos criterios para verificar y evaluar las predicciones probabilistas obtenidas: su calibración y grado de afinamiento (*sharpness*).

La calibración del modelo se refiere a la similitud entre el porcentaje de cobertura y el nivel de los intervalos de predicción. Entonces si el proceso es calibrado, por ejemplo, se espera que aproximadamente un 90% de las temperaturas observadas caigan en el intervalo de predicción de nivel 90%.

Como puede observarse en los Cuadros 2 y 3, tanto el Modelo 1 como el Modelo 2 tienen un calibramiento aceptable.

Cuadro 2: Modelo 1. Resultados de predicciones (2002).

Nivel	Cobertura	Promedio long. Intervalo	Mínima long.	Máxima long.
90 %	87.03 %	9.79	8.66	10.98
80 %	73.91 %	7.64	6.81	8.47
70 %	69.34 %	6.18	5.45	6.99

Cuadro 3: Modelo 2. Resultados de predicciones (2002).

Nivel	Cobertura	Promedio long. Intervalo	Mínima long.	Máxima long.
90 %	87.02 %	9.79	8.71	11.03
80 %	78.17 %	7.63	6.67	8.54
70 %	69.44 %	6.17	5.40	6.95

El grado de afinación o exactitud de la predicción, se define en términos de la longitud media de los intervalos de predicción. En los Cuadros 2 y 3 estas se obtiene también para tres niveles y se observa que para ambos modelos ajustados estas son muy similares.

Además de los dos criterios anteriores para evaluar el desempeño de los modelos, utilizamos los histogramas de rango como herramienta para verificar las predicciones probabilistas [1, 6]. El proceso que se sigue para su construcción es el siguiente: Primero se obtienen $n - 1$ predicciones basadas en el modelo ajustado: $\{p_{s_i,1}, \dots, p_{s_i,n-1}\}_{s_i \in \{1, \dots, S\}}$. Posteriormente las predicciones se ordenan de menor a mayor y para cada sitio, con el fin de construir los rangos (o casillas):

$$\{(0, p_{(s_i,1)}), \dots, (p_{(s_i,1)}, M)\}_{s_i \in \{1, \dots, S\}},$$

donde M es un valor lo suficientemente grande para rebasar cualquier observación de temperatura.

Si las predicciones probabilistas usadas para la creación de los rangos o casilla provienen, aproximadamente de la distribución que genera las temperaturas observadas durante el año, entonces las observaciones reales caerán en cualquiera de

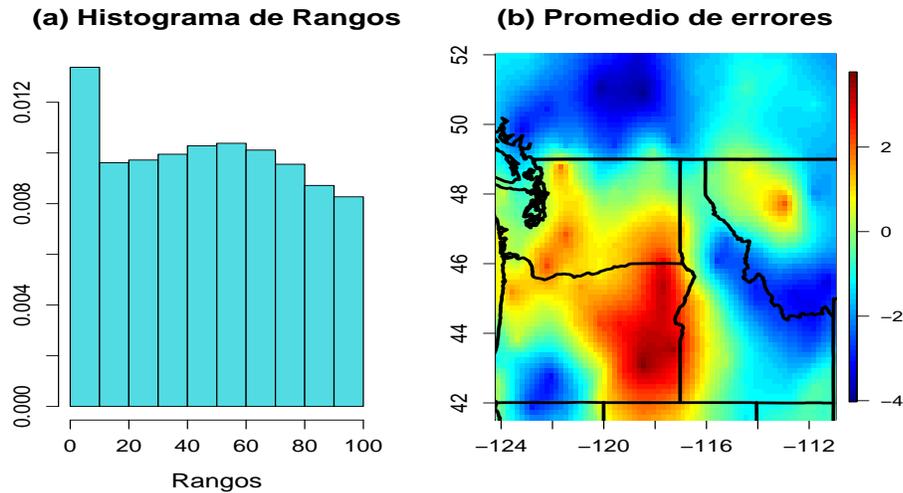


Figura 2: Graficas auxiliares para evaluar el Modelo 1.

sus n casillas casi con la misma probabilidad. Debido a esto, un histograma de rangos que sea uniforme indica que el modelo genera coberturas apropiadas para las observaciones.

En las Figuras 2(a) y 3(a) se presentan los histogramas de rangos obtenidos por los Modelos 1 y 2. Como se puede apreciar, ambos son más o menos uniformes, excluyendo la primera casilla. La alta frecuencia en ésta indica que los modelos, en promedio, tienden a sobreestimar la temperatura.

4. Discusion y Conclusiones

La calibración de ambos modelos es similar y aceptable en términos de la cobertura y afinamiento, sin embargo en ambos también persiste un ligero sesgo de predicción. Las predicciones, en este ultimo sentido, son entonces imperfectas, sin embargo si se comparan estos resultados con los que GOP genera, los primeros son mucho mejores. Considerando el mismo conjuntos de datos que se han utilizado, GOP genera intervalos de predicción de 90% que tienen una cobertura de tan solo 26.55%.

El bajo desempeño de GOP se debe principalmente a que la hipótesis de homogeneidad espacial es seriamente violada al considerar regiones tan grandes que abarcan lugares en los estados de de Washington, Oregon, Idaho, Montana, British Columbia y Alberta.

Por otro lado, es importante recalcar que el Modelo 1 tiene un total de $4S + 9$

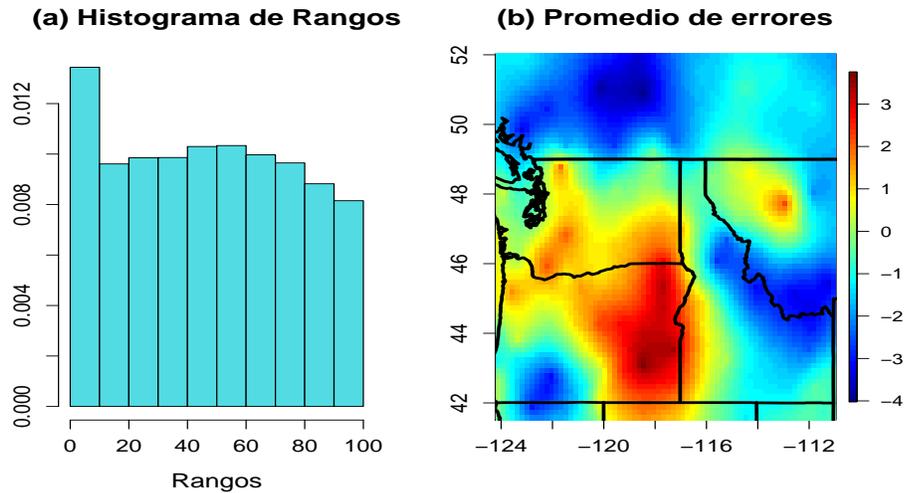


Figura 3: Graficas auxiliares para evaluar el Modelo 2.

parámetros mientras que introduciendo la estructura de correlación espacial, el Modelo 2 reduce esta cantidad a $2S + 10$. El costo que computacionalmente tiene el Modelo 1, hace que en muchos casos se prefiera utilizar el Modelo 2. Esta ventaja se enfatiza si se incluyen más estaciones, debido a que el número de parámetros crece con cada nueva que se incorpora.

Referencias

- [1] J. L. Anderson, A Method for Producing and Evaluating Probabilistic Forecasts for Ensemble Model Integrations. *Journal of Climate*, **9**, 1995.
- [2] M. Ehredorfer, Predicting the Uncertainty of Numerical Wather Forecasts: A Review. *Meteorologische Zeitschrift N.F.* **6**, 1997.
- [3] Y. Gel, A. E. Raftery and T.Gneiting, Calibrated Probabilistic Mesoscale Weather Field Forecasting: The Geostatistical Output Perturbation Method. *JASA* **99** (467), 2004.
- [4] A. Gelman, J. B. Carlin, H. S. Stern y D. B. Rubin, *Bayesian Data Analysis*. Second Edition. Chapman & Hall, 2004.
- [5] A. Gelman y J. Hill, *Data Analysis Using Regression and Multi-level/Hierarchical Models*. Cambridge University Press, 2007.

- [6] T. M. Hamill, Interpretation of Rank Histograms for Verifying Ensemble Forecasts. *Monthly Weather Review*. **129** (3), 2001.
- [7] T. N. Palmer, Predicting Uncertainty in Forecasts of Weather and Climate. *Reports on Progress in Physics* **63**, 2000.
- [8] C. K. Winkle, L. M. Berliner and N. Cressie, Hierarchical Bayesian Space-Time Analysis. *Journal of Environmental and Ecological Statistics* **5**, 1998.

Muestreo por conjuntos ordenados (Ranked Set Sampling) y su aplicación en población de maguey silvestre.

Lorena Alonso Guzmán¹

Carlos N. Bouza²

Dante Covarrubias Melgar¹

¹Unidad Académica de Matemáticas, Universidad Autónoma de Guerrero,

²Universidad de la Habana

Av. Lazaro Cardenas S/N, C. U.

Chilpancingo, Gro., México

e-mail: alonso@uagro.mx, dcova@uagro.mx, bouza@matcom.uh.com

Resumen

Hasta hace pocos años, la industria del mezcal se desarrolló bajo el supuesto de que disponían de un recurso auto-renovable. Sin embargo, poco a poco, los productores de mezcal se han percatado de la declinación de las poblaciones naturales de maguey papalote (*Agave cupreata* Trel & Berger) y, por tanto, han adquirido conciencia de la necesidad de implementar algunos proyectos que permitan recuperar áreas y poblaciones de maguey papalote, que garanticen la sustentabilidad de la materia prima de la industria. En este trabajo se retoma la propuesta de Alonso *et al.* [1], para aplicar el método de Muestreo por conjuntos ordenados por rangos (Ranked Set Sampling (RSS)) como una alternativa para el muestreo en población de maguey silvestre, como es el caso de las poblaciones naturales de maguey papalote (*Agave cupreata* Trel. & Berger) que se tiene en el Estado de Guerrero. Mediante este método se implemento un estudio estadístico cuyos resultados del RSS, fue la estimación de el área de cobertura del maguey papalote y teniendo como variable auxiliar la altura de la planta, dando una precisión relativa muy cercana al parámetro medido, donde dicha estimación nos sitúa a recuperar áreas de la población de maguey papalote, lo que nos permite reorientar las actividades agroindustriales en Guerrero.

Palabras Clave: Diseño, muestreo, media, mezcal agroindustrial.

1. Introducción

Sectores gubernamentales y sociales en México y otros países, han tenido la necesidad de estudiar las relaciones entre los sistemas naturales y la sociedad, esto para la protección del medio ambiente, lo que exige información y conocimiento espacio-temporal, creíble y defendible, (Bahamondez *et al.* [2]; Gruijter *et al.* [9]; Covarrubias [6]), en este caso el maguey papalote, este estudio necesario debido al incremento de la demanda tanto interna, como externa del maguey papalote, por

lo que una técnica de muestreo es el Muestreo por Conjuntos Ordenados de Rango (MCO) o como se conoce en ingles Rank Set Sampling (RSS).



Figura 1: Agave Cupreata Trel & Berger (Maguay papalote)

El método de Muestreo por conjuntos ordenados por rangos (Ranked Set Sampling (RSS)), fue propuesto inicialmente por McIntire [12], al trabajar en un problema de forraje. La similitud de los problemas de estimación de la producción de forraje y la asociada al maguay es evidente, dado que se desea conocer la estimación de la media poblacional de cabezas de maguay, esto para mejorar la precisión de la media muestral, como estimador de la media poblacional, cuando la variable de interés es difícil y costosa de medir; Patil [13], retoma el RSS presentando diferentes algoritmos de implementación; así mismo Bouza [4] sugiere aplicaciones del RSS en el área de biometría, particularmente para problemas de ecología en los cuales se requiera combinar algún control y flexibilizar la aleatoriedad dada por los diseños de muestreo.

1.1. Maguay papalote un recurso agroindustrial

El cultivo y producción del Agave cupreata Trel *et* Berger se da en su mayoría en zonas silvestres, la cual se realiza en Guerrero cuyo Estado está constituido por 77 municipios, los cuales integran siete regiones, Acapulco, Región Tierra Caliente, Región Norte, Región Centro, Región Montaña, Región Costa Grande y Región Costa Chica. Esta investigación hace referencia a la Región Centro en donde se realizó un reporte técnico cuyo nombre fue “Desarrollo de un Sistema de Inventario y Monitoreo de Maguay Papalote (Agave cupreata Trel. & Berger)”, (SIMMP), en el 2004, con el fin de realizar una simulación partiendo de datos auténticos. Cabe mencionar que el maguay papalote es endémico del Estado de Guerrero, (para más información ver, Gentry [8]; Maradiaga [11]; SAGARPA [14]).

Un problema en particular en el Estado de Guerrero es la falta de información registrada sobre maguay papalote, debido a que es una planta que crece de manera natural encontrándose en zonas de difícil acceso, por lo que se hace necesario el uso de una metodología que contenga estrategias eficientes para la recolección de la información y el análisis estadístico. Esto es de suma importancia debido a la creciente

extracción del *Agave cupreata* Trel *et* Berger que esta tomando en estos tiempos.

1.2. Planteamiento del problema

El visible aumento de la demanda de mezcal se debe a la tendencia de mantener las tradiciones y las costumbres, además el gran auge que ha tenido el tequila ha abierto el mercado nacional e internacional, para los diferentes mezcales de México; particularmente la demanda en Guerrero del maguey papalote (*Agave cupreata* Trel *et* Berger).



Figura 2: Maguey papalote en la comunidad de Mazatlán, Gro.

Los problemas que enfrentan los productores de mezcal en Guerrero, son el desconocimiento a corto y mediano plazo de disponibilidad de magueyes debido a la carencia de un sistema de inventario, monitoreo ágil y confiable de las dinámicas de las poblaciones naturales de dicha especie.

Con base en las estrategias metodológicas del muestreo se propone un muestreo, que permitirá a cada productor inventariar la producción de cada espacio.

1.3. Objetivo

El objetivo general de la investigación es proponer el muestreo por conjuntos ordenados de rangos, como técnica de muestreo adecuada para implementar un inventario de poblaciones de maguey papalote, que pueda proporcionar periódicamente la información sobre el estado en que se encuentran y que contribuya a orientar las actividades productivas y de conservación hacia el desarrollo rural sustentable en el Estado de Guerrero.

Los resultados a obtener son:

- Estimar el total de cabezas de maguey papalote en la región centro del Estado de Guerrero.



Figura 3: Magueyera natural en Ojitos de agua (Tixtla de Guerrero)

- Comparar la precisión relativa del muestreo por conjuntos ordenados con respecto al Muestreo Aleatorio Simple, utilizando datos proveniente del reporte técnico “Desarrollo de un Sistema de Inventario y Monitoreo de Maguey Papalote (*Agave cupreata* Trel. & Berger)”.

2. Como llevar a cabo un MCO en un inventario de maguey silvestre

Bouza [3], el método, conocido como Muestreo por Conjunto Ordenados (MCO), se realiza utilizando información inicial para obtener una muestra representativa ante lo real. Para poblaciones con distribuciones desiguales que son caras para muestrear el MCO es recomendable, debido a que puede llevar a una mayor precisión, disminución de toma de muestras, gastos, o ambas cosas.

1. En primer lugar se selecciona una muestra aleatoria de m individuos o unidades muestrales independientes y por observación directa se selecciona aquella que sea la menor en cuanto a la característica usando una predicción de ella, que se está estudiando, y deseamos $m - 1$ observaciones,
2. luego repetimos el procedimiento y volvemos a seleccionar una muestra aleatoria de individuos y de esta seleccionamos la más pequeña, hasta tomar en total m muestras de tamaño m , de cada una se considera una sola observación la que ocupa el lugar m -ésimo al ordenar. Obteniendo al final una muestra de tamaño m , a este procedimiento se le conoce como ciclo. Usando MAS y se asignan a un conjunto.
3. El resultado final es la obtención de una muestra de observaciones ordenadas de tamaño m . Este ciclo puede repetirse r veces habiendo entonces seleccionados de rm^2 observaciones, un total de rm observaciones ordenadas, por lo que $n = mr$, con su respectivo rango, y desechadas un total de: $r(m - 1)$ observaciones.

Patil [13], define, cuando los tamaños de las muestras son iguales en cada iteración entonces se dice que es una muestra de conjuntos ordenados balanceada en caso contrario es no balanceada, es decir de acuerdo a Bouza [4], $r_i = r$.

Las propiedades de los estimadores no se alteran:

$$\hat{X}_{mco} = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \hat{X}_i \quad (1)$$

La varianza estimada puede verse en Cheng-Sinha [7]:

$$\hat{V}(\hat{X}_{mco}) = \frac{\hat{X}_{mcoj}}{r} = \frac{\frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^r (\hat{X}_{mcoj} - \hat{X}_{mco})^2}{r} \quad (2)$$

Un estimador alternativo de varianza:

$$\hat{V}(\hat{X}_{mco}) = \frac{1}{mr^2} \sum_{i=1}^m \hat{S}_i^2 \quad (3)$$

con

$$\hat{S}_i^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^r (X_{ij} - \hat{X}_i)^2 \quad (4)$$

Si el diseño no es balanceado los denominadores varían:

$$\hat{V}(\hat{X}_{mco}) = \frac{1}{rm^2} \sum_{i=1}^m \hat{S}_i^2 \quad (5)$$

2.1. Precisión Relativa

Patil [13], comenta que, si las mediciones de las muestras son independientes (aleatorio) e idénticamente distribuidas obtenidas a través del rango perfecto puede conducir a un rendimiento óptimo de MCO; no importando cuánto se desvíen estas características deseables, la eficiencia de muestreo nunca será peor que con MAS, utilizando el mismo número de cuantificaciones. De hecho, cuando la eficiencia se expresa como la precisión relativa (PR):

$$PR = \frac{\text{varianza de la Media muestral con MAS}}{\text{varianza de la Media muestral con MCO}} = \frac{\hat{V}(\hat{X}_{mas})}{\hat{V}(\hat{X}_{mco})}, \quad (6)$$

o el equivalente *ganancia relativa*, propuesta por Takahasi y Wakimoto [15] tomado de Kaur *et al.* [10],

$$GR = 1 - \frac{1}{PR} \quad (7)$$

Takahasi y Wakimoto [15] establecen límites inferior y superior sobre el rendimiento de \hat{X}_{mco} relativo a MAS. Para la *asignación balanceada*, se tiene:

$$1 \leq PR \leq \frac{m+1}{2} \quad (8)$$

y

$$0 \leq GR \leq \frac{m-1}{m+1} \quad (9)$$

donde m es el tamaño del conjunto. Dado que PR no puede ser menor que uno, el protocolo del MCO no puede ser peor que el protocolo del MAS.

Kaur *et al.* [10], establecen adicionalmente, que se alcanza el límite inferior si y sólo si la distribución acompañada es degenerada. En particular el muestreo por conjuntos ordenados por rangos (con rango perfecto) siempre funciona mucho mejor que

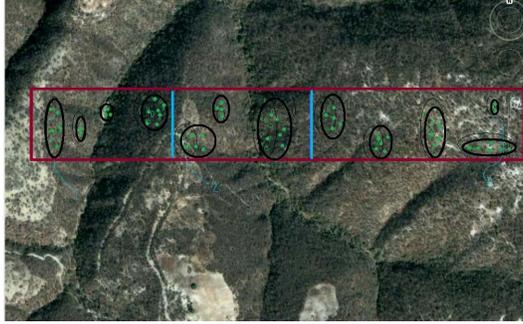


Figura 4: MCO y línea de transectos en Xochipala, Gro.

el MAS. El límite superior es calculado equivalentemente si y sólo si la distribución acompañante es rectangular. Para la asignación Neyman los límites son:

$$0 \leq PR \leq m, \quad (10)$$

Señalando que, con una asignación desigual apropiada, el PR aun puede aumentar para un nivel de m , y no sólo $(m + 1/2)$ como en el caso con asignación igual.

$$1 \leq GR \leq \frac{m-1}{m} \quad (11)$$

Kaur *et al.* [10] afirman que, la asignación desigual realmente puede aumentar la función de MCO mucho más allá que con asignación igual estándar; sin embargo, en caso de que no sea correctamente aplicada, la función de MCO puede ser peor que la función del MAS, esto establece que el muestreo estratificado sea mejor que el MCO. Realmente, los saltos en PR con asignación desigual son adecuados.

2.2. Muestreo MCO combinado con Línea de Transectos

Bouza [4] comenta que, un método de muestreo de campo común para la evaluación ecológica es incluir unidades de muestra que se encuentra a lo largo de una línea (transecto), el cual, es seleccionado aleatoriamente dentro de un área bidimensional de interés. Las unidades normalmente son miembros de una especie de planta o animal (en este caso es la población de maguey papalote).

Patil [13] refiere que, a menudo el número de unidades de muestra identificado son demasiado numerosos para seleccionar todos y cada uno para su cuantificación, especialmente si las mediciones son destructivas, como con el corte de vegetación para pesa. Si inicialmente las unidades de muestreo identificados son tratados como una primera fase de muestreo, $n' = m_2 r$, a continuación, se puede aplicar el protocolo MCO para seleccionar una submuestra más pequeña, $n = m r$, para la actual cuantificación. Por ejemplo, considere un ciclo de muestreo sólo cuando el tamaño del conjunto m equivale a tres para estimar la biomasa de magueyes en una zona determinada. Una línea de transecto para esta situación puede visualizarse en la Figura 4.

Tal es un ejemplo de Línea de Transecto basada en MCO se ha encontrado para un muestreo más preciso, y aún los estimadores insesgados de la media poblacional, el tamaño, y la cobertura total, en comparación con el MAS basada en línea de transecto de la muestra.

3. Resultados y discusión

3.1. Simulación

Se realizaron experimentos de Monte Carlo utilizando los datos de la investigación SIMMP, los cuales se obtuvieron de una investigación aplicada en la Región Centro del Estado de Guerrero, México, particularmente en la organización llamada Xochicalehualactl (Figura 5). Se identificaron seis etapas de desarrollo del maguey papalote (ver Tabla 1). Se colectaron 7625 plantas de maguey papalote. Los métodos indirectos empleados fueron recorridos a pie sobre transectos y muestreo por círculos de $300m^2$.

Etapa de desarrollo	Edad estimada
Plantula	1 a 7
Juvenil	2 a 12
Velilla	5 a 13
Adulto	10 a 12
Calehual	10 a 14
Capón	8 a 15

Tabla 1: Características del Maguey papalote

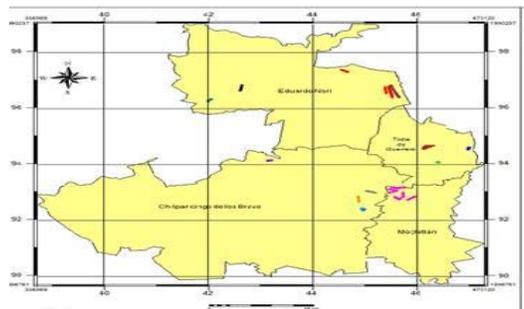


Figura 5: Unión de Productores de Mezcal Xochicalehualactl de Guerrero

3.2. Aplicación

Para examinar la estrategia de muestreo, se procede al siguiente ejercicio: Se utiliza la información del SIMMP, para generar una base de datos aleatorios similar a la original, de esta base se retiran los agaves que estén en etapa plántula y sobre este universo se establece el MCO. Se procede a realizar en forma computacional 500 repeticiones independientes del proceso completo que implica la selección de la etapa del maguey, la edad, la cobertura aérea y tipo de vegetación. Sabiendo que la tasa final de maguey apto para labrar en el 2004 es de 5876 plantas, en la zona centro.

Los resultados del análisis de la variación del estimador de la cobertura área y número de magueyes para los métodos de muestreo por MAS de la Tabla 2, muestra que no existen diferencias significativas, por lo que, es más preciso el MCO.

Muestra	Cobertura	Total poblacional
Parámetro	3437.64m ²	5876
MAS	4690.568m ²	5511
MCO	4067.761m ²	5866

Tabla 2: Cobertura aérea especial

Para los resultados de eficiencia y ganancia relativa entre métodos indica que el MCO es más eficiente, que el MAS, esto se observa en la Tabla 2.

Muestreo	Error	Presición relativa	Ganancia relativa
MAS	0.38	1.0	
MCO	0.96	0.85	92.3

Tabla 3: Presición y ganancia relativa

4. Conclusiones

El método de muestreo por conjuntos ordenados por rangos es de fácil aplicación y se puede aplicar tanto en terreno llano, como de pendientes bruscas, combinando muestreo de líneas por transectos. Este muestreo se recomienda para determinar la densidad y cobertura del maguey papalote.

Se debe tener en cuenta el patrón espacial del maguey papalote, si la dispersión afecta notablemente al muestreo, por lo que debe ser considerada para realizar un diseño adecuado.

El método debe ser escogido de acuerdo con la variabilidad de la población del maguey papalote en estudio, para que los resultados obtenidos sean confiables. Un buen método de muestreo es aquel con el que se obtiene mayor precisión en las estimaciones al menor costo, coincidiendo con Cochran [5].

Las discusiones que se hacen para una estrategia de muestreo eficiente, aplicado al inventario de maguey papalote y a la investigación en general son:

1. El método debe ser escogido de acuerdo con la variabilidad de la población del maguey papalote en estudio, para que los resultados obtenidos sean confiables.
2. De acuerdo a los resultados obtenidos, queda claro la necesidad de ampliar la investigación hacia otras regiones, donde se contemplen otros tipos de vegetación y clima.

La abundancia de Maguey silvestre en el Estado de Guerrero, así como el alto grado de participación social obliga a identificar las nuevas necesidades de información, establecer nuevos conceptos para las evaluaciones del maguey papalote y ajustar los sistemas existentes para cumplir con los nuevos desafíos que han emergido de los cambios en los paradigmas; donde los términos técnicos, agrícolas y agroindustriales, así como económicos apenas empiezan a introducirse y a ser utilizados por los técnicos y las organizaciones de productores mas desarrolladas.

Finalmente, para poder clasificar el área de distribución natural del maguey por calidad de sitio, se requiere el establecimiento de parcelas permanentes dentro de las magueyeras, que permita inventariar y regular el establecimiento, velocidad de desarrollo y maduración del maguey papalote.

Referencias

- [1] Alonso L., Covarrubias D., y Maradiaga F., (2009). Estrategias de Muestreo Implementadas en el Inventario de Maguey Papalote (*Agave cupreata* Trel & Berger), Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias, No publicada, Universidad Autonoma de Guerrero, México.
- [2] Bahamondez C., Lorenz M., Mery G. y Varjo Journal, (2005). Forest Assessment for Changing Information Needs, IUFRO World Series, España.
- [3] Bouza C. N., (2001). Model Assisted Ranked Survey Sampling: An annotated bibliography, *Biometrical J.*, 43, 249-259.
- [4] Bouza C. N., (2009). El Muestreo por Conjuntos Ordenados por Rangos y las Perspectivas de su Uso en Biometría. Memoria 2do. Encuentro Iberoamericano de Biometrics, Núm. 2, 32-33, Boca del Río, Veracruz, México.
- [5] Cochran, W.G., (1977). *Sampling Techniques*, CECSA, México.
- [6] Covarrubias D. (2007). “Modelos de Muestreo para la Estimación de Índices de Diversidad”. Tesis para obtener el grado Científico Doctor en Ciencias Matemáticas, No publicada, Facultad de Matemática y Computación, Universidad de la Habana, Cuba.
- [7] Chen Z., Bai Z., and Sinha K. B. (2004). *Ranked Set Sampling*, Springer, New York.
- [8] Gentry H. (1982). *Agaves of Continental North America*, The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, U.S.A.
- [9] Gruijter J., Brus D., Bierkens M. and Knotters M. (2006). *Sampling for Natural Resource Monitoring*, Springer, Berlin.
- [10] Kaur A., Patil G. P., Sinha A. K. and Taillie C., (1995) Ranked Set sampling: An Annotated Bibliography., *Environmental and Ecological Statistics* 2, 25-54.

- [11] Maradiaga C. F. S. (2004). Desarrollo de un Sistema de Inventario y Monitoreo de Maguey Papalote (*Agave cupreata* Trel. & Berger) en el Estado de Guerrero, Fundación PRODUCE Guerrero A.C., Programa de Recursos Biológicos Colectivos (CONABIO) e Instituto de Investigación Científica Área Ciencias Naturales de la UAGro. Chilpancingo, Gro., México.
- [12] McIntre G. A. (1952). A Method for Unbiased Selective Sampling Using Ranked Set, *Journal of Agricultural Research* Num. 3, 385-390, Australian.
- [13] Patil G. P. (2002). Ranked Set Sampling., *Encyclopedia of Environmetrics*, John Wiley & Son, Num. 3, 1684-1690.
- [14] SAGARPA. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola, Varios años.
- [15] Takahasi K. and Wakimoto, (1968). On Unbiased Estimates of Population Mean Based on the Sample Stratified by Means of Ordering, *Geoderma*, vol. 62, 233-246.

Predictores de las concentraciones de manganeso en interiores de viviendas en dos comunidades rurales de un distrito manganesífero, Hidalgo, México.

Marlene Cortez Lugo¹
Sandra Rodríguez Dozal¹
Victor Miranda Soberanis¹
Irma Rosas²

Horacio Riojas Rodríguez¹

¹Instituto Nacional de Salud Pública.

²Universidad Nacional Autónoma de México.

*Ave. Universidad 655, Col. Sta. Ma. Ahuacatlán,
Cuernavaca, Mor. 62100, México,
e-mail:cmarlene@insp.mx*

Resumen

Se llevaron a cabo muestreos de aire ambiente de $PM_{2.5}$ y análisis de manganeso (Mn) en interiores y exteriores de 10 viviendas, en dos comunidades rurales del estado de Hidalgo, México entre el 2006 y 2007. Las concentraciones de $PM_{2.5}$ interior y exterior fueron realizadas mediante monitores Mini Vol y el contenido de Mn en los filtros fue analizado mediante la técnica de PIXE. Para modelar las concentraciones de Mn en interiores, usamos un diseño de medidas repetidas, ajustando un modelo lineal generalizado mixto. Las concentraciones de Mn en el interior pueden aumentar en un 4.6 % por $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de cambio con respecto a las concentraciones de Mn en el exterior, mantener las ventanas abiertas puede incrementar en un 4.5 % la concentración de Mn en el interior de la vivienda. Nuestros resultados confirman el efecto directo que tienen estas variables en la concentración de Mn en el interior de las casas.

Palabras clave: $PM_{2.5}$, manganeso intramuros, manganeso extramuros.

1. Introducción

El Distrito minero de Molango, situado en el Estado de Hidalgo en México, tiene una reserva de Manganeso (Mn) de 32 millones de ton, es el segundo más grande en Latinoamérica y el quinto en el mundo. El Mn es un micronutriente esencial para diversas funciones del organismo, pero en cantidades elevadas puede afectar el sistema nervioso

central [1]. Estudios epidemiológicos en trabajadores han demostrado una asociación entre disfunciones neurológicas y una exposición acumulada [2],[3]. La exposición excesiva a manganeso está relacionada con una variedad de alteraciones psiquiátricas y motoras [4]. Las comunidades estudiadas fueron seleccionadas a partir de un estudio anterior realizado en el distrito Manganesífero de Hidalgo, debido a que se encontraron niveles de Mn en aire superiores a $0.005 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la población adulta presentó problemas en el sistema motor, además de que su ubicación es muy cercana a la planta de nodulación de Mn [5]. La estimación de la exposición a contaminantes atmosféricos a partir de un modelo estadístico, es una herramienta que permite identificar individuos con alto riesgo, poblaciones susceptibles, así como, desarrollar políticas adecuadas para el control de la exposición. Debido a que el ser humano pasa su día en diferentes sitios (lugares abiertos, lugares cerrados con diferentes tasas de ventilación, etc.) las diferencias en la exposición son sustanciales [6].

2. Objetivo General

El objetivo de este estudio fue modelar la contribución de las fuentes de manganeso atmosférico sobre concentraciones en interiores de una muestra de viviendas pertenecientes a los poblados de Chiconcoac y Tolago en Hidalgo, México.

3. Metodología

Este estudio forma parte de un estudio epidemiológico para evaluar los efectos a la salud debido a la exposición a Mn en niños de 6 a 11 años, llevado a cabo entre el 2006 y 2007 en dos comunidades rurales (Chiconcoac y Tolago) del estado de Hidalgo.

Se recolectó información mediante un cuestionario donde se registraron las actividades horarias de los niños durante las semanas de monitoreo, tales como: el microambiente en donde se encontraba, si las ventanas de las casas estaban abiertas, si tenía exposición al humo de cigarro, etc. También se aplicó un cuestionario de exposición el cual consistía en preguntas sobre características de la casa: tipo de piso, paredes, techo, # de cuartos, tipo de combustible para cocinar, habito de fumar en la familia, etc. Se llevaron a cabo muestreos de aire ambiente de $PM_{2.5}$ y análisis de Mn en interiores y exteriores de 10 viviendas.

Los monitoreos se realizaron en 2 épocas del año: El primero durante la época de lluvias, el cual cubrió una semana de muestreo durante el mes de agosto 2007 en una de las comunidades y otra semana en el mes de noviembre 2007 en la comunidad aledaña. El siguiente se llevó a cabo durante la época de sequía, en la cual se monitoreo durante una semana en el mes de mayo 2008 en una de las comunidades y otra semana en el mes de junio 2008 en la comunidad aledaña.

Las casas fueron seleccionadas de tal forma que se distribuyeran uniformemente en las comunidades.

Las mediciones de $PM_{2.5}$ en los interiores y exteriores de las casas fueron realizadas mediante equipos Mini Vol (version 4.2; Airmetrics, Eugene, Oregon, USA), durante periodos de 24 hrs. Las muestras fueron colectadas utilizando impactores de separación operados a 5 litros por minuto en filtros de teflón de 47 mm (Gelman R2PJ047). El contenido de

Mn en los filtros se midió con la técnica de PIXE (Protons Induced X-ray Emission). La determinación de la exactitud de los análisis PIXE se realizó usando un conjunto diferente de los estándares MicroMatter, resultando en un error no mayor a 0.7% de los elementos detectados en este estudio.

Las comunidades cercanas a la planta de nodulación de Mn, utilizan el residuo sobrante del procesamiento, que aún tiene hasta 29% de Mn, para revestir los caminos que comúnmente los habitantes utilizan para sus actividades cotidianas. Debido a esto, se consideró la distancia al camino como variable de interés para analizar la influencia de los caminos revestidos con Mn en las concentraciones interiores de las casas.

Para modelar las concentraciones de Mn en interiores, usamos un diseño de medidas repetidas, ajustando un modelo lineal generalizado mixto para analizar los datos. Diferentes análisis de sensibilidad fueron realizados para elegir las variables predictoras que permitieran el mejor ajuste del modelo con base en los diagnósticos del mismo.

Las variables seleccionadas que permitieron el mejor modelo para predecir las concentraciones de Mn en interiores con independencia de las mediciones fueron: las concentraciones de Mn en exteriores, el recíproco de la suma de las distancias a un camino revestido con manganeso, ventanas abiertas durante los días de los muestreos y variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa y velocidad del viento).

La fecha de medición fue usada como indicadora de la tendencia del tiempo.

Estimamos el porcentaje de incremento de las concentraciones de Mn en interiores considerando las 2 estaciones del año del estudio, y estratificando por estación de lluvias (Agosto - Noviembre 2006) y estación de secas (Mayo - Junio en 2007) con modelos univariados y multivariados asumiendo una estructura de covarianza AR(1). El término de interacción estación*interior en la concentración de Mn fue incorporado en el modelo con el objetivo de explorar el efecto estadístico de la estación.

4. Resultados y discusión

Un total de 83 mediciones simultáneas de $PM_{2.5}$ en interiores y exteriores fueron colectadas, durante el periodo de estudio, correspondientes a 10 casas de las comunidades seleccionadas en la muestra.

La concentración promedio de $PM_{2.5}$ y Mn en interiores fue de $46.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Desviación Estándar (DE) 22.7) y $0.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (DE 0.06), respectivamente. La concentración promedio en exteriores para $PM_{2.5}$ y Mn fue de $36.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (DE 14.7) y $0.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (DE 0.06), respectivamente.

Los resultados del análisis de ANCOVA mostraron una diferencia significativa entre las concentraciones de Mn en interiores en la estación de lluvias y en la estación de secas, sugiriendo un análisis estratificado ($p < 0.001$).

De acuerdo a los resultados del modelo de regresión univariado, para Mn en exteriores el coeficiente β fue mayor en la época seca, en comparación con la época de lluvias y con el modelo tomando ambas épocas, en todos los casos se encontró un coeficiente significativo. Para el recíproco de la suma de las distancias a un camino revestido con manganeso, sólo en el modelo con ambas estaciones el efecto resultó significativo. El coeficiente β en el caso de la variable ventanas abiertas fue significativo tanto en el modelo con ambas estaciones como en el de época seca (Figura (1)).

Los resultados del modelo de regresión multivariado para ambas temporadas sugieren

Predictores de las concentraciones de Manganeso en interiores de viviendas durante el estudio y estratificados por estación. Hidalgo, Mexico, 2006 – 2007

	<u>Modelo Univariado</u>			<u>Modelo Mutivariado</u>		
	β^5	CI _{95%}	P-valor	β^5	CI _{95%}	P-valor
<u>Todo el estudio</u>						
Exterior Mn	0.52	(0.343, 0.705)	<0.001	0.45	(0.27, 0.64)	<0.001
Reciproco suma de las distancias	1.53e ³	(511.2, 2.128e ³)	0.004	805	(55.8, 1.55e ³)	0.04
Ventanas abiertas	0.48	(0.055, 0.90)	0.02	0.44	(0.08, 0.80)	0.017
<u>Estación lluvias¹</u>						
Exterior Mn	0.30	(0.04, 0.56)	0.02	0.29	(0.023, 0.55)	0.03
Reciproco suma de las distancias	616	(-1.54e ³ , 2.775e ³)	0.56	607	(-1.358e ³ , 2.567e ³)	0.52
Ventanas abiertas	0.27	(-0.27, 0.81)	0.31	0.31	(-0.208, 0.826)	0.23
<u>Estación secas²</u>						
Exterior Mn	0.73	(0.443, 1.026)	<0.001	0.70	(0.399, 0.997)	< 0.001
Reciproco suma de las distancias	1.42e ³	(-0.798e ³ , 3.64e ³)	0.20	-605	(-2.535e ³ , 1.326e ³)	0.52
Ventanas abiertas	1.05	(0.327, 1.781)	0.006	0.69	(0.110, 1.275)	0.02

¹Epoca de lluvias: Agosto y Noviembre

²Epoca de secas: Mayo y Junio

⁵ Predictor (95%CI). Modelos Univariado y Mutivariado fueron ajustados por el promedio de la temperatura, humedad y velocidad del viento, y la fecha del muestreo. En el modelo multivariado, todas las variables fueron incluidas. El modelo ajustado fue $\text{Log Mn}_{\text{interior}} = -20.5 + 0.45X_1 + 805X_2 + 0.44X_3 - 0.04 X_4 - 0.016X_5 + 0.000326 X_6 + 0.001298X_7$; donde $X_1 = \text{Log Mn exterior del día de muestreo}$, $X_2 = \text{Reciproco de la suma de las distancias a un camino con contenido de Mn}$, $X_3 = \text{Ventanas abiertas durante el día de muestreo (1 o 0)}$, $X_4 = \text{Promedio de la temperatura en cada día de muestreo}$, $X_5 = \text{Promedio de la humedad en cada día de muestreo}$, $X_6 = \text{Promedio de la velocidad del viento en cada día de muestreo}$, y $X_7 = \text{fecha del día de cada muestreo (Time trend)}$.

Figura 1:

que las concentraciones de Mn en el interior aumentan en un 4.6 % (95 % intervalo de confianza=95 %IC= 2.7-6.6 %) por 0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de cambio con respecto a las concentraciones de Mn en el exterior. Asimismo, el efecto de la suma de distancias a los caminos con revestimiento de Mn resultó significativo.

El mantener las ventanas abiertas puede incrementar en un 4.5 % (95 %IC=0.80 - 8.3 %) la concentración del Mn en el interior de la vivienda, por 0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de cambio con respecto a las concentraciones de Mn en el exterior.

La proporción de variabilidad total explicada por el modelo es del 52 % con lo cual, las estimaciones en nuestra población tendrán buena precisión. Asimismo, se incluyeron en el modelo los términos de interacción para probar el efecto de la temporada, resultando éstos significativos; por lo que se ajustaron modelos para las temporadas de sequía y temporada de lluvia.

Los modelos ajustados para la temporada seca mostraron un mayor efecto de la concentración de Mn en el exterior con respecto al modelo correspondiente para temporada de lluvias, mostrando un aumento en las concentraciones de Mn interior de 2.9 % (95 %IC=0.23 - 5.7 %) en temporada lluviosa comparado con un aumento del 7.3 % (95 %IC= 4.1 - 10.5 %) obtenido para la época de secas.

De igual manera, en el análisis por temporada, el efecto de la suma de los caminos dio como resultado un aumento en los niveles de Mn interior solamente en temporada de lluvias (no significativo).

Finalmente, se observó que la variable ventanas abiertas contribuyó significativamente con un aumento en los niveles de Mn interior solamente en la época de secas. El incremento estimado atribuible al hecho de mantener las ventanas abiertas fue de 7.1 % (95 %IC=1.1 - 13.6 %), comparado con no tener las ventanas abiertas.

Todos los modelos, fueron ajustados por temperatura, humedad y velocidad promedio del día de muestreo y temporalidad.

Al graficar los datos predichos contra los observados, la tendencia muestra una buena capacidad de predicción del modelo (coeficiente de correlación, $R=0.7$) (Figura (2)).

Scatter plot de observados Vs predichos de las concentraciones promedio de 24h de Mn en $PM_{2.5}$

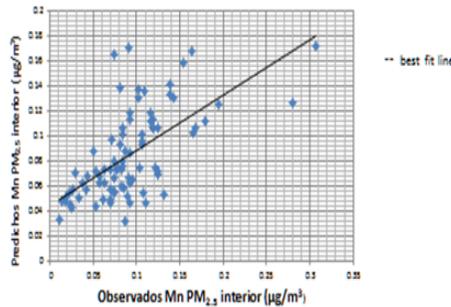


Figura 2:

Nuestro diseño (metodología, modelo estadístico, etc), nos permite determinar si el efecto en las concentraciones interiores de Mn se debe a una fuente exterior o interior puesto que incluimos en nuestro modelo variables que potencialmente pueden modificar tal efecto, es decir, identificamos las fuentes de variación disponibles dadas las condiciones de los poblados (Tolago y Chiconcoac).

Para las concentraciones de Mn, en promedio se registro la misma concentración en el interior que en el exterior; que en el caso de la composición elemental de las partículas, esta razón interior-exterior varía dependiendo de la naturaleza y fuentes del elemento analizado. Janssen et al reportaron concentraciones menores o iguales del interior vs exterior para la composición de elementos analizados en PM_{10} que están dominados por fuentes de combustión [7].

De acuerdo a las características de nuestra zona de estudio, consideramos que las principales fuentes de Mn en $PM_{2.5}$ provendrían de fuentes externas como: combustión (provenientes de las actividades de la planta de nodulación de Mn), re-suspensión y erosión, ya que la comunidad se encuentra en una zona manganesífera, algunos caminos de terracería están revestidos con el Mn sobrante de las actividades de la minera y existen diferentes depósitos de residuos (polvos, jales, terreros) de la minera, así como respiraderos de las minas subterráneas. Los terrenos agrícolas en barbecho, particularmente durante la época de seca, podrían estar sujetos a la erosión y por el efecto de la dispersión, el Mn podría impactar en los poblados.

En diferentes estudios realizados para estimar la exposición de la población a partículas finas en diferentes microambientes en interiores, se ha reportado que los factores de la exposición al tabaco, aire acondicionado, uso de alfombras y su limpieza, uso de leña para cocinar, etc., afectan la exposición personal y las mediciones en los interiores, sin embargo para las concentraciones de Mn en estas partículas finas, estas fuentes no han sido de impacto [8][9] ya que en casas habitación, las fuentes son predominantemente de exteriores.

5. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos en el modelo multivariado, se confirman el efecto directo que tienen las concentraciones de Mn exterior, ventanas abiertas y distancia a un camino revestido con Mn en la concentración de Mn en el interior de las casas. Nuestros resultados son de gran importancia para las zonas manganesíferas explotadas y las poblaciones expuestas, ya que han sido pocos los estudios realizados que permiten determinar el impacto de Mn en las casas-hogar cercanas a este tipo de zonas. Como siguiente paso, nuestro modelo contribuirá a la estimación de la exposición total a Mn en los niños participantes del estudio, mediante la suma de las concentraciones de Mn en cada microambiente de acuerdo a la fracción de tiempo reportada en el diario de actividades y a su vez poder relacionarlas con diferentes marcadores de exposición y/o salud (concentraciones de Mn en cabello, espirometrias, flujometría) que se midieron durante el estudio, con la finalidad de encontrar posibles efectos a la salud.

Referencias

- [1] Gwiazda R., Lucchini R., Smith D., (2007). Adequacy and consistency of animal studies to evaluate the neurotoxicity of chronic low-level manganese exposure in humans, *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* (70): 594-605.

- [2] Aschner M., Guilarte T.R., Schneider J.S., Zheng W., (2007). Manganese: Recent advances in understanding its transport and Neurotoxicity. *Toxicol Appl Pharmacol*;221(2): 131-47.
- [3] Guilarte T.R., Chen M.K., (2007). Manganese inhibits NMDA receptor channel function: Implications to psychiatric and cognitive effects. *Neurotoxicol*;28(6): 1147-52.
- [4] Rodier J., (1955). Manganese poisoning in Moroccan miners, *Brit J Industr Med*; 12:21-35.
- [5] Rodríguez Agudelo Y., Riojas Rodriguez H., Rios Camilo, Rosas I., Sabido-Pedraza E., Miranda J., et al., (2006). Motor alterations associate to exposure to manganese in the environment in Mexico, *Science of the Total Environment*; 368: 542-56.
- [6] Levy I.J., Houseman A.E., Ryan L., Richardson D., Splengler J.D., (2000). Particle concentration in urban microenvironments, *Environ Health Perspect*;108:1051-57.
- [7] Janssen Nicole A.H., Hoek Gerard, Brunekreef Bert and Harssema Hendrik, (1999). Mass concentration and elemental composition of PM10 in classrooms. *Occup Environ Med*;56: 482-87.
- [8] Bolté S., Normandin L., Kennedy G., Zayed J., (2004). Human exposure to respirable manganese in outdoor and indoor in urban and rural areas. *J Toxicol Environ Health A*;67(6): 459-67.
- [9] Pekey B., Bozkurt Z.B., Pekey H., Dogan G., Zararsiz A., Efe N., Tuncel G., (2010). Indoor/Outdoor concentrations and elemental composition of PM10/PM2.5 in urban/industrial areas of Kocaeli City, Turkey. *Indoor Air*; 20(2): 112-25.

Procesos de Poisson No-Homogéneos aplicados a Ozono usando covariables químicas y atmosféricas.

Nahun Israel Loya Monares¹

Hortensia J. Reyes Cervantes²

Francisco J. Ariza Hernández³

¹Facultad de Ciencias de la Computación, BUAP.

²Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, BUAP.

³Unidad Académica de Matemáticas, UAGRO.

*Avenida San Claudio y 18 Sur, Col. San Manuel, C.U,
Puebla, Pue. 72570, México,*

*e-mail:*¹*israel_loya@hotmail.com,* ²*hreyes@fcfm.buap.mx,*

³*arizahfj@colpos.mx.*

Resumen

En este trabajo, se usa un Proceso de Poisson No-Homogéneo (PPNH) con función de intensidad loglineal para modelar las incidencias mensuales de niveles de Ozono (O_3) que sobrepasan el umbral de 0.11 ppm establecido por la Norma Oficial Mexicana (NOM-1993), se utilizan los datos correspondientes a las estaciones de monitoreo atmosférico: Merced, Pedregal y Plateros integradas al Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) de la Ciudad de México, durante el periodo 2007-2009. Se incluyen en el modelo covariables como: Monóxido de Carbono, Dióxido de Nitrógeno, Dióxido de Azufre, humedad relativa, temperatura y velocidad del viento, que coadyuvan a explicar el comportamiento los niveles de Ozono.

Palabras clave: Contaminantes, Ozono, Proceso Poisson No-Homogéneo.

1. Introducción

La contaminación es un problema serio en las ciudades industrializadas y con alto índice demográfico, la introducción de sustancias dañinas al medio ambiente provocan desequilibrio a los ecosistemas [9]. Alrededor del mundo existen ciudades cuyo índice de contaminación es sumamente elevado; por ejemplo, Sumgayit, Azerbaijan; Lifen, China; Tianying, China [13]. En los países como México no es la excepción ya que el problema de la contaminación se presenta en algunas ciudades como: Guadalajara, Ciudad de México y Monterrey [10].

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se asienta sobre la planicie aluvial que dejaron los antiguos lagos de Texcoco, Chalco y Xochimilco en el interior de

la Cuenca del Valle de México [19]. La calidad del aire de la ZMVM se ha considerado por varias décadas como una de las ciudades más contaminadas debido a las emisiones provenientes de los sectores, transporte, industria, servicios y otros.

El modelar el fenómeno de Ozono es importante ya que nos permite estimar el comportamiento referente a las incidencias que se pueden presentar en un mes, así como determinar que covariables pueden aportar información relevante para el desarrollo de este fenómeno. Además como aspecto de salud pública y cuestiones de medio ambiente sirve para pronosticar el índice de contaminación que puede ocurrir en cada estación meteorológica respecto a ozono y tomar medidas preventivas para la población ya que al superar los umbrales permitidos puede ocasionar enfermedades.

Se han hecho esfuerzos por disminuir la contaminación de distintos grupos sociales, ambientalistas, empresas y gobierno; por ejemplo, en la mejora de los procesos industriales, cambio en el uso de combustibles, programas como el "hoy no circula", entre otros. En México desde 1986 se instalaron estaciones meteorológicas que captan cada hora los índices de diferentes contaminantes; se tienen registros que en el periodo de 1990-1994 la contaminación se elevó drásticamente, lo que provocó que por iniciativa de los habitantes el gobierno estableciera normas ambientales. El ozono es un poderoso oxidante que puede reaccionar con varios componentes celulares y materiales biológicos. El ozono ejerce su acción a través de varios mecanismos. Reacciones con grupos sulfhidrilo, aldehídos y amino de bajo peso molecular, además de los efectos nocivos que provoca en el tracto respiratorio de las personas, se han hecho estudios que demuestran la estrecha relación entre los niveles de ozono y el grado de mortalidad de las personas que lo respiran [19]. En esta investigación se analiza el número de incidencias de los niveles Ozono (O_3) que superan la Norma Oficial Mexicana (NOM-1993) de 0.11 ppm [7], usando un Proceso de Poisson No-Homogéneo (PPNH) con función de intensidad log-lineal introduciendo a dicha función las covariables: Monóxido de Carbono (CO), Bióxido de Nitrógeno (NO_2), Bióxido de Azufre (SO_2), temperatura (TMP), humedad relativa (HR), dirección del viento (WDR) y velocidad del viento (WSP). Los datos para este trabajo son tomados del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT), este cuenta con más de 30 estaciones meteorológicas distribuidas en la Ciudad de México y el Estado de México particularmente se analizan los datos de 2007-2009 de las estaciones: Merced, Pedregal, Plateros, Tlalnepantla y Xalostoc. (Véase Figura (1) para su ubicación en la Ciudad de México)



Figura 1: Distribución geográfica de estaciones en la Ciudad de México.

Características de las estaciones atmosféricas estudiadas [19] :

Merced. Se localiza en la azotea del Centro de Salud L. E. Ruíz en la delegación Venustiano Carranza, se encuentra en el centro de la Ciudad de México, esta estación presenta grandes concentraciones de Ozono, es una zona con gran actividad comercial. Latitud $19^{\circ} 25' 27.792''$, longitud $99^{\circ} 07' 09.397''$.

Pedregal. Se encuentra a nivel del piso en el patio posterior de la Escuela John F. Kennedy, al este de las aulas de clase en la delegación Álvaro Obregón, se caracteriza por la afluencia vehicular. Latitud $19^{\circ} 19' 29.045''$, longitud $99^{\circ} 12' 13.377''$.

Plateros. La estación de monitoreo se localiza en el estacionamiento, al noroeste del edificio de la clínica Francisco P. Miranda en la delegación Álvaro Obregón. Latitud $19^{\circ} 22' 01.300''$, longitud $99^{\circ} 12' 00.377''$.

Tlalnepantla. Se encuentra dentro de las instalaciones de la Comisión Nacional del Agua en la Glorieta de Atlacumulco municipio de Tlalnepantla, Estado de México. Latitud $19^{\circ} 31' 42.229''$, longitud: $99^{\circ} 12' 15.233''$.

Xalostoc. Se localiza al nivel del piso dentro de las instalaciones de la distribuidora Volkswagen en el municipio de Ecatepec, Estado de México. Latitud $19^{\circ} 31' 39.893''$, longitud: $99^{\circ} 04' 35.201''$.

2. Objetivo General

Utilizar herramientas estadísticas que permitan analizar el comportamiento de los principales contaminantes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, en particular concentraciones de Ozono usando un Proceso de Poisson No-Homogéneo.

Objetivos específicos:

- Proponer un PPNH como una herramienta estadística para modelar el comportamiento de contaminantes en la Ciudad de México en donde sobrepasan el umbral del 0.11 ppm [15].
- Introducir el uso de covariables químicas y metereológicas en un PPNH.
- Comparar el comportamiento entre estaciones meteorológicas estudiadas.
- Contribuir a la investigación del Medio Ambiente.

3. Marco Teórico

El PPNH es un proceso estocástico que también es llamado un proceso de conteo, típicamente denotado por $N(t)$, $t \geq 0$ donde $N(t)$ representa la variable aleatoria que denota el número total de sucesos de algún fenómeno aleatorio de interés que han ocurrido en el instante t .

El PPNH es usado a menudo para modelar fallas en sistemas en los cuales los eventos se presentan de forma rara, la diferencia entre un proceso de Poisson homogéneo del no homogéneo radica en que el primero depende de una función de intensidad constante $\lambda, \lambda > 0$, por otro lado el No Homogéneo tiene una función de intensidad que es función de t denotada por $\lambda(t), t \in T$ donde T generalmente es el tiempo [11].

El proceso $\{N(t) : t > 0\}$, es un PPNH con función de intensidad $\lambda(t), t > 0$ si cumple con lo siguiente [4]:

1. $N(t), t > 0$, tiene incrementos independientes.
2. $Pr\{N(t+h) - N(t) = 1\} = \lambda(t)h + o(h)$
3. $Pr\{N(t+h) - N(t) \geq 2\} = o(h)$,
donde $o(h)$ es cualquier cantidad que después de dividirla por h tiende a cero, como $h \rightarrow 0$

3.1. El criterio de información de Akaike (AIC)

Es una medida de bondad de ajuste para modelos estadísticos, propuesto por Hirotugu Akaike [2], también definido como un enfoque para seleccionar un buen modelo de un conjunto de modelos a escoger definido como:

$$AIC = 2k - 2 \ln(L), \quad (1)$$

donde L denota la máxima log-probabilidad del modelo estimado, esto es la verosimilitud evaluada en el estimador y k , el número de parámetros estimados en el modelo aproximado [16]. El AIC no sólo pondera la bondad del ajuste, sino que también incluye una penalización en función al número de parámetros que se consideran. El modelo preferido es el que tiene el menor valor de AIC. La metodología del AIC encuentra el modelo que mejor explica los datos con un mínimo de parámetros libres.

4. Aplicación

Diversos trabajos se han realizado para modelar o predecir comportamiento de O_3 , en la literatura, Smith [20] trabaja modelos de valores extremos usando teoría de procesos puntuales para estudiar los niveles excedentes de O_3 , por otro lado Cox y Chu [8] realizan un modelo de regresión usando una función de distribución Weibull en 43 estaciones atmosféricas en Norteamérica, en otro trabajo Niu [14] implementa un modelo de funciones suavizadas de variables explicativas; otro estudio sobre contaminantes se presenta en Reyes [17] donde se realiza una modelación estadística para estimar tendencias en niveles máximos de O_3 , por otro lado Rodríguez [18] modela O_3 usando covariables a datos de la Ciudad de México, respecto de 3 estaciones meteorológicas usando modelo Generalizado de Valores Extremos.

Los procesos de Poisson No-homogéneos son usados generalmente para modelar fallas en sistemas reparables [3], aunque también son propuestos para modelar fenómenos relacionados con eventos en extremos, Barrientos [5] usa procesos de Poisson Homogéneos y No-Homogéneos para modelar sismos de intensidad 4,5 y 6 en las costas del Pacífico Mexicano, Carrillo [6] usa Procesos de Poisson para modelar ciclones superiores a categoría 3,

Achcar [1] realizan un estudio sobre excedencias de ozono con multiples puntos de cambios, ellos estiman la probabilidad del número de veces en que se exceden los estándares en un intervalo dado considerando dos funciones de intensidad: Weibull y Goel-Okumoto, el estudio lo aplican a datos de cinco áreas (Noreste, Noroeste, Centro, Sureste y Suroeste) de la Ciudad de México usando división espacial.

En este trabajo se usan los registros de tres años de 2007 a 2009 obtenidos del SIMAT y se modela las incidencias por mes donde el valor máximo/día de ozono supera el umbral de 0.11 ppm, propuesto en NOM-1993. Es decir, en este estudio se modela la ocurrencia de eventos que consisten en aquellos valores que superan la norma de 0.11 ppm. Durante los años de 2007 a 2009, mediante un PPNH y se incluyen covariables.

4.1. Metodología

- Se obtienen los máximos diarios que superan las norma de 0.11 ppm, por cada estación considerada, así como los valores de covariables químicas y meteorológicas usando software R [21].
- Se cuenta el número de las incidencias mensuales, i.e. valores de O_3 que superan la norma establecida por cada mes del año.
- Se proponen diferentes modelos tomando en cuenta el tiempo t , y combinaciones de covariables para encontrar el mejor modelo con base en el criterio de información de Akaike (AIC, por sus siglas en inglés) para esto se hace uso del programa estadístico R y la subrutina `glm()`.

4.2. Modelo

Suponemos que el número de incidencias en superar el umbral en el mes Y_i , son eventos independientes, donde i denota el mes de estudio para este caso $i = 1, 2, 3, \dots, 36$ este proceso puede modelarse usando una distribución Poisson es decir: Sea n el número de meses al considerar en el análisis y \mathbf{x} el conjunto de covariables en este caso CO, NO₂, SO₂, TMP, HR y WSP. Entonces la función de verosimilitud se obtiene como:

$$\begin{aligned} L(\mathbf{y}; \lambda(t, \mathbf{x})) &= f_{\mathbf{Y}}(\mathbf{y}) = \prod_{i=1}^n f_{Y_i}(y_i; \lambda_i(t, \mathbf{x})) \\ &= \prod_{i=1}^n \exp\{-\lambda_i(t, \mathbf{x}_i)\} \frac{\lambda_i(t, \mathbf{x}_i)^{y_i}}{y_i!} \end{aligned}$$

y la log-verosimilitud es:

$$\begin{aligned} l(\mathbf{y}; \lambda(t, \mathbf{x})) &= \log L(\mathbf{y}; \lambda(t, \mathbf{x})) \\ &= \sum_{i=1}^n \log\left\{\exp\{-\lambda_i(t, \mathbf{x}_i)\} \frac{\lambda_i(t, \mathbf{x}_i)^{y_i}}{y_i!}\right\} \\ &= \sum_{i=1}^n y_i \log \lambda_i(t, \mathbf{x}_i) - \sum_{i=1}^n \lambda_i(t, \mathbf{x}_i) - \sum_{i=1}^n \log y_i! \end{aligned} \quad (2)$$

Haciendo $\lambda_i(t, \mathbf{x}_i) = \exp\{\beta_0 + \beta_1 t_i + \dots + \beta_k x_{ki}\}$, $i = 1, 2, \dots, n$ y sustituyendo en la ecuación (2), se obtiene

$$l(\mathbf{y}; \lambda(t, \mathbf{x})) = \sum_{i=1}^n y_i (\beta_0 + \beta_1 t_i + \dots + \beta_k x_{ki}) - \sum_{i=1}^n \exp\{\beta_0 + \beta_1 t_i + \dots + \beta_k x_{ki}\} - \sum_{i=1}^n \log y_i! \quad (3)$$

Finalmente, para obtener los estimadores de máxima verosimilitud de los parámetros del modelo $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ se maximiza a la función log-verosimilitud en (3).

5. Resultados y discusión

Se presentan modelos ajustados que describen en el estudio y el número de las incidencias de O_3 para cada estación meteorológica, sus gráficos ajustados se muestran detalladamente en la Figura (2):

- Merced. $\log(\lambda(t, \mathbf{x})) = 4.112 + 0.049t - 4.219NO_2 + 24.745SO_2 - 0.019TMP$

-	Estimador	Std. Error	Z Valor	$Pr(> |z|)$	Nivel
Intercepto	4.112	0.288	14.241	2e-16	***
t	0.049	0.001	28.207	2e-16	***
NO ₂	-4.219	1.808	-2.334	0.019	*
SO ₂	24.745	6.610	3.743	0.0001	***
TMP	-0.019	0.010	-1.953	0.050	.

Cuadro 1: Resultados del modelo para Merced.

Códigos de significación: 0=***, 0.001=**, 0.01=*, 0.05=. 0.1= 1, AIC=393.65

- Pedregal. $\log(\lambda(t, \mathbf{x})) = 3.876 + 0.0556t + 44.843SO_2 + 0.011TMP - 0.006HR$

-	Estimador	Std. Error	Z Valor	$Pr(> |z|)$	Nivel
Intercepto	3.876	0.203	19.079	2e-16	***
t	0.055	0.001	38.163	2e-16	***
SO ₂	44.843	6.737	6.655	2.82e-11	***
TMP	0.011	0.007	1.602	1.09e-05	.
HR	-0.006	0.001	-4.348	7.17e-05	***

Cuadro 2: Resultados del modelo para Pedregal.

Códigos de significación: 0=***, 0.001=**, 0.01=*, 0.05=. 0.1= 1, AIC=450.00

- Plateros. $\log(\lambda(t, \mathbf{x})) = 4.009 + 0.0564t + 28.923SO_2 + 0.0157TMP$

-	Estimador	Std. Error	Z Valor	$Pr(> |z|)$	Nivel
Intercepto	4.009	0.137	29.174	2e-16	***
t	0.056	0.001	36.719	2e-16	***
SO ₂	28.923	5.463	5.294	1.20e-07	***
TMP	-0.015	0.005	-3.004	0.002	**

Cuadro 3: Resultados del modelo para Plateros.

Códigos de significación: 0=***, 0.001=**, 0.01=*, 0.05=. 0.1= 1, AIC=516.5

- Tlalnepantla. $\log(\lambda(t, \mathbf{x})) = 3.408 + 0.051t - 4.783NO_2$

-	Estimador	Std. Error	Z Valor	$Pr(> |z|)$	Nivel
Intercepto	3.408	0.102	33.205	2e-16	***
t	0.051	0.002	22.002	2e-16	***
NO ₂	-4.783	2.444	-1.956	0.054	.

Cuadro 4: Resultados del modelo para Tlalnepantla.

Códigos de significación: 0=***, 0.001=**, 0.01=*, 0.05=. 0.1= 1, AIC=273.81

- Xalostoc. $\log(\lambda(t, \mathbf{x})) = 1.436 + 0.059t + 19.367SO_2 + 0.0036TMP$

-	Estimador	Std. Error	Z Valor	$Pr(> |z|)$	Nivel
Intercepto	1.436	0.416	3.447	0.00056	***
t	0.059	0.003	19.526	2e-16	***
SO ₂	19.367	8.918	2.172	0.029	*
TMP	0.042	0.0147	2.904	0.0036	**

Cuadro 5: Resultados del modelo para Xalostoc.

Códigos de significación: 0=***, 0.001=**, 0.01=*, 0.05=. 0.1= 1, AIC=272.43

6. Conclusiones

Se puede observar que el número de incidencias por mes pueden ser modelados con un PPNH con función de intensidad loglineal dada en (3) en función del tiempo y ciertas covariables.

Para el caso de la estación meteorológica Merced la tasa de ocurrencias está dada por una constante, así como por el logaritmo del tiempo y se incluyen 2 importantes contaminantes que son: NO₂ y SO₂, a la vez se observa que la TMP influye de forma significativa las incidencias por mes cuando el O₃ supera el umbral. En Pedregal el comportamiento esta dado con tasa de ocurrencias representado por una constante relacionada con el logaritmo del tiempo y afectada significativamente por SO₂, TMP y HR.

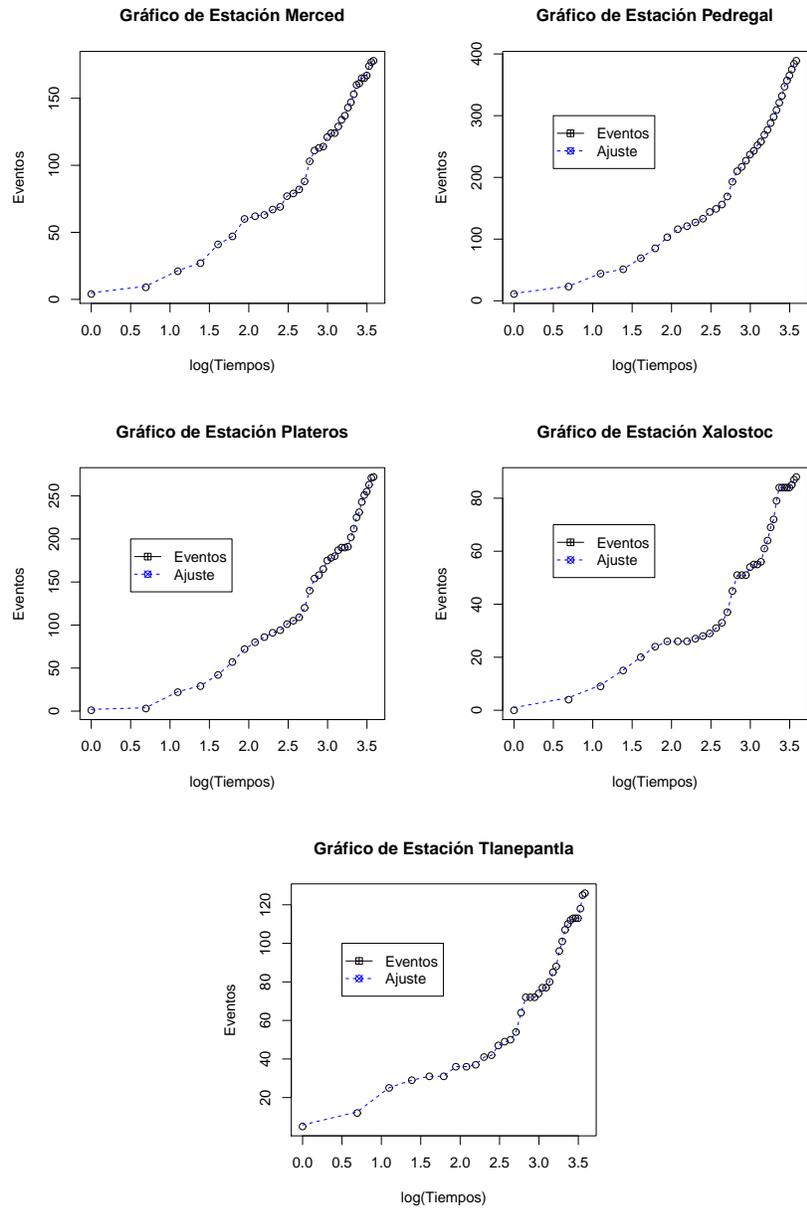


Figura 2: Resultados con ajuste. Se presentan los gráficos junto con los modelos ajustados para cada estación meteorológica.

Plateros es una estación meteorológica en la cual el comportamiento no es semejante a Merced o Pedregal ya que la tasa de ocurrencias está representada por una constante

el logaritmo del tiempo y los contaminantes SO_2 y la TMP .

Tlalnepantla es una estación en la cual su comportamiento esta influenciado por una constante, el tiempo, así como el contaminante bióxido de nitrógeno favorece a incrementar las incidencias de ozono.

Finalmente Xalostoc estación ubicada al noreste de la Ciudad de México se observa que en su comportamiento incide el tiempo, así como bióxido de azufre y la temperatura.

El modelar el comportamiento de Ozono es una tarea complicada, en ocasiones se supone que el número de incidencias del contaminante pudiese estar influenciado por factores industriales, sin embargo a través de este estudio se establece que esto no es tan simple y que intervienen otros elementos, como el parque vehicular, las condiciones orográficas de la ciudad, así como la mezcla de otros contaminantes como son el bióxido de nitrógeno o el bióxido de azufre.

Referencias

- [1] Achcar J. A., Rodrigues Eliane y Tzintzun G. (2009). Using Non-Homogenous Poisson models with multiple chage-points to estimate the number of ozone exeedances in Mexico City, EUA.
- [2] Akaike H. (1980). Probabilidad y el procedimiento de Bayes, Estadística Bayesiana, University Press, EUA.
- [3] Ariza F. (2005). Pruebas de bondad de ajuste y de razón de verosimilitudes generalizada para procesos Poisson No Homogéneo, Colegio de Postgraduados, México.
- [4] Basawa I., Prakasa R. (1980). Statistical Inference for Stochastics Processes, Academy Press, EUA.
- [5] Barrientos L. (2003). Análisis geográfico estadístico de la sismicidad en la costa mexicana del pacífico, INEGI, México.
- [6] Carrillo O. (2010). Modelación de la frecuencia e intensidad de ciclones tropicales usando el Proceso de Poisson No-Homogéneo, Colegio de Postgraduados, Montecillo México.
- [7] Correa A. (2004). Contaminantes atmosféricos en la zona metropolitana de la ciudad de México, Instituto Politécnico Nacional, México.
- [8] Cox W.M. y Chu S.H. (1992). Meteorologically Adjusted Ozone Trends in Urban Areas, Atmospheric Environment.
- [9] Harrison R.M (2003). El medio ambiente: Introducción a la química medioambiental y la contaminación, Editorial Acribia, New York.
- [10] Instituto Nacional de geografía y estadística. (2010). Fuentes de contaminación en México, INEGI, México.
- [11] Kingman J. (1993). Poisson Processes, Oxford Studies, EUA.
- [12] Lopez L., Villasenor J., Vaquera H. (2002). Dos Pruebas de Bondad de Ajuste Para Procesos de Poisson No Homogéneos, Colegio de Postgraduados, México.

- [13] Mederick B. (2007). The top ten of the dirty thirty, BlackSmith Institute, EUA.
- [14] Niu X.F. (1996). Nonlinear Additive Models for Environmental Time Series with Applications to Ground-Level Ozone Data Analysis, Journal of the American Statistical Association.
- [15] Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-1993. (2004). SIMAT, [http://www.sma.df.gob.mx/simat/proteccion/\(ante\)nom-020-ssa1-1993.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/simat/proteccion/(ante)nom-020-ssa1-1993.pdf), México.
- [16] Rao R., Toutenburg H., Shalabh, Heumann C. (2008). Linear Models and Generalizations. Springer, EUA.
- [17] Reyes H. (2008). Estimación de tendencias en niveles máximos de contaminación usando regresión por cuantiles ajustando el efecto por variables meteorológicas, Colegio de postgraduados, México.
- [18] Rodriguez S. (2010). Modelación de Ozono usando modelo generalizado de Valores Extremos, FCFM-BUAP, México.
- [19] SIMAT Gobierno del D.F. (2010). Biblioteca Virtual, <http://www.sma.df.gob.mx>, México.
- [20] Smith R.L. (1989). Extreme Value Analysis of Environmental Time Series, Statistical Science.
- [21] The R Project for Statistical Computing (2010), The R Software, <http://www.r-project.org/>.

¿Qué podemos hacer ante el cambio climático global? El caso del Estado de Puebla

Apolonio Juárez Núñez¹

¹Facultad de Ciencias Fisico Matemáticas, BUAP
*Avenida San Claudio y 18 Sur, Colonia San Manuel
Ciudad Universitaria, Puebla, Pue. C.P. 72570
e-mail: ajuarez@fcfm.buap.mx*

Resumen

A nivel mundial, más del 80% de la energía que se consume proviene de los combustibles fósiles y, con base en proyecciones de organismos internacionales, en las próximas décadas aumentará su consumo. Según estudios realizados por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, en el último siglo se ha incrementado de manera importante la temperatura media del planeta, propiciando el aumento de eventos climáticos extremos en diferentes regiones. Este brusco cambio climático se ha asociado con la emisión de gases que incrementan el efecto invernadero como el bióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso, todos ellos resultado de la quema de combustibles fósiles y de actividades humanas como la agricultura, la industria y la ganadería. A pesar de que nuestro país cuenta con abundantes recursos energéticos renovables provenientes del Sol y del viento, la producción de energía depende en más del 90% de los combustibles fósiles. En este trabajo presentamos resultados que dan cuenta de los abundantes recursos eólicos y solares con los que cuenta el Estado de Puebla. Ofrecemos nuestra experiencia sobre el uso de energía solar y eólica para producir energía eléctrica en laboratorios de la FCFM-UAP para actividades de investigación, docencia y divulgación. Discutimos un estudio reciente en el que se demuestra que, con la tecnología existente, se puede cubrir la demanda energética en el mundo utilizando energía proveniente del sol, del aire y del agua. Finalmente insistimos en la adopción de una visión del mundo alterna a la que prevalece en nuestras sociedades para mitigar los efectos del cambio climático. Esta visión del mundo alterna asume que el ambiente y el humano forman parte de una misma entidad. Concluimos que hasta ahora, la forma en la que se produce y se consume energía en México nos sitúa como una sociedad que daña sin reservas el ambiente y que está lejos del desarrollo sostenible.

Palabras clave: cambio climático, energía, desarrollo sostenible.

1. Introducción

El abrupto cambio climático es quizás el más complejo de los desafíos que enfrenta el humano, ya que pone en peligro nuestra existencia y la de numerosas especies que habitan el planeta.

Estudios realizados para investigar el comportamiento del clima revelan que en la tierra, salvo eventos catastróficos como erupciones volcánicas e impactos de cuerpos celestes, se han presentado importantes variaciones de la temperatura en el plazo de centenares, miles y millones de años; pero no en décadas como está sucediendo ahora.

Este cambio climático toca el núcleo del sistema social y económico, plantea preguntas científicas y tecnológicas fundamentales, tropieza con imponentes incertidumbres naturales y sociales, requiere una perspectiva temporal del orden de décadas e involucra a todos los grupos de la sociedad.

Con base en la interpretación de datos obtenidos por miles de estaciones meteorológicas que miden la temperatura tanto en la superficie de los océanos como en la de los continentes, se puede concluir que la temperatura global ha aumentado $0.74^{\circ}\text{C} \pm 0.18^{\circ}\text{C}$ en los cien años que terminaron en el 2005.

Proyecciones de diversos modelos indican que la temperatura global de la superficie aumentará entre 1.1 y 6.4°C durante el siglo XXI. Este rango de variación surge de estimaciones con respecto a las emisiones futuras de gases con efecto invernadero y por el uso de modelos con sensibilidad climática variable.

Existe incertidumbre sobre como los cambios en la temperatura pueden variar de región en región sobre el planeta. Aunque los estudios se enfocan hasta el 2%, el calentamiento se espera que continúe por más de mil años aún si los niveles de gases de invernadero se estabilizan en el corto plazo.

El aumento de la temperatura global hará que suban los niveles del mar y afectará los patrones de precipitaciones, probablemente aumentando la extensión de las regiones desérticas subtropicales. Otros efectos serán la disminución de las áreas árticas y liberación de metanos en esas regiones, aumento en la intensidad de fenómenos atmosféricos, cambios en productividad agrícola, modificación de rutas migratorias, descongelamiento de glaciares, extinciones de especies y aumento de vectores de enfermedades.

El debate político y público continúa sobre qué acciones deben tomarse para reducir o revertir el calentamiento futuro o para adaptarse a las consecuencias esperadas.

Resultados de diversos estudios indican que el aumento de la temperatura global tiene su principal causa en la producción y en el consumo de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón), y en actividades humanas como la agricultura, la industria y la ganadería.

Más del 80% de la energía que se consume en el planeta para mantener en funcionamiento a nuestra sociedad proviene del petróleo gas y carbón. Estos com-

bustibles contaminan el agua, el suelo y la atmósfera deteriorando el ambiente y generando condiciones adversas para la vida.

Hasta ahora, el petróleo es la principal fuente de energía que utilizamos los humanos. Se estima que diariamente se consumen alrededor de 85 millones de barriles de petróleo en todo el mundo (un barril de petróleo equivale a 159 litros).

El carbón y el gas (combustibles fósiles también de amplio uso), sostienen la producción de energía eléctrica, principal rama industrial a nivel mundial, con las consecuencias que este uso extensivo tiene sobre el ambiente.

A pesar del uso extensivo de los combustibles fósiles, nuestro planeta cuenta con abundantes recursos energéticos provenientes del sol, del viento y del agua, que con la tecnología ya existente, podrían satisfacer la totalidad en la demanda energética global, con costos económicos similares a los de los combustibles fósiles y sin los impactos ambientales que éstos han tenido.

En este trabajo discutimos los efectos del cambio climático sobre la vida en el planeta y proponemos acciones específicas para aprovechar la energía solar y eólica para proporcionar electricidad al sector comercial, doméstico y escolar, entre otros. Nos enfocamos fundamentalmente a las aplicaciones para el Estado de Puebla.

2. Consumo de combustibles fósiles e incremento del efecto invernadero

La generación del dióxido de carbono (CO_2) en nuestro planeta forma parte de un ciclo natural presente por millones de años que ha dado lugar a un efecto invernadero. Este efecto ha propiciado que la temperatura media de la superficie del planeta ronde los 15 grados centígrados.

El uso de combustibles fósiles para producir energía genera cantidades adicionales de CO_2 a las ya presentes, así como de otros gases que incrementan el efecto invernadero. Como consecuencia la temperatura media del planeta se ha incrementado, sobre todo en las últimas décadas en las que se ha dado un uso extensivo a este tipo de combustibles.

Como resultado del consumo de combustibles fósiles, la concentración de bióxido de carbono en la atmósfera ha aumentado más rápidamente en los últimos 10 años que durante cualquier otro periodo.

La figura 1 muestra como se han elevado las concentraciones de este gas en la atmósfera durante las últimas décadas. En la figura 2 se presentan las contribuciones de las diferentes fuentes de energía que se utilizan para realizar las actividades humanas. La figura muestra contribuciones de cada combustible, tanto en años anteriores, como las perspectivas para las próximas dos décadas. Estos datos son los más recientes (2010), proporcionados por la Agencia Internacional de Energía (IEA).

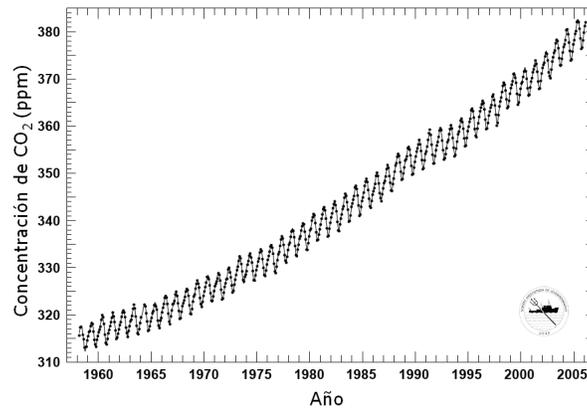


Figura 1: Mediciones de concentraciones de dióxido de carbono obtenidas en el observatorio de Mauna Loa, Hawai. Nótese el sostenido incremento de este gas en las últimas décadas. Este incremento coincide con el incremento en la temperatura media del planeta (CO₂ Atmosférico medido en Mauna Loa -cortesía de la NASA-).

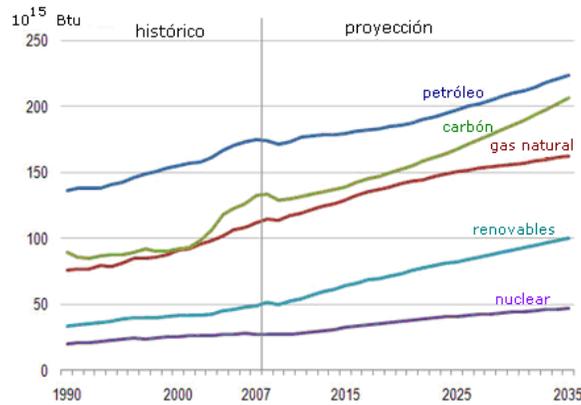


Figura 2: Proyecciones a 2035 para la producción mundial de energía. Obsérvese que a pesar de lo cuestionable que resulta el consumo de combustibles fósiles, éstos continuarán proporcionando la mayor parte de la energía que se consume en el planeta. Obsérvese también que el crecimiento de fuentes renovables no será significativo en las próximas dos décadas (www.eia.doe.gov/iea).

La gráfica muestra que a pesar de los esfuerzos mundiales, las energías renovables (eólica, solar, biomasa, hidrológica, geotermia), no tendrán un impacto significativo sobre el consumo energético mundial.

Como puede apreciarse en la figura 2, el petróleo es y continuará siendo la principal fuente de energía que utilizamos y utilizaremos los humanos en nuestras actividades.

La rama industrial más importante la constituye la producción y consumo de

energía eléctrica. La figura 3 muestra la contribución de los distintos combustibles para producir electricidad. Se muestra también en la misma figura las proyecciones a futuro.

Siendo el carbón una de las fuentes más contaminantes del aire, resulta claro que la electricidad que consumimos contribuye a la contaminación ambiental de una forma muy importante.

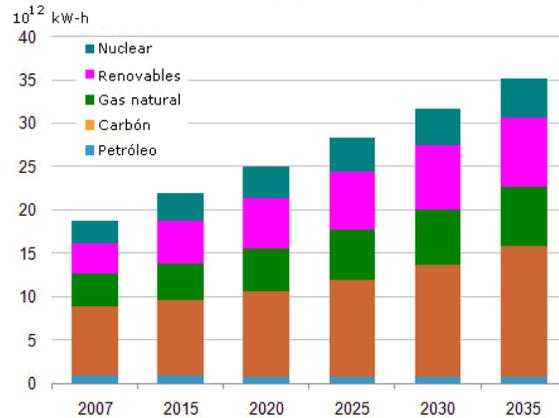


Figura 3: Producción mundial de electricidad con base en el combustible usado. Obsérvese que el carbón y el gas son los combustibles que se utilizan en mayor proporción para producir energía eléctrica a nivel mundial y que en las proyecciones a 2035 continuará esta tendencia (fuente EIA).

3. La contribución de México

México ha sido (hasta 2010), un importante productor de petróleo a nivel mundial y también un importante proveedor a los Estados Unidos. El consumo interno de energía en nuestro país depende en gran medida de este combustible. Con el 1.5% de la población mundial, nuestro país contribuye casi con el 2% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero.

En la figura 4, mostramos la contribución de los diferentes combustibles al consumo interno de energía en nuestro país. Nótese el alto porcentaje que tiene el petróleo y en general la contribución de los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón).

3.1. La energía del sol y del viento en México

En la mayor parte de la superficie de México se cuenta con una insolación de $5\text{kWh}/\text{m}^2\text{-día}$, una de las mejores del mundo.

Una aplicación fundamental de la energía solar es la producción de energía eléctrica. Los sistemas fotovoltaicos convierten directamente la radiación solar en

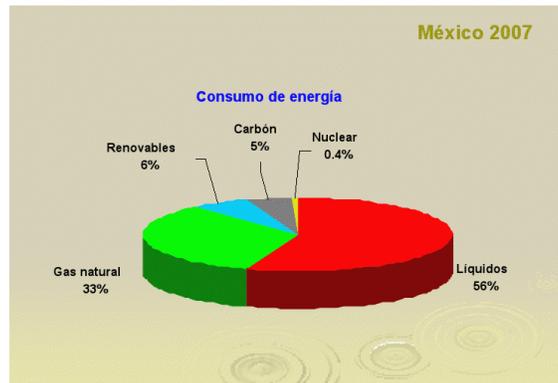


Figura 4: Porcentajes con los que contribuyen los diferentes combustibles al consumo interno en México. Petróleo (líquidos), gas y carbón, suman más de 90 % (datos de 2007).

electricidad. Las celdas fotovoltaicas se fabrican con Silicio, aunque los últimos avances en la investigación sobre este campo han dado lugar a la fabricación de novedosos componentes semiconductores como la denominada tecnología CIGS (Cobre, Indio, Galio, Selenio), con menores costos y eficiencias comparables a otras tecnologías más caras.

Es previsible que en el futuro cercano, el costo de celdas solares con altas eficiencias de conversión de luz a electricidad, compita con el costo económico para producir electricidad usando combustibles fósiles. Sin embargo, los costos ambientales no tienen comparación: Los sistemas fotovoltaicos tendrían una contribución prácticamente nula en la emisión de gases de efecto invernadero.

La electricidad producida por medios fotovoltaicos tiene numerosas ventajas. Entre otras podemos citar las siguientes:

- Es gratis y renovable, no genera emisiones y es silenciosa.
- El costo de las células fotovoltaicas se ha reducido considerablemente. Por ahora producir electricidad con paneles solares tiene un costo mayor que utilizar combustibles fósiles. Sin embargo, a largo plazo esta tecnología es rentable. Lo que podría hacerse es invertir en la investigación y desarrollo de tecnologías que permitan abaratar esos paneles. O sea, que al final se trata más de invertir en investigación y desarrollo.
- Los dispositivos solares pueden integrarse al paisaje urbano y son muy útiles en zonas remotas de difícil acceso como alternativas a las fuentes convencionales de electricidad.
- México recibe energía solar de alta calidad en más de la mitad de su territorio.

Por su parte, el proceso de conversión del viento en electricidad no libera gases de efecto invernadero, no emite contaminantes atmosféricos y no genera residuos peligrosos, es inagotable y no requiere procesos de extracción.

Las desventajas que se podrían atribuir a ésta forma de producir energía eléctrica radica en que el ruido y movimiento de las turbinas afecta a las especies que habitan en sus cercanías y también el abuso del que son objeto los pobladores de las zonas donde existe el potencial, por parte de intermediarios, autoridades y empresas que se encargan de instalar los parques eólicos.

En México tenemos vastas regiones donde es rentable desde el punto de vista económico y ecológico la instalación de parques eólicos. Entre otras regiones sobresalen el Istmo de Tehuantepec, las costas de Quintana Roo, Veracruz, Tamaulipas y Baja California, así como en la Altiplanicie Central, principalmente en los estados de Zacatecas, San Luis Potosí e Hidalgo.

3.2. Producción y consumo de energía en el Estado de Puebla

La evolución anual de cada fuente de energía primaria puede observarse de forma comparativa en la figura 5 resalta el elevado porcentaje de leña respecto al total de energía primaria producida, más del 20 % contra el 2 % nacional.

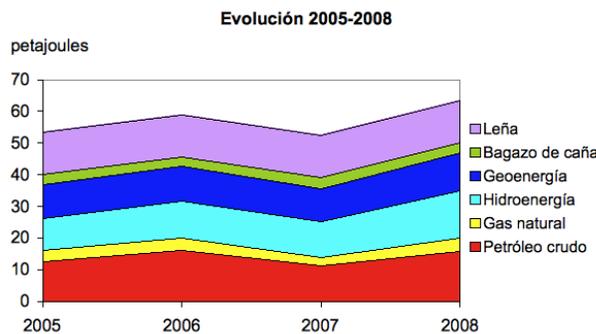


Figura 5: Evolución anual de la producción de energía primaria.

El estado de Puebla no produce la energía suficiente para cubrir su demanda, por lo que requiere de una gran cantidad proveniente de otros estados. La figura 6 muestra gráficamente esta situación.

En conclusión, en Puebla, del año 2005 al 2008 ha aumentado el consumo de derivados del petróleo y de coque de carbón al igual que el de electricidad. Lamentablemente el alto consumo de leña y bagazo unido al de coque de carbón e hidrocarburos, hacen del Estado de Puebla un alto generador de gases de efecto invernadero.

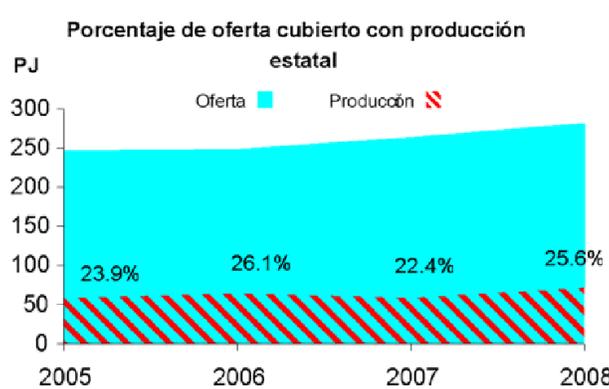


Figura 6: Porcentaje de energía que produjo el Estado en los últimos años (área rayada). Gran parte de la energía que proviene de otros estados podría ser producida en Puebla a partir de fuentes renovables como sol y viento.

3.3. Energía del Sol y del viento en el Estado de Puebla

La generación de energía eléctrica en el estado de Puebla es insuficiente para satisfacer el consumo interno, por lo que un importante porcentaje ingresa de otros estados. En 2008 este valor fue de 67.4%, electricidad que es producida con energía hidráulica convencional, energía de combustibles fósiles y energía nuclear.

Pero el Estado de Puebla cuenta con amplios recursos solares y eólicos. En las figuras 7 y 8, se muestra la evaluación de tales recursos. De esta forma, la energía solar y eólica en el estado de Puebla tienen un gran potencial, lo que nos permitiría disminuir el consumo de los combustibles fósiles y contribuir de esta manera a reducir la emisión de gases de efecto invernadero que están provocando el calentamiento del planeta.

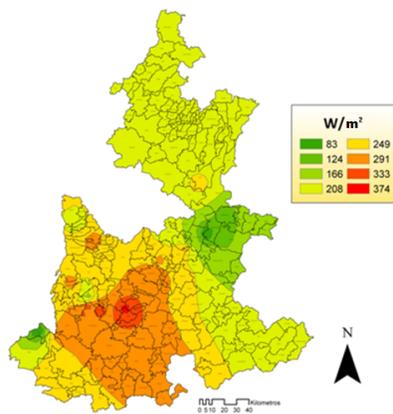


Figura 7: Radiación solar global promedio (2008). Potencial Máximo de generación de energía: 225.29 mil PJ

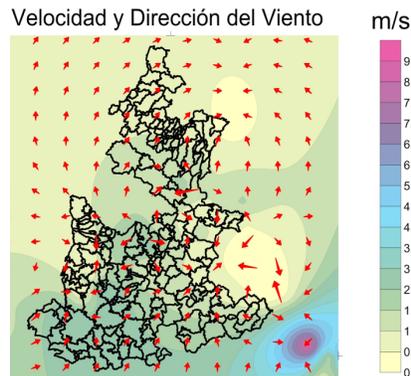


Figura 8: Velocidad promedio del viento en el Estado de Puebla (2008), construido con datos de INIFAP (clima.inifap.gob.mx/redclima).

4. Discusión y propuesta

Los humanos hemos valorado muy poco la relación existente entre consumo de combustibles fósiles, la contaminación ambiental y el calentamiento global.

Como sociedad y como individuos, nos hemos vuelto irresponsables con el ambiente. Por supuesto la responsabilidad es mayor para las poblaciones de los países que consumen más energía por habitante, como es el caso de los Estados Unidos y otras potencias económicas.

Es necesario considerar que para preservar la vida en el planeta, podría ser fundamental un profundo cambio en la forma en que percibimos el ambiente. La educación sería un elemento básico para lograr ese cambio en la visión del ambiente.

Gran parte de la cultura que se nos ha impuesto en los aspectos económico, político y social, ha partido de preceptos que nos han conducido a asumir implícitamente una visión del mundo que ha sido contrapuesta a la preservación del ambiente y a nuestra existencia como especie.

Por lo anterior, propiciar condiciones para preservar la vida en el planeta, requiere una visión sobre el ambiente alterna a la que ha prevalecido hasta ahora. Esta visión alterna podría asumir implícitamente (y no sólo explícitamente), los siguientes preceptos:

- La explotación desmedida de los recursos naturales afecta la biodiversidad.
- Los recursos en el planeta son agotables.
- La permanencia humana sobre el planeta depende de la conservación de plantas, animales, además de la protección del aire, suelo y agua.

Si asumimos que el ambiente y los seres vivos somos una misma entidad, entonces no podemos separar objetivamente el ambiente para estudiarlo, cuidarlo y conservarlo. Por lo tanto, el estudio, cuidado y conservación del ambiente, es nuestra preservación como especie.

Sin embargo, hasta ahora la forma de producir y consumir energía, nos sitúa como una sociedad que se daña a sí misma al contaminar el medio ambiente y que está lejos del desarrollo sostenible, entendido éste como aquella forma de desarrollo que satisface las necesidades humana del presente, sin poner en peligro la satisfacción de las necesidades futuras.

Por lo anterior se requiere precisar más que nunca un plan mundial que enfrente los desafíos del cambio climático, cosa que no se ha logrado hacer después de casi 20 años de que se realizó la cumbre de Río en 1992 y del acuerdo sobre la convención marco de Naciones Unidas sobre cambio climático.

Desde nuestra perspectiva, una acción viable (tanto económica como ambiental), que se puede realizar en muchos lugares de nuestro país, iniciando por ejemplo con las instituciones de educación y en las oficinas gubernamentales de los diferentes niveles, es la instalación de sistemas híbridos (solares y eólicos), que proporcionen energía eléctrica para las actividades que se realizan en esas dependencias.

Nuestra propuesta específica consiste en la instalación, previo cálculo en la potencia consumida por la dependencia, de sistemas híbridos que alcancen potencias del orden de cinco mil Watts. Potencias de este orden, proporcionarían servicio a una escuela o a una oficina pública.

Con base en nuestra experiencia, la instalación de tales sistemas híbridos no tendría un costo superior a los cien mil pesos para cada escuela u oficina donde se instalaran tales sistemas, quedando dichas instalaciones independientes de la red eléctrica nacional.

En nuestros laboratorios de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Autónoma de Puebla, contamos ya con un sistema híbrido que satisface plenamente nuestras necesidades para la docencia, divulgación e investigación.

5. Conclusiones

El calentamiento global en las últimas décadas es uno de los más graves trastornos causados por los humanos sobre los sistemas naturales.

Lograr un planeta con cero emisiones de gases de efecto invernadero que estabilice el clima, precisa afrontar desafíos sociales, políticos, económicos y científico técnicos, que van desde pensar a largo plazo, cambiar nuestro estilo de vida, tener instituciones fuertes, estabilidad política y económica, hasta innovar para desarrollar masivamente y cuanto antes las energías renovables, acelerar las medidas

de eficiencia energética y limitar la vida útil de las centrales de carbón existentes.

Cierto es que hay avances en acciones específicas, sobre todo aquellas encabezadas por la Unión Europea; sin embargo, lo planteado hasta ahora como el desarrollo de los mercados y las negociaciones, no sustituyen a la educación, a la planificación y al desarrollo de nuevas tecnologías.

En un estudio reciente (2010), publicado en la revista *Investigación y Ciencia* de enero de 2010, M. Z. Jacobson de la Universidad de Stanford y M. A. Delucchi, de la Universidad de California en Davis, destacan lo siguiente:

- Las tecnologías eólica, hidráulica y solar pueden proveer la totalidad de la energía que el planeta necesita; se podría prescindir de los combustibles fósiles.
- La energía que consumen los habitantes del planeta no es nada frente a las reservas de energías eólica y solar disponibles en terrenos accesibles.
- Se requieren tres millones ochocientas mil turbinas eólicas, noventa mil plantas solares y numerosas instalaciones geotérmicas, mareales y fotovoltaicas de techo en todo el mundo.
- Los costos de generación y transmisión de esa energía sería inferior que el costo extrapolado por kilowatt-hora correspondiente a la energía fósil y nuclear.
- Como obstáculo importante sólo se alzan la escasez de ciertos materiales y la falta de voluntad política.
- Con una adecuada política, en un plazo de entre 20 y 30 años se podría sustituir toda la capacidad basada en combustibles fósiles (esto no estaba claro hace 10 años).

De esta forma, dentro de los desafíos científicos y técnicos para este siglo XXI se encuentran volver económicamente viable el uso masivo de la energía solar como un paso para mitigar el calentamiento global y no calentar la atmósfera más allá de dos grados.

Referencias

- [1] *Investigación y Ciencia*, enero de 2010, M. Z. Jacobson y M. A. Delucchi.
- [2] *Vanguardia*, No 33, 2009.

- [3] Juárez, E.A. Martínez, Medición de la calidad del aire en zonas urbanas Calidad Ambiental, pp. 1-6, Monterrey, Mexico, 2001.
- [4] www.pnuma.org/foroalc/esp/reuniones/
- [5] <http://www.ipcc.ch/>
- [6] www.cienciasaplicadas.buap.mx
- [7] <http://www.remapuebla.gob.mx/index.php/estrategia-de-cambio-climatico>.
- [8] Juárez, C. Gay, J. L. Bravo, Influence of urban Ozone in the measurements of the total Ozone column in México City. *Atmósfera*, 8, 1, pp. 35-43 (1995).
- [9] A. Juárez, A. Miranda, Medición de la calidad del aire en la ciudad de Puebla, Editorial UAP, Puebla, Pue. (1997).

Selección bayesiana de variables para la construcción de un modelo de regresión

Arturo Abraham López Pérez¹

Gladys Linares Fleites²

José Adrian Saldaña Munive³

¹Posgrado en Ciencias (Matemáticas), FCFM-BUAP

^{2,3}Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas, ICUAP

Ave. San Claudio y Rio Verde, Col. San Manuel, C.U.

Puebla, Pue. 72570, México

e-mail: aalopezip@gmail.com, gladys.linares@icbuap.buap.mx

cs000297@siu.buap.mx

Resumen

La selección de un subconjunto de variables explicativas en la construcción de un modelo estadístico, es fundamental. Un conjunto de n variables exploratorias define una gran variedad de modelos y, desde un enfoque clásico, generalmente se propone un modelo y se asume como el correcto para realizar inferencias pero, sin exponer su incertidumbre inherente. El procedimiento *Bayesian Model Averaging* (BMA), que promedia sobre todos los posibles modelos, suministra un mecanismo coherente para medir la incertidumbre inmanente a todo modelo. En este artículo se considera el problema de la incertidumbre relacionada a todo modelo y se recopila el enfoque *Markov Chain Monte Carlo Model Composition* (MC^3) para medir tal característica a través del modelo Bayesiano promedio. Este enfoque, se emplea en un estudio para aproximar el modelo BMA y seleccionar un modelo de regresión lineal para la predicción de emisiones de CO_2 .

Palabras clave: Modelo Bayesiano promedio, Modelo de composición MCMC, Incertidumbre inherente a un modelo, Modelo de regresión lineal Bayesiano, Emisiones de CO_2 .

1. Introducción

El procedimiento más común para seleccionar un modelo, es elegir una subconjunto de variables explicativas a través de algún método. Pero generalmente estos métodos no consideran la incertidumbre implícita en la selección de un modelo. Ignorar la incertidumbre inherente a un modelo puede afectar las predicciones y sobreestimar las inferencias sobre las cantidades de interés. Bayesian Model Averaging (BMA) provee un enfoque coherente para medir la incertidumbre inherente a todo modelo, vinculando la selección de variables y la combinación de modelos con el fin de obtener el modelo más parsimonioso que

logre mejores predicciones. El enfoque Markov Chain Monte Carlo Model Composition (MC^3), permite aproximar directamente el modelo promedio Bayesiano, calculando la distribución final de la cantidad de interés con el método MCMC.

2. Objetivo General

En este artículo, se recopila el procedimiento Bayesian Model Averaging (BMA) y se sintetiza el método de aproximación Markov Chain Monte Carlo Model Composition (MC^3), además, se expone brevemente su implementación con un software libre.

Objetivo específico:

Específicamente, se detalla el enfoque Markov Chain Monte Carlo Model Composition (MC^3) para los modelos de regresión lineal y, con el fin de aplicar el procedimiento BMA, se presenta un estudio donde se realiza la selección de un modelo de regresión lineal para la predicción de emisiones de CO_2 .

3. Bayesian Model Averaging (BMA)

Sea $\mathcal{M} = \{M_1, \dots, M_K\}$ un conjunto de K modelos y Θ una cantidad de interés (una observación futura, un parámetro o un vector paramétrico), entonces la distribución posterior de Θ dado los datos D está dada por:

$$p(\Theta | D) = \sum_{k=1}^K p(\Theta | M_k, D)p(M_k | D). \quad (1)$$

La ecuación (1) no es más que el promedio de la distribución predictiva final de Θ bajo cada modelo considerado [1], la cual está ponderada por el correspondiente modelo de probabilidad final $p(M_k | D)$ dado, para cada $k = 1, \dots, K$, por:

$$p(M_k | D) = \frac{p(D | M_k)p(M_k)}{\sum_{l=1}^K p(D | M_l)p(M_l)}, \quad (2)$$

donde:

$$p(D | M_k) = \int p(D | \theta_k, M_k)p(\theta_k | M_k)d\theta_k, \quad (3)$$

es la integral de la función de verosimilitud del modelo M_k , con θ_k su vector paramétrico, $p(\theta_k | M_k)$ la distribución inicial del parámetro bajo el modelo M_k , $p(D | \theta_k, M_k)$ la verosimilitud de θ_k y, $p(M_k)$ la probabilidad inicial de que M_k sea el verdadero modelo¹.

La implementación del procedimiento Bayesian Model Averaging (BMA), aunque atractiva para solucionar el problema de la incertidumbre inherente a todo modelo, presenta ciertas dificultades. Por una parte, si el número de modelos a considerar es demasiado grande, simplemente es inviable obtener de manera exhaustiva (1). Por otra parte, la expresión analítica exacta de las integrales implícitas en (3), generalmente, no existen o

¹Todas las probabilidades están implícitamente condicionadas a \mathcal{M} .

bien, no son fáciles de calcular. Finalmente, se presenta la dificultad de determinar el modelo de probabilidad inicial para cada M_k .

4. Aproximación MC³

El procedimiento *Markov Chain Monte Carlo Model Composition* (MC³), aproxima directamente $p(\Theta | D)$ a través del empleo del algoritmo MCMC, generando un proceso estocástico que se mueve a través de la clase \mathcal{M} [9].

Si $\{M(t) : t = 1, 2, \dots\}$ es una cadena de Markov con espacio de estado \mathcal{M} y distribución de equilibrio $p(M_i | D)$ entonces, para alguna función $g(M_i)$ definida sobre \mathcal{M} se tiene que, al simular la cadena de Markov para $t = 1, \dots, N$, el promedio:

$$\hat{G} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N g(M(t)),$$

converge a $E(g(M))$ conforme $N \rightarrow \infty$.

Así, para calcular (1) de esta manera, basta considerar:

$$g(M) = p(\Theta | M, D).$$

La construcción de la cadena de Markov, se consigue definiendo una vecindad $V(M)$ para cada $M \in \mathcal{M}$, que consista del modelo M y de un conjunto de modelos con al menos una variable menos que M y, definiendo una matriz de transición \mathbf{q} tal que:

$$\mathbf{q}(M \rightarrow M') = \begin{cases} 0 & \text{si } M' \notin V(M) \\ \text{Cte.} & \text{si } M' \in V(M) \end{cases}$$

Por lo tanto, si la cadena esta en el espacio M entonces, se pasa a M' a través de $\mathbf{q}(M \rightarrow M')$ con probabilidad:

$$\min \left\{ 1, \frac{p(M' | D)}{p(M | D)} \right\}.$$

5. BMA para los Modelos de Regesión Lineal

La selección de un subconjunto de variables explicativas es un tema fundamental en la construcción de un modelo de regresión lineal. Un conjunto, $\{X_1, \dots, X_n\}$, de n variables exploratorias define una gran variedad de modelos lineales, los cuales resultan de todas las combinaciones posibles que permiten efectuar los n regresores; en teoría, definen 2^n modelos.

El objetivo de la selección de variables es, dada una variable dependiente Y hallar el *mejor* modelo de la forma:

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_{ij} X_{ij} + \epsilon, \tag{4}$$

donde $\{X_{i1}, \dots, X_{ik}\}$ constituye un conjunto de k predictores contenidos en la matriz $\mathbf{X}_{n \times (k+1)}$, \mathbf{Y} un vector n -dimensional de datos observados y, β un vector $(k+1)$ -dimensional de parámetros individuales desconocidos [8]. Además, se asume que los distintos ϵ 's son independientes en distintos casos y con varianza σ^2 desconocida.

Cuando la información inicial sobre la importancia de una variable está disponible para estructurar un modelo con un coeficiente asociado para cada predictor, una probabilidad inicial sobre cada modelo M_k puede especificarse como:

$$p(M_k) = \prod_{j=1}^p \pi_j^{\delta_{kj}} (1 - \pi_j)^{1 - \delta_{kj}},$$

donde $\pi_j \in [0, 1]$ es la probabilidad inicial de que $\beta_j \neq 0$ en un modelo de regresión lineal y δ_{kj} es una función indicadora, especificando si la variable j esta o no en el modelo M_j . Si $\pi_j = \frac{1}{2}$ para toda j , corresponde a una inicial uniforme; $\pi_j < \frac{1}{2}$ penaliza la selección de un modelo que incluya un gran número de variables, en cambio, si $\pi_j = 1$ asegura que la variable j estará incluida en todos los modelos [6].

Esta manera para construir una distribución inicial, en la selección de variables de la regresión lineal, es sencilla y evita determinar iniciales para un gran número de modelos aunque, por simplicidad, generalmente son consideradas igualmente verosímiles *a priori*.

Además, la implementación BMA sobre los modelos de regresión lineal, a través del enfoque MC^3 que promedia todos los conjuntos posibles de predictores, expresa analíticamente la evaluación de la integral implícita en (3).

5.1. MC^3 para los modelos de regresión lineal

Dentro del marco Bayesiano y considerando el modelo de regresión (4), se debe incorporar en el análisis las distribuciones iniciales para los parámetros desconocidos del modelo, β y σ^2 . Estas distribuciones deben reflejar la incertidumbre que se tiene sobre sus verdaderos valores. Las distribuciones iniciales no-informativas, distribuciones propias y razonablemente uniformes sobre un rango de valores posibles, representan una situación donde se cuenta con información inicial vaga [4].

Generalmente las distribuciones iniciales no-informativas, consideradas, para los parámetros β y σ^2 , son de la clase conjugada de distribuciones iniciales Normal-gamma:

$$\beta \sim N(\beta \mid \mu, \sigma^2 \mathbf{V}), \quad (5)$$

$$\frac{v\lambda}{\sigma^2} \sim \chi_v^2, \quad (6)$$

donde v, λ , el vector $(k+1)$ -dimensional μ y la matriz $\mathbf{V}_{(k+1) \times (k+1)}$ ², son hiperparámetros a seleccionar [2].

²La matriz de covarianza \mathbf{V} estará conformada por el producto de σ^2 por una matriz diagonal con entradas $(s_Y^2, \phi^2 s_1^{-2}, \dots, \phi^2 s_k^{-2})$, donde s_Y^2 denotará la varianza muestral de Y y s_i^2 la varianza muestral de X_i para $i = 1, \dots, k$. Por lo tanto, \mathbf{V} estará totalmente determinada al elegir el hiperparámetro ϕ .

5.2. Especificación de los hiperparámetros

Para la especificación de los hiperparámetros v , λ y ϕ , parámetros del modelo de regresión, se asumirá que la distribución de β está centrada en cero desde β_0 , que los β_i 's son independientes a priori, que el vector $\mu = (\hat{\beta}_0, 0, 0, \dots, 0)$, con $\hat{\beta}_0$ es el estimador de mínimos cuadrados de β_0 y, se considerarán las siguientes condiciones:

1. $p(\beta_1, \dots, \beta_k)$ aproximadamente uniforme sobre un hipercubo unitario $[-1, 1]^k$.
2. $p(\sigma^2)$ aproximadamente uniforme sobre $(a, 1)$ para a pequeño.
3. $p(\sigma^2 \leq 1)$ grande.

Para la maximización de $P(\sigma^2 \leq 1)$, formalmente, se debe considera:

- $\frac{p(\beta_1=0, \dots, \beta_k=0)}{P(\beta_1=1, \dots, \beta_k=1)} \leq K_1$.³
- $\{max_{a < \sigma^2 < 1} : p(\sigma^2)\} p(\sigma^2 = a) \leq K_2$.
- $\{max_{a < \sigma^2 < 1} : p(\sigma^2)\} p(\sigma^2 = 1) \leq K_2$.⁴

Tomando en cuenta todas las condiciones anteriores, es posible determinar los hiperparámetros para el modelo de regresión considerado [2]. En particular, si $a = 0.05$ entonces, $v = 2.58$, $\lambda = 0.28$, $\phi = 2.85$ y $p(\sigma^2 \leq 1) = 0.81$.

6. El paquete BMA en R

El programa **R**⁵, ofrece la aplicación **BMA**⁶ que permite implementar el procedimiento Bayesian Model Averaging. Específicamente, para la selección de variables a través del enfoque *MC*³, la aplicación BMA ofrece la función:

MC3.REG (all.y, all.x, num.its, M0.var= , M0.out= ...)⁷.

Esta función realiza la selección Bayesiana de variables simultáneas via Markov Chain Monte Carlo Model Composition (*MC*³), examinando los modelos potenciales a través del algoritmo Metropolis-Hastings sobre la integral de la verosimilitud y, finalizando la simulación, calcula la probabilidad final exacta de cada modelo considerado.

7. Predicción de Emisiones CO_2

En el siguiente estudio se aplica el procedimiento BMA para seleccionar un modelo de regresión lineal para la predicción de emisiones CO_2 a través del enfoque *MC*³, implementado con la ayuda del paquete BMA del programa R.

³Se selecciona $K_1 = \sqrt{10}$ de acuerdo a [9].

⁴Debido a que $p(\sigma^2)$ es menos importante que $p(\beta_1, \dots, \beta_k)$, se elige $K_2 = 10$.

⁵Software libre, disponible en: <http://www.r-project.org>.

⁶Descargable desde el CRAN (The Comprehensive R Archive Network) en R.

⁷La especificación detallada de los argumentos puede consultarse en [7].

7.1. Problema

Los estudios sobre el dióxido de carbono (uno de los gases causantes del efecto invernadero) son de suma importancia debido a su relación con el fenómeno del calentamiento global. Estos gases son continuamente emitidos y removidos en la atmósfera por procesos naturales sobre la tierra, pero las actividades antropogénicas causan cantidades adicionales de los mismos, incrementando sus concentraciones en la atmósfera, lo que tiende a sobrecalentarla.

En la actualidad, existe gran interés científico en modelar la relación que guardan las emisiones del dióxido de carbono (CO_2) con las propiedades del suelo. Con el propósito de modelar las emisiones de dióxido de carbono a partir de diferentes propiedades del suelo se realizaron, en determinados sitios de muestreo del Parque Ecológico Jaguarundi en Coatzacoalcos, Veracruz, México [10], mediciones a través del método de cámara estática, colocando 3 cámaras en los sitios seleccionados, buscando homogeneidad en el terreno y considerando un mismo plano por altitud así como cubierta vegetal. Las emisiones registradas fueron analizadas con un Detector de Ionización de Flama y las propiedades físicas y químicas de las muestras de suelo fueron analizadas por el Grupo de Edafología del Instituto de Geología de la UNAM.

Y	FE ug CO_2 / m2h (Variable dependiente)
x_1	Temperatura Cámara ($^{\circ}C$)
x_2	Temperatura Ambiental ($^{\circ}C$)
x_3	Temperatura Suelo ($^{\circ}C$)
x_4	Humedad Promedio (%)
x_5	Altitud msnm
x_6	Salinidad
x_7	N Total (%)
x_8	Carbono mg/g
x_9	P Mg/kg
x_{10}	Ph
x_{11}	CE mS/cm
x_{12}	D. Ap. g/cc
x_{13}	CMRA
x_{14}	Respiración Basal
x_{15}	% Arcilla
x_{16}	% Arena

Cuadro 1: Variables de la muestra

7.2. Aproximación

Los 16 posibles predictores (Cuadro 1), representan potencialmente $2^{16} = 65,536$ modelos de regresión lineal. Todas las posibles combinaciones de predictores se asumirán igualmente verosímiles *a priori*.

La implementación del procedimiento BMA, aproximado con el enfoque Markov Chain Monte Carlo Model Composition (MC^3) a través de la función MC3.REG, se efectuó con la siguiente codificación bajo las siguientes especificaciones:

- Codificación:

`MC3.REG(y, x, 30000, rep(T,16), nu=2.58, lambda=0.28, phi=2.85)`

- Especificaciones:

- x - Matriz de variables independientes.
- y - Vector de valores de la variable dependiente.
- Número de iteraciones a realizar 30000.
- $rep(T, 16)$ - Modelo de partida⁸.
- Los valores de los hiperparámetros son los especificados en la Sección 5.2.

8. Resultados y Discusión

Los resultados analíticos (Figura 1) calculados por la función *MC3.REG* proporcionan, además del número de modelos seleccionados y la aproximación de la distribución predictiva final, los 5 mejores modelos.

- El número total de modelos seleccionados fue de 7584.
- La probabilidad final acumulada de los mejores cinco modelos es de 0.1181.
- La probabilidad final de cada variable a incluirse en el modelo, se indica en la columna *prob*.
- Las 5 últimas columnas muestran los mejores modelos seleccionados y, debajo de cada uno de estos, se muestra su probabilidad final.

```

7584 models were selected
Best 5 models (cumulative posterior probability = 0.1181 ):

```

variables	prob	model 1	model 2	model 3	model 4	model 5
x1	0.15194	.	.	.	.	.
x2	0.10711	.	.	.	.	.
x3	0.14265	.	.	.	.	.
x4	0.28157	.	.	x	.	.
x5	0.54474	x	x	x	.	.
x6	0.13708	.	.	.	.	.
x7	0.38662	x	.	.	.	x
x8	0.20143	.	.	.	.	.
x9	0.10319	.	.	.	.	.
x10	0.08608	.	.	.	.	.
x11	0.23139	.	.	.	x	.
x12	0.11410	.	.	.	.	.
x13	0.22591	.	.	.	.	.
x14	0.13678	.	.	.	.	.
x15	0.15288	.	.	.	.	.
x16	0.11874	.	.	.	.	.
post prob		0.02936	0.02759	0.02068	0.02026	0.02019

Figura 1: MCMC - Model Composition

⁸El modelo de partida incluye los 16 predictores.

Otra forma de visualizar los resultados está dada en la Figura 2, la cual revela los primeros 25 modelos con probabilidad mayor a 0.004 y, muestra el número de veces que se visitó cada modelo en las iteraciones realizadas.

	post.prob	visit.count	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15	x16
1	0.029359230	765	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.027585641	687	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0.020680521	572	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0.020260267	531	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0.020188071	542	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0.012553841	296	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
7	0.012160858	293	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0.009420490	213	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
9	0.008694499	199	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
10	0.007727570	245	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
11	0.007346435	193	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
12	0.006930498	159	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
13	0.006265938	150	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0.005862426	221	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0.005699415	154	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0.005388506	103	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0.005291376	116	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0.005106452	97	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
19	0.005069942	210	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0.004935983	117	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0.004823873	174	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
22	0.004703542	176	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
23	0.004683452	101	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
24	0.004618190	165	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
25	0.004423850	108	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Figura 2: Modelos seleccionados

Los resultados (Fig. 1 y 2) muestran que los primeros tres modelos seleccionan los mismos predictores excepto, que el modelo 1 considera el porcentaje de Nitrógeno total (x_7), mientras que el modelo 3 considera la Humedad promedio (x_4) y, el modelo 2 no considera ninguna de éstas variables pero, de acuerdo a su probabilidad final, el modelo 1 debe ser empleado, ya que tiene una mejor probabilidad posterior (0.02936). Cabe señalar, que el modelo 1 coincide exactamete con uno de los cinco modelos obtenidos con el enfoque Occam's Window⁹[5], además, el mismo modelo es obtenido con el método de regresión paso a paso [3], con nivel de significancia $\alpha = 0.15$ de error tipo I para generar la F de entrada y la F de salida. Por otro lado, es importante notar, que la covariable x_{12} (Densidad Aparente), no está incluida en ninguno de los modelos (Fig.2), sin embargo, muchos autores en esta rama consideran que la Densidad Aparente es una variable imprescindible¹⁰.

⁹Enfoque que aproxima el modelo BMA, promediando solamente un subconjunto de modelos.

¹⁰El análisis realizado no consideró la colinealidad entre las variables, por lo que, se recomienda re-examinar el problema empleando otros procedimientos Bayesianos.

9. Conclusiones

El procedimiento *Bayesian Model Averaging* permite, de manera flexible y útil, elegir un modelo apropiado y realizar inferencias sobre las cantidades de interés y, aproximado con el enfoque MC^3 , generalmente es empleado para efectuar predicciones o bien, para hallar la distribución final de un parámetro [2]. Por lo tanto, el procedimiento BMA constituye una herramienta que permite aplicar el enfoque *Bayesiano* al problema de la selección de modelos, tomando en cuenta la incertidumbre inherente a cualquier modelo estadístico y, estableciendo un mecanismo coherente que, junto a la opinión de expertos, permite elegir el modelo más apropiado.

Referencias

- [1] Hoeting, J. A., Madigan, D., Raftery, A. E. y Volinsky, C. T. (1999). *Bayesian Model Averaging: A Tutorial (con discusión)*. *Statistical Science*, 14: 382-417.
- [2] Hoeting, J. A., Raftery, A. E. y Madigan, D. (1996). *A method for simultaneous variable selection and outlier identification in linear regression*. *Computational Statistics & Data Analysis*, 22: 251-270.
- [3] Linares Fleites, G., Saldaña Munive, A., Rivera Martínez, M. y Cervantes Reyes, H. (2008). *Comparación de Métodos de Regresión en la Predicción de Dióxido de Carbono*. (Artículo por publicar).
- [4] López Pérez, A. A. (2010). *Ajuste Bayesiano de Curvas*. Tesis de Maestría, BUAP, México.
- [5] López Pérez, A. A., Linares Fleites, G. y Saldaña Munive, A. (2010). *El procedimiento "Bayesian Model Averaging" en la selección del modelo para la predicción de emisiones de CO₂*. *Estadística en el Medio Ambiente y sus Usos*, BUAP.
- [6] Raftery, A. E. (1995). *Bayesian model selection in social research*. *Sociological Methodology*, Blackwell, Cambridge, 111-163.
- [7] Raftery, A. E., Hoeting, J. A., Volinsky C., Painter, I. y Yeung K. Y. (2010). *BMA: Bayesian Model Averaging*. R package version 1.13, URL <http://www.research.att.com/~volinsky/bma.html>.
- [8] Raftery, A. E., Madigan, D. y Hoeting, J. A. (1993). *Model selection and accounting for model uncertainty in linear regression models*. Technical Report 262, Department of Statistics, University of Washington, Seattle.
- [9] Raftery, A. E., Madigan, D. y Hoeting, J. A. (1997). *Bayesian model averaging for linear regression models*. *Journal of the American Statistical Association*, 92: 179-191.
- [10] Saldaña, M. J. A. y Ruiz, S. L. G. (2007). *Emisiones de gases de efecto invernadero en suelos perturbados con diferente cobertura vegetal en Coatzacoalcos, Veracruz, México*. (Artículo por publicar).

El impacto social y ambiental en la producción de energía eléctrica en La Ventosa, Oaxaca.

Ursula María del Carmen Fajardo Aguayo¹

¹Facultad de Derecho y Ciencias Sociales, BUAP.

Ave. San Claudio y 18 Sur, Col. San Manuel,

C.U, Puebla, Pue. 72570, México

chulina87@gmail.com

Resumen

Para entender y analizar el uso de las energías alternativas se tiene que hacer un análisis histórico de la energía eléctrica en México, posteriormente se estudiará los antecedentes de la energía eoloeléctrica del mismo, para describir las zonas eólicas más importantes. Se dice que nada está por encima de la Constitución Política, que los acuerdos y leyes que se firmen tienen que basarse en ella, pero la realidad es otra, ya que los diputados son capaces de modificar los artículos de la Constitución con el propósito de firmar nuevos acuerdos y obtener ganancias para beneficios propios. Se piensa que las compañías encargadas de generar energía eólica, brindan los mejores acuerdos a los dueños de las tierras para que haya una armonía entre ellas y la población, ellas hacen creer que es lo mejor para la comunidad porque van a tener diferentes beneficios como: empleos, mejores servicios, turismo y desarrollo.

Palabras clave:Renta de tierras, Leyes Mexicanas, Sociedad, Medio Ambiente, Aerogeneradores.

1. Introducción

En La Ventosa, Oaxaca, existen afectaciones, sociales, económicas y ambientales por la instalación de aerogeneradores para la producción de energía eólica debido a que el Acuerdo de Asociación Económica Concertación Política y Cooperación entre los Estados Unidos Mexicanos y la Comunidad Europea (TLCUEM) permitió el flujo de Inversión Extranjera Directa (IED) en esta materia.

Esto da como resultado que la gran mayoría de las empresas que han invertido en este proyecto sean extranjeras (españolas) lo cual ha provocado que las empresas mexicanas generadoras de energía eólica se queden a un lado debido a la escasa tecnología mexicana.

Por otro lado el TLCUEM estipula una cooperación mutua de intercambio de tecnología e información, para desarrollar los respectivos sectores energéticos, así como los cambios de información que sucedan en las legislaciones respectivas [1].

Los beneficios de la generación de electricidad derivada de la energía eólica son limitados, si se comparan con los costos sociales, económicos y ambientales, la capacidad que

se tiene de generar electricidad es de 85 MW los cuales no son utilizados para proveer de energía eléctrica al grueso de la sociedad (85,869 habitantes [1]) sino que son destinados para otros fines.

2. Objetivo general

Cuáles son los efectos ambientales, económicos, sociales y culturales que ha ocasionado la instalación de Granjas Eólicas en La Ventosa, Oaxaca.

Objetivo Específico:

Cuál es la relación entre el Acuerdo de Asociación Económica Concertación Política y Cooperación (TLCUEM) con la reforma y creación de nuevas leyes, en la inversión de empresas extranjeras para la energía eólica.

3. Marco teórico

Para el presente trabajo se utilizará la teoría de Susan Strange establece que "donde alguna vez los Estados controlaron a los mercados, en algunas cuestiones, ahora los mercados son los que controlan a los Estados" (Traducción propia)[2].

Strange no es la única que asevera lo antes mencionado, ya que Gustavo Castro afirma que "sin energía no hay tratados de 'libre comercio' [Y] a pesar de esta libertad que se pretende otorgar a las empresas para invertir, estas no lo harán en Latinoamérica si no tienen acceso al agua y la luz que necesitan" [4].

El conjunto de los recursos naturales están siendo incorporados a la lógica del mercado como "bienes comerciales" y al mismo tiempo son disputados por diversos sectores económicos como las mega-corporaciones de alimentos, de agua, de papel, de energía eléctrica, petroleras y farmacéuticas, entre otras [4]. La ineficiencia del Estado para realizar infraestructura, ha ocasionado que éste no pueda otorgar servicios públicos a su población, ya que las inversiones demandan más de lo que el Gobierno es capaz de cubrir.

Un claro ejemplo de esta problemática es la Secretaría de Energía (SENER), ya que "justificó que el sector eléctrico de México necesita 46 mil millones de dólares en inversiones hasta el año 2014 para atender la demanda anual de electricidad, que se proyecta crezca un 5.2%" [4].

Todo lo anterior ha provocado que "en este proceso, y en la medida en que los gobiernos van cediendo su lugar y papel a las grandes empresas transnacionales, puede visualizarse un corrimiento de la confrontación "sociedad vs. Gobiernos" a la de "sociedades vs. Empresas transnacionales" [4]. Es por eso que "los políticos hablan como si tuviesen las soluciones para los problemas económicos y sociales la gente ya no les cree" [3].

4. Metodología

La metodología a seguir va a ser descriptiva-analítica para explicar lo que acontece en la región.

En primera instancia se revisarán los antecedentes de la energía en México, consecutivamente se analizarán y se enmarcarán las zonas importantes en el mundo para la producción de energía eólica y, finalmente se explicará la potencialidad de La Ventosa como un área de interés exclusivo para los inversionistas extranjeros que aprovechan las oportunidades que les brinda el Acuerdo (TLCUEM).

Posteriormente, se hará un estudio del Acuerdo de Asociación Económica, Concertación Política y Cooperación recalando los capítulos que permiten la inversión de las empresas extranjeras en el país. Así mismo, se llevará a cabo una distinción de la legislación mexicana que regula esto, basándose en la Constitución Política Mexicana, la Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica y la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el financiamiento de la Transición Energética.

Como complemento, se emprendió una vista a la región, por una semana, en el mes de Abril de 2010, para que por medio de un cuestionario conocer la opinión de la población, que como familia o comunidad, han tenido de manera benéfica o perjudicial tomando en cuenta los cambios ambientales que han ocurrido en los últimos años.

5. Antecedentes de energía eléctrica en México

A finales del siglo XIX empezó a existir inversión extranjera directa en energía eléctrica en México. Un ejemplo claro fue la Mexican Gas Company, que tenía la concesión para iluminar las calles de la Ciudad de México desde 1881.

A principios del siglo XX, México contaba con una gran cantidad de empresas extranjeras invirtiendo en el sector eléctrico. La mayor parte de éstas, estaban concentradas en el centro del país, ya que en esta parte era donde la mancha poblacional crecía con mayor rapidez, a comparación de otras zonas del país. Además, está comprobado, que era más redituable proporcionarles el servicio, porque era la que pagaba excesivas tarifas, mal servicio e insuficiente fluido [5].

Además que el interés de las empresas no era exclusivamente prestar el servicio, sino que desde un principio se habían interesado en los grandes recursos hídricos que poseía el país, probablemente en ese entonces, no se imaginaron que no sería el único recurso natural que posee México, para generar energía eléctrica.

En esa época, la energía eléctrica no era facultad federal por lo tanto no autorizaba concesiones para generar, transmitir, distribuir y vender la misma, además no tenía una reglamentación específica. En consecuencia, la entonces Compañía de Luz y Fuerza Motriz S.A. celebraba contratos con diferentes Estados como: Distrito Federal el 3 de marzo de 1903; Puebla el 4 de abril de 1904; Estado de México y Distrito Cuautitlán el 8 de marzo de 1905 y Michoacán el 1 de diciembre de 1905 [5].

En los cuarentas, seguía existiendo un gran problema con la transmisión y distribución de energía eléctrica, ya que aún había dificultades de desabasto, altas tarifas y el servicio seguía sin llegar a la población rural, que en ese entonces estaba compuesta por más del 62% de la población [6].

El 12 de febrero de 1937, el Presidente Lázaro Cárdenas, realizó el proyecto de la creación de Comisión Federal de Electricidad, "con el propósito de organizar y dirigir el sistema nacional de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica que las empresas privadas que dominaban la rama no tenían interés en crear" [3]. Este proyecto se

sustentaría "en principios técnicos y económicos, sin propósitos de lucro y con la finalidad de obtener un costo mínimo y mayor rendimiento posible en beneficio de los intereses generales" [6].

El 31 de diciembre de 1938 las concesiones otorgadas a compañías extranjeras, tuvieron su fin cuando Cárdenas promulgó la Ley de la Industria Eléctrica. Dentro de los preceptos transitorios se establecía el término real de una concesión tomando en cuenta "El plazo original fijado; Su fecha de vencimiento; La posibilidad de que el concesionario solicite una prórroga a la que tiene derecho al momento de entrar en vigor las tarifas posibles" [5].

El 27 de septiembre de 1960, el Presidente Adolfo López Mateos, nacionalizó la industria eléctrica; modificando el Artículo 27 constitucional y adquiriendo el 90% de las acciones de la única empresa extranjera que quedaba, Compañía Mexicana de Luz y Fuerza Motriz y Subsidiarias.

La necesidad eléctrica creció, sobre todo por el avance rápido en la utilización de la energía eléctrica así, se daba fuerte apoyo a las estructuras sociales y económicas. En el aspecto doméstico, la electricidad permitía la elevación de la calidad del nivel de vida, pues permitía disponer de equipo eléctrico para alumbrado, en el transporte se reducía el tiempo de las distancias con el uso de tranvías, trolebuses y ferrocarriles electrificados. En las zonas urbanas; el alumbrado público y ornamental, el bombeo de aguas potables y negras, el equipo de tránsito y vigilancia, así como el uso de la electricidad en servicios de aeropuertos y comunicaciones, diversiones, comercios, transacciones bancarias y bursátiles, fuerza motriz para industrias, etcétera [5].

La época de los setentas se tiene muy presente debido a que en 1973 y 1979 hubo fuertes crisis respecto al petróleo, lo que obligó a países que no contaban con suficiente recurso natural (petróleo), buscar nuevas fuentes de producción de energía eléctrica, lo que provocó el desarrollo de energías alternativas.

5.1. Energías Alternativas

Según la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (por sus siglas, CONUEE) las energías renovables "Son aquellas fuentes de energía que no se acabarán o estarán disponibles mientras nosotros estemos en este planeta" [7].

Siendo la energía solar la "fuente energética total, porque excluyendo la geotermia todas las demás fuentes se derivan de la radiación de esta estrella" [7].

El Sol se encarga de calentar la atmósfera terrestre, causando altas temperaturas, lo que trae consigo diferencias de presión, y como consecuencia los vientos, origen de la energía eólica, también evapora el agua que bajo las condiciones atmosféricas propicias se precipita en forma de lluvia en zonas más altas, obteniendo con esto energía potencial la cual puede ser aprovechada con tecnologías de turbinas hidráulicas para generar electricidad o accionar equipos mecánicos.

5.2. Energía Eoloeléctrica en el Mundo

"La energía eólica ha sido aprovechada como fuerza motriz en la navegación y para generar energía mecánica en molinos de granos y bombas de agua desde tiempos muy remotos. Sólo desde el siglo pasado se comenzó a aprovechar para generar energía eléctrica" [7].

Los molinos de viento aparecieron más tarde, tal vez hacia el tercer milenio antes de Cristo y probablemente en el área de la antigua Mesopotamia, aunque no exista prueba alguna de ello [8].

En el resto de Europa, se cree, que el primer molino es de 1180, construido en Francia, al parecer se extendió rápidamente, aunque una crítica que hace la tecnología, es que su evolución fue lenta y no poseyeron grandes innovaciones.

En la época Renacentista, los molinos se fueron modificando con fines diferentes. "Los sistemas hidráulicos y eólicos constituyen las principales fuentes de energía motriz, y se multiplican las invenciones que utilizan las ruedas hidráulicas o los molinos de viento como fuerza impulsora" [8].

Ya hacia finales del siglo XVI en Francia e Inglaterra ocupaban el molino para obtener sal del mar, ya que facilitaba la evaporación del agua. En Holanda, se comenzó a utilizar primer molino de aceite y posteriormente fue ocupado para moler pasta de papel, a principios del siglo XIX "el principal objeto de atención en los desarrollos tecnológicos de molinos fueron las aspas y la forma de controlar automáticamente la velocidad del eje de rotación" [7].

A principios del siglo XX, los molinos empiezan a tener un gran auge pero, "A pesar de la mayor eficiencia aerodinámica y de adaptación como generadores de electricidad de las nuevas turbinas, las aplicaciones basadas en el aprovechamiento del viento como recurso energético continuaron declinando durante todo este periodo. Los combustibles fósiles, y en particular el petróleo, se habían ido imponiendo cada vez más como la principal e insustituible fuente de energía" [8].

Sin embargo, el costo de la producción de las aeroturbinas, iba siendo superior a comparación del petróleo, por lo tanto, los programas que existían para el aprovechamiento de energía eólica quedaron rezagados "El desarrollo de molinos para generar electricidad se generalizó a fines del Siglo XIX y principios del XX. El primer aerogenerador de energía eléctrica fue diseñado por P. Lacour en Dinamarca y entro en operación en 1890, poco tiempo después que el primer generador eléctrico de vapor" [7].

Después de la Primera Guerra Mundial, empiezan a resurgir los proyectos para la producción de energía, dividiéndose en dos: el primero a pequeña escala, con aerogeneradores de bajo potencial, para las comunidades alejadas y carentes de redes de electrificación; el segundo estaba basado, para producir energía eólica, a gran escala [8].

Con el término de la Segunda Guerra Mundial, y debido a la escasez que hubo, los gobiernos Europeos empezaron a interesarse por el aprovechamiento de energías alternativas. A mediados de los años sesentas, el uso de energía eólica se volvió a rezagar, ya que sus precios no eran competitivos a comparación de los combustibles convencionales.

Hacia 1973, las circunstancias eran totalmente distintas, debido al embargo petrolero que hubo a raíz del conflicto árabe-israelí, muchos países se preocupan por el gran incremento que existió en los precios del petróleo. Es realmente en esta época, cuando todos los Estados se empiezan a preocupar por el futuro de la energía eléctrica, ya que no era lo mismo el alza de los precios que tener dificultades con el suministro [8].

5.3. Energía Eoloeléctrica en México

El consumo de electricidad se halla determinado por la riqueza producida, la población y, en menor medida, por las condiciones climáticas de cada país [5].

En febrero de 1977 el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE, por sus siglas)

empezó un proyecto de investigación de energía eólica en El Gavillero (Huichapan, Hidalgo). La instalación iba a consistir en una microcentral eólica, compuesta por dos aerogeneradores de 2 kW cada uno. La energía producida iba a ser para energizar al ejido [7].

Este proyecto no funcionó porque sus componentes fallaban arriba de 2 kW de demanda, pero dejó tres grandes logros: un registro de horarios de velocidad del viento, se pudo conocer la energía que podría suministrarse al ejido y dejó un simulador de agua para prueba de aerobombas. La instalación fue desmantelada en 1996.

Posteriormente se hicieron pruebas con 7 aerogeneradores más, siendo El Gavillero el lugar donde la IIE los probaría.

Los aerogeneradores eran: 1.5 kW (1977-1978); Fénix (1981-1983); Albatros I (1981-1985); Albatros II (1986-1987); Fénix, segunda versión (1992-1995) y Avispa (1990-1995) [7].

Los cortes presupuestales, las inclemencias del tiempo y la mala elaboración de los mismos, no permitieron tener gran desarrollo para la fabricación de estos. Todo esto ocasionó que México no pudiera realizar un corredor eólico con medios propios. Por lo tanto, en 1994 en La Venta, Oaxaca, entró en funcionamiento una central eólica de 1575 kW, integrada por 7 aerogeneradores, siendo el resultado de una licitación publicada por CFE, que desde 1984 la Compañía ya había realizado estudios teniendo como resultado el potencial de viento que existe en la zona [7].

Los resultados según la propia CFE fueron exitosos, lo que generó mayores expectativas no sólo en los inversionistas sino también en los gobiernos Estatal y Federal, por lo que llegaron las primeras propuestas por parte de dos empresas con capital nacional y extranjero.

5.4. Zonas Eólicas en México

México cuenta con seis zonas de potencial eólico que podrían proporcionar luz a muchas comunidades indígenas, siempre y cuando la generación no ocasione afectaciones ambientales, y económicas, esas zonas son:

- Península de Baja California: las montañas son los sitios ideales de potencial explotable.
- Península de Yucatán: cuenta con vientos alisios.
- Altiplano Norte: compuesto por una gran extensión territorial, la corriente de chorro es aprovechada de octubre a marzo ya que impacta con la Sierra Madre Occidental.
- Región central: abarca de Tlaxcala a Guanajuato, pasando por la conocida bella airosa.
- Costas del país.
- Sur del Istmo de Tehuantepec esta siendo la más importante ya que el viento en Oaxaca es reconocido como el mejor del mundo” [11](Traducción propia).

6. Instrumentos legales que permiten la inversión de energías alternativas en Mexico

6.1. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

La historia nacional de normatividad de la generación y distribución de la energía eléctrica, es suficientemente ilustrativa en los diferentes caminos que se pueden explorar.

En nuestro país fue la industria privada la generadora inicial de energía eléctrica, particularmente en los sectores textiles y minero, cuyos excedentes de producción para el autoconsumo eran comercializados pero sin alcanzar, desde luego, a cubrir la demanda de la población ni de otros sectores industriales y comerciales. Puesto que para la generación de energía eléctrica fue mediante plantas hidroeléctricas, su regulación se efectuó a partir de los ordenamientos que regulaban el uso del agua. En virtud del principio constitucional sobre la propiedad originaria de la Nación sobre tierras y aguas, establecido en el Artículo 27, la operación de plantas hidroeléctricas se hacía mediante concesión otorgada por el Estado para el uso del agua. La nacionalización de la industria eléctrica en 1960, durante el gobierno del presidente Adolfo López Mateos estuvo precedida por la adquisición de la mayoría de las acciones de la Compañía Mexicana de Luz y Fuerza Motriz, hasta entonces en manos de inversionistas extranjeros.

La correspondiente reforma del Artículo 27 Constitucional estableció, como "facultad exclusiva de la Nación, la de generar, transformar, distribuir y abastecer energía eléctrica, además de prohibir la concesión a particulares de los bienes y recursos naturales necesarios para dichos fines" [1] texto actualmente reformado y donde permite la participación de los sectores social y privado.

6.2. Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica

La facultad del Congreso de la Unión para legislar a nivel federal en materia de energía eléctrica quedó consignada en el artículo 73 constitucional durante el periodo presidencial de Abelardo L. Rodríguez.

El artículo primero de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (por sus siglas, LSPEE), menciona que le "Corresponde exclusivamente a la Nación, generar, conducir, transformar, distribuir y abastecer energía eléctrica que tenga por objeto la prestación de servicio público, en los términos del Artículo 27 Constitucional. En esta materia no se otorgarán concesiones a los particulares y la Nación aprovechará a través de la Comisión Federal de Electricidad, los bienes y recursos materiales que se requieran para dichos fines" [1].

Lo anterior se contradice con el artículo noveno, ya que menciona que la Comisión Federal de Electricidad tiene por objeto: III.- Exportar energía eléctrica y, en forma exclusiva, importarla para la prestación del servicio público. VII.- Celebrar convenios o contratos con los Gobiernos de las Entidades Federativas y de los Municipios o con entidades públicas y privadas o personas físicas, para la realización de actos relacionados con la prestación del servicio público de energía eléctrica.

Cabe mencionar que dicha ley fue reformada el 22 de Diciembre de 1975, esto hace suponer que, ya se tenía planeado el proyecto de La Ventosa, Oaxaca, en dicha zona se empezaron hacer estudios en 1984, por lo tanto, no es un proyecto nuevo.

6.3. Acuerdo de Asociación Económica Concertación Política y Cooperación

En la década de los sesentas los países de la Comunidad Económica Europea (por sus siglas, CEE), empiezan a mostrar interés en América Latina; siendo México el país que más atención obtuvo, ya que era el más estable política y económicamente hablando [14].

La primera resolución entre México y la CEE fue el Acuerdo Marco de Cooperación, firmado el 15 de julio de 1975, estableciendo "una política de cooperación hacia México en el ámbito económico y tecnológico" [14].

Con este acercamiento previo y ante el fracaso del Acuerdo Marco de Cooperación, en Luxemburgo el 26 de abril de 1991, México y la CEE firmaron el Acuerdo Marco de Cooperación de tercera generación. "El acuerdo tenía muchas similitudes con el firmado en 1975; entre las novedades estaban; un especial énfasis en la cooperación científico-técnica, de telecomunicaciones, energía, medio ambiente y desarrollo industrial" [14].

En 1994 México firma con Estados Unidos de América y Canadá un Tratado de Libre Comercio, esto la Unión Europea (UE, por sus siglas) lo ve como un trampolín para poder introducir sus productos en América del Norte. A partir de este antecedente, los países de la UE querían un nuevo Acuerdo que reemplazara al de 1991.

Para el 2 de mayo de 1995, la UE y México habían decidido ampliar sus relaciones, Ernesto Zedillo, en 1996, presidente en turno de México, había visitado Italia, España y Reino Unido para conseguir apoyo.

Finalmente, el 8 de diciembre de 1997 se firmó el primer Acuerdo de Libre Comercio Transatlántico, con el nombre oficial Acuerdo de Asociación Económica, Concertación Política y Cooperación.

En el apartado de cooperación, que para el caso de estudio es el más importante a desarrollar, "la UE y México se comprometieron a intercambiar información y también a revisar periódicamente el desarrollo de la cooperación en los siguientes sectores: industrial, energía, minería, transporte, lucha contra el tráfico de drogas, educación, turismo, cultura, medio ambiente, recursos naturales, pesca, pobreza, refugiados, salud, protección al consumidor y derechos de autor, entre otros" [14].

6.4. El TLCUEM y la Energía Eólica en México

En el Título VI del TLCUEM queda establecida la parte de Cooperación, compuesta del Artículo 13 al 44, siendo los más importantes a resaltar, para el caso de; la energía eólica: -Artículo 15: Fomento a las inversiones. -Artículo 23: Cooperación en el sector de la energía. -Artículo 34: Cooperación en materia de medio ambiente y recursos naturales. -Artículo 36: Cooperación en asuntos sociales y para la superación de la pobreza.

El Artículo 15, hace mención a las inversiones que ambos firmantes van a poder realizar con el contrario, siendo las empresas europeas las más beneficiadas, porque son las que aseguran su inversión en el país, ya que poseen suficientes recursos económicos para poder instalar grandes infraestructuras. El apartado menciona: Las Partes contribuirán a establecer condiciones atractivas y estables para las inversiones recíprocas.

Esta cooperación se traducirá, entre otras cosas, en lo siguiente: a) mecanismos de información, de identificación y de divulgación de las legislaciones y de las oportunidades de inversión; b) apoyo al desarrollo de un entorno jurídico favorable a la inversión entre las Partes, en caso necesario mediante la celebración entre México y los Estados miembros

de acuerdos de promoción y de protección de las inversiones y de acuerdos destinados a evitar la doble imposición; c) el desarrollo de procedimientos administrativos armonizados y simplificados; d) el desarrollo de mecanismos de inversión conjunta, en particular con las pequeñas y medianas empresas de las Partes. Los únicos beneficiados por la firma del Acuerdo, han sido los países Europeos, ya que han invertido en Estados que poseen grandes recursos naturales y humanos, para que así obtengan el doble de beneficio en sus utilidades, además que estas son apoyadas por los estímulos fiscales de los gobiernos estatales.

Aunado a lo antes mencionado, se ha ocasionado que en las regiones donde se ubican las inversiones, exista un desequilibrio regional, que en ocasiones irrumpen con las actividades de la zona y esto tiene como consecuencia el surgimiento de economías enclave. Inclusive las compras públicas, que "pueden y deben servir para impulsar la producción en áreas deprimidas, en comunidades indígenas y en particular en empresas de mujeres, entre otros proveedores de menor tamaño. Con el TLCUEM se ha renunciado a esto a pesar de la propuestas de movimientos sociales y organizaciones de la sociedad civil" [15].

Retomando el Acuerdo, el Artículo 23 establece la ayuda a la cooperación en el sector energía y menciona: 1. La cooperación entre las dos partes tendrá por objeto desarrollar sus respectivos sectores de energía, concentrándose en la promoción de transferencia de tecnología y los intercambios de información sobre las legislaciones respectivas. 2. La cooperación en este sector se llevará a cabo, fundamentalmente, mediante intercambios de información, formación de recursos humanos, transferencia de tecnología y proyectos conjuntos de desarrollo tecnológico y de infraestructuras, el diseño de procesos más eficientes de generación de energía, el uso racional de energía, el apoyo al uso de fuentes alternativas de energía que protejan el medio ambiente y sean renovables, y la promoción de proyectos de reciclaje y tratamiento de residuos para su utilización energética.

Actualmente México carece de infraestructura, esto ocasiona que no se cubran las necesidades de la población "por lo que el Estado debe recurrir a otros esquemas de financiamiento ya no sólo públicos sino privados" [16]. En el Acuerdo, la Cooperación en materia de medio ambiente y recursos naturales, también es mencionada, en el Artículo 34, establece: 1. En todas las medidas de cooperación que inicien en virtud del presente Acuerdo, las Partes deberán tener en cuenta la necesidad de preservar el medio ambiente y los equilibrios ecológicos. 2. Las Partes se comprometen a desarrollar la cooperación para prevenir el deterioro ambiental; fomentar la conservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales; desarrollar, difundir e intercambiar información y experiencias sobre legislación ambiental; estimular la utilización de incentivos económicos para promover su cumplimiento; fortalecer la gestión ambiental en los distintos niveles de gobierno; promover la formación de recursos humanos, la educación en temas de medio ambiente y la ejecución de proyectos de investigación conjunta; y desarrollar canales para la participación social. 3. Las Partes promoverán el acceso mutuo a los programas en la materia según sus modalidades específicas. 4. La cooperación entre las Partes podría desembocar en la celebración de un acuerdo sectorial en el ámbito del medio ambiente y recursos naturales, si se considera pertinente.

La Cooperación en medio ambiente ha sido totalmente nula, ya que "los promotores de parques eólicos obtendrán la autorización para su instalación con un informe preventivo, que sustituiría el requisito de manifestación del impacto ambiental" [17].

Otro artículo a resaltar es el 36, ya que en este se enmarca la Cooperación en asuntos sociales y para la superación de la pobreza, estableciendo: 1. Las Partes mantendrán un

diálogo sobre todos los aspectos de la agenda social que sean de interés para cualquiera de ellas. Se deberán incluir temas relacionados con grupos y regiones vulnerables entre los que se encuentran: indígenas, campesinos pobres, mujeres de escasos recursos y otros grupos de población en condiciones de pobreza. 2. Las Partes reconocen la importancia de armonizar el desarrollo económico y social preservando los derechos fundamentales de los grupos mencionados en el párrafo anterior. Las bases del crecimiento deberán generar empleos y asegurar mejores niveles de vida a la población menos favorecida. 3. Las Partes sostendrán una concertación periódica sobre acciones de cooperación que involucren a la sociedad civil tendientes a proporcionar oportunidades para la creación de empleos, formación profesional y generación de ingresos.

Este es otro punto importante, ya que hay muchas quejas hacia las transnacionales por parte de los ejidatarios; no es porque estén en contra de la energía renovable, sino en la forma de negociación de las transnacionales para arrendar la tierra e instalar los aerogeneradores, a precios bajos y sin beneficio alguno para las comunidades, ya que la energía no la van a utilizar ellos [10].

Ya habiendo permitido la entrada de energías alternativas por parte de empresas europeas, establecido en el Artículo 23, los aranceles fueron lo que menos les preocupó, ya que en las decisiones tomadas sobre aranceles el Artículo 6 establece: Aranceles aduaneros sobre las importaciones originarias de la Comunidad 1. En la fecha de entrada en vigor de esta Decisión, México eliminará todos los aranceles aduaneros sobre las importaciones de productos originarios de la Comunidad, listados en la categoría "A" del anexo II (Calendario de Desgravación de México). Por lo tanto desde la entrada en vigor del tratado, en el año 2000, los aerogeneradores y sus partes, quedan clasificados como categoría "A", por lo tanto, esto hace que queden exentos de tasa base.

6.5. Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética

El artículo primero de dicha ley menciona que "es de orden público y de observancia general en toda la República Mexicana. Tiene por objeto regular el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y las tecnologías limpias para generar electricidad con fines distintos a la prestación del servicio público de energía eléctrica, así como establecer la estrategia nacional y los instrumentos para el financiamiento de la transición energética" [1].

En el Artículo segundo, se menciona que el aprovechamiento de dichas fuentes es de utilidad pública para que así el Estado Mexicano promueva la reducción de la dependencia de los hidrocarburos como fuente primaria de energía.

El artículo octavo, indica que el Ejecutivo Federal, por medio de la Secretaría de Energía puede suscribir convenios y acuerdos de coordinación con el Distrito Federal u otros Estados, siendo el objeto: I. Establezcan bases de participación para instrumentar las disposiciones que emita el Ejecutivo Federal de conformidad con la presente Ley; II. Promuevan acciones de apoyo al desarrollo industrial para el aprovechamiento de las energías renovables; III. Faciliten el acceso a aquellas zonas con un alto potencial de fuentes de energías renovables para su aprovechamiento y promuevan la compatibilidad de los usos de suelo para tales fines; IV. Establezcan regulaciones de uso del suelo y de construcciones, que tomen en cuenta los intereses de los propietarios o poseedores de terrenos para el aprovechamiento de las energías renovables, y V. Simplifiquen los pro-

cedimientos administrativos para la obtención de permisos y licencias para los proyectos de aprovechamiento de energías renovables. Esta ley se creó después de que ya estaba el proyecto, beneficiando a unos pocos y a la masa poblacional afectándola en magnitud.

7. Resultados y discusión

En la investigación de campo, se notó el descontento de la gente, incluso llegaron a suponer que se trataba de una visita por parte del gobierno, lo que ocasionó un mal trato por parte de ellos.

Por lo que respecta a los contratos firmados se observan muchas irregularidades, las cuales ya no pueden ser enmendadas, ya que la mayoría de la gente que firmó, no sabía leer ni escribir.

En cuanto a el pago de las rentas osilan, de 40 a 60 pesos anuales por metro cuadrado, cuando algunas personas exigían que se les pagara por metro cúbico (ya que tienen que rascar el subsuelo para poder instalar un aerogenerador), además que si llega a morir el dueño de la propiedad, en automático pasa a formar parte de la empresa, ya que así está estipulado en el contrato.

El impacto ambiental es enorme, en primera instancia afecta a las aves, porque vuelan más bajo, su sentido de orientación se afectan y algunas veces mueren, esto a su vez afecta en las cosechas, ya que ellos son los encargados de comerse las plagas de las mismas.

8. Conclusiones

El uso de las energías alternativas es una solución para que las emisiones de CO_2 disminuyan a gran escala, pero detrás de la generación de energía eólica hay muchas irregularidades, tanto en las leyes, como en la aplicación de las mismas.

Se dice que nada está por encima de la Constitución, pero la realidad es otra, ya que lo que está por encima son los intereses de empresas como del Gobierno, no importando lo que la sociedad quiera y mucho menos lo que le pase al ambiente.

Lo que más le preocupa a la sociedad, es que dentro de 20 años, serán enfermedades, como la leucemia, entre otras las que se presenten con más frecuencia entre la población esto debido al aumento de la radicación por la producción de energía eólica, lo cual implicará un aumento en la cantidad de recursos económicos que tendrán que enfocarse a la curación de dicha enfermedad .

Con el presente trabajo se comprueba la teoría de Susan Strange, las empresas lograron instalarse en La Ventosa, Oaxaca, postrándose por encima del Estado consiguieron cambiar la legislación mexicana para su propio beneficio, gracias a esto van a estar muchos años en México y el daño social, ambiental, económico y cultural se está tornando irreversible.

Referencias

- [1] Congreso de Diputados del H. Congreso de la Unión
<http://www.ordenjuridico.gob.mx/>

- [2] Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, <http://www.inafed.gob.mx/work/templates/enciclo/oaxaca/>
- [3] Strange, Susan (2003) *La Retirada del Estado*. Icaria, España.
- [4] Castro, Gustavo (2006) *El agua y los ríos amenazados en México: los retos para el movimiento social Movimientos sociales, nuevas realidades, nuevos deseos*. Año VII, No. 21 Septiembre-Diciembre, Observatorio Social de América Latina, Argentina.
- [5] Campos, Leticia. (2005) *La electricidad en la Ciudad de México y área conurbada*. Siglo Veintiuno, México
- [6] Comisión Federal de Electricidad, <http://www.cfe.gob.mx>
- [7] Nacional para el Ahorro de Energía, <http://www.conae.gob.mx/wb/>
- [8] Cadíz, Juan Carlos.(1984) *La energía eólica: tecnología e historia*. Hermann Blume. Madrid
- [9] Radio Casa Pueblo, <http://www.cienciapr.org/>
- [10] Red Mexicana de Acción Frente al Libre Comercio, <http://www.rmalc.org.mx/documentos/FIANL.pdf>
- [11] Asociación Mexicana de Energía Eólica, <http://www.amdee.org/>
- [12] García-Pelayo y G., R. (1989) *Pequeño Larousse Ilustrado*. Larousse, México
- [13] Explorando México, <http://www.explorandomexico.com.mx/about-mexico/7/273/>
- [14] Secretaria de Relaciones Exteriores, www.sre.gob.mx/uaos
- [15] Transnational Institute, <http://www.tni.org/>
- [16] Observatorio Social de las Relaciones América Latina-Unión Europea <http://www.observatorioual-alop.eu>
- [17] El Universal, <http://www.eluniversal.com.mx>

Especies arbóreas como recurso energético de uso doméstico, en Santo Domingo Huehuetlán el Grande, Puebla

Ana Laura García Fragoso¹,
David Martínez Moreno¹,
Tobías Rodríguez Ramírez¹,
Francisco Basurto Peña²
y Gustavo Morales Ayala¹

¹Escuela de Biología, BUAP

²Jardín Botánico, UNAM

*Avenida San Claudio y 18 Sur, Col. San Manuel, C.U,
Puebla, Pue. 72570, México,*

e-mail: davidman850@hotmail.com, abasurto@ibiologia.unam.mx.

Resumen

Las Selvas Tropicales Secas en México están siendo amenazadas por la colecta de leña usada como combustible. El objetivo de este estudio fue registrar el manejo y uso de la leña en el municipio de Huehuetlán el Grande. Para ello se establecieron 10 sitios con cinco cuadrantes de 16X16 metros, para evaluar el número de individuos y su daño.

Los registros fueron: número de árboles, árboles sin daño, número de ramas por individuo, ramas cortadas (vivas y muertas), tocones vivos y muertos, diámetro a la altura del pecho (DAP), peso de los atados de leña para estimar cuanta leña utiliza cada familia y registrar que especies colectan. De las muestras colectadas se separaron 2 gramos de cada muestra para análisis de calorías. En las comunidades de San Nicolás Huajuapán y Santa Martha Yancuitlalpan se aplicaron cuestionarios relacionados al manejo y uso de la leña. Los resultados mostraron que el número de tocones vivos y muertos fue en promedio de 2 por individuo, las encuestas demostraron que el 100 % de la gente utiliza 8 especies y 6 para su venta. Además, el tehuixtle y el encino son las que liberan pocas calorías. Se concluye, que la colecta se realiza en función de la distancia, las ramas son las más depredadas y cada familia consume 10 Kilogramos/día.

1. Introducción

México es uno de los 12 países megadiversos, que aloja entre el 60 y 70 % de la biodiversidad total del planeta (CONABIO, 1998), por lo que es importante el desarrollo sustentable de los recursos biológicos, conocer y estudiar la distribución de todo lo que

alberga, estudiar la fenología y la actividad antropogénica.

Actualmente, las Selvas Secas de América ocupan gran parte de la Costa del Pacífico de México, Centro y Sudamérica. A nivel mundial estas Selvas conforman el 42 % de la vegetación tropical del planeta.

En México, las Selvas Secas se distribuyen en toda la Costa del Pacífico, desde Nayarit hasta Oaxaca, en el Sur de Baja California y la Península de Yucatán (Balvanera *et al.*, 2000), la mayor parte del territorio nacional se encuentra cubierto por Desiertos (37 %), seguido de Bosque de Coníferas y Encinos (19.34 %), y Selvas Tropicales Secas (14.14 %), las cuales albergan una gran cantidad de especies (CONABIO, 1998; Bellot y Benétez, 2007), estas son las menos conocidas y de las más amenazadas por las actividades inadecuadas de explotación que realizan los humanos.

Esto se ve reflejado actualmente ya que mientras en el pasado se contaba con una mayor cantidad de superficie (CONABIO, 1998; Rzedowsky, 2006; Zepeda y Velázquez, 1999), en la actualidad, solo se cuenta con 6 % de superficie disponible.

En el caso de los Encinares (*et al Quercus sp.*), son comunidades vegetales muy características de las zonas montañosas de México y junto con los Pinares, constituyen la mayor parte de la cubierta vegetal de áreas de clima templado y semihúmedo (Rzedowsky, 2006). En estas áreas el uso indiscriminado de los recursos ha sido la tala, principalmente para leña como combustible, en nuestro país se estima que la leña aporta entre el 8-10 % de la energía final y entre el 36-45 % del sector residencial (vivienda comercial y público, industria, transporte y agropecuario) (Díaz y Maserá, 2002; SENER, 2002).

Con respecto al Estado de Puebla, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SMRN), detectó que está aumentado el consumo de leña entre las amas de casa de comunidades marginadas, pues es la única forma que tienen para cocinar o realizar actividades cotidianas. Maserá *et al.* (1997; Díaz y Maserá, 2002), proponen una metodología, que permite estimar de forma más precisa el consumo de leña en México. Asimismo, estima la demanda de leña de la pequeña industria y analiza los impactos ambientales ocasionados por el uso de este combustible. Menciona que existe una tendencia inversamente proporcional entre el tamaño de la localidad y usuarios exclusivos de leña, es decir, a menor tamaño es la localidad, mayor porcentaje de usuarios exclusivos de leña. Por su parte, el número de usuarios mixtos se incrementa al aumentar el tamaño de la población. Existe información que demuestra que poblaciones urbanas siguen usando leña ya sea de forma exclusiva o combinada con gas LP, tal es el caso de Pátzcuaro, Michoacán, con más de 50 mil habitantes, donde el 15 % de su población usan leña combinada con gas LP.

En México la leña es el principal recurso que se ha venido utilizando en los hogares rurales y urbanos desde épocas muy remotas hasta la actualidad, por ejemplo: en el año de 1990 su volumen de consumo fue de 36 millones de metros cúbicos de leña al año para la preparación de alimentos. Cada familia consume en promedio 4 m³ de leña/ año. También en 1990, tres estados de la República Mexicana registraron altos índices de consumo de leña. Según datos del INEGI; Vera-cruz, Coahuila y Oaxaca, situándose el Estado de Veracruz en primer lugar con un consumo de 1.74 millones de toneladas (Cayetano y

Meyer, 2006).

Martínez (1992), realizó un estudio en el municipio de Zozocolco de Hidalgo en Veracruz, con el objetivo de conocer la utilidad que se le da a la leña, se determinaron 29 familias y 69 especies que se utilizan como combustible, entre otros usos, y la clasificación de la leña fue de acuerdo al criterio de los pobladores quienes las clasifican: como leñas de buena calidad y leñas de mala calidad, respecto a su poder calorífico señala que una leña de mala calidad al quemarse solo produce flama, cenizas y humo y que una leña de buena calidad al quemarse produce brasas o carbón. De la misma manera se determinó el calor de combustión de las principales especies utilizadas como leña, obteniendo el valor más bajo para *Byrsomina crassifolia* 4360 Cal/kg y el valor más alto para *Pseudolmedia oxiphylaria* 6654 Cal/kg; además se cuantificaron los kilogramos de leña utilizados para cada familia zozocolquense y se obtuvo que cada persona gasta 2.1kg de leña al día, y 9.83 kg por familia. Concluye, que el conocimiento tradicional de la vegetación les permite hacer uso múltiple de las plantas, que el consumo de leña depende de factores sociales y climáticos, y se encuentra inmerso en variables económicas y sociales para zonas rurales mexicanas, que interviene en el manejo del ecosistema.

Díaz y Masera (2002), proponen un método con un mayor nivel de análisis de las tareas energéticas o usos finales; la cual permite estimar el consumo de leña en el sector residencial de México. Genera una clasificación de los estados por consumo de leña. Basado en tres variables que muestran influencia crítica en la dinámica e impacto del uso de la leña: A) Saturación de usuarios de leña en el área rural, B) Población que usa leña y C) Tasa media de crecimiento anual de los usuarios de leña. Proponiendo la siguiente clasificación: a) Región poco crítica, integrada por: Baja California, Baja California Sur, Coahuila, Colima, Distrito Federal, Morelos, Nayarit, Nuevo León, Sinaloa, Sonora y Tamaulipas; b) Región medianamente crítica, compuesta por: Aguascalientes, Campeche, Chihuahua, Durango, Jalisco, Estado de México, Querétaro, San Luis Potosí, Tlaxcala y Zacatecas; c) Región crítica, formada por: Chiapas, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Michoacán, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz y Yucatán. Díaz y Masera (2002) desde los años ochentas han realizado estudios sobre el consumo de leña en México, pero la estimación no es confiable debido a que se han llevado a cabo diversas modificaciones, que aparecen en el Cuadro 1, además mencionan que existen estudios sobre el consumo de leña en las comunidades rurales donde se aplicaron encuestas a 110 comunidades en todo el país a través de la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal (SEMIP).

Este estudio es uno de los primeros y tiene una aproximación real del consumo de leña en México. Concluyen que es necesario promover tecnologías eficientes que puedan basarse en otras fuentes de energía (solar, hidráulica, eólica; entre otras). Y que debe plantearse una política energética para cada región (estado y municipio) del país. Diseñar programas que faciliten la adopción de tecnologías eficientes de la leña y usos de energías renovables.

El Instituto Nacional de Ecología (INE) (2002) señala, que en 1960 el consumo de leña fue de 315.9 PJ (peta joules)/año, para la década siguiente se experimento un incremento de 8.4 % llegando a 342.4 PJ/año. A partir de 1970 el consumo de leña comienza a decrecer 0.5 % cada década llegando a un consumo nacional de 338.1 PJ /año en el año 2000. Este

Estimación	Consumo energético pj/año	Volumen m^3 /año
Sarh (1981)	n.d.(1980)	17.3-27.6
Guzmán et al. (1985)	412(1970)	33.0
SEMIP (1988)	402 (1980)	32.0
Masera et al. (1993)	293 (1988)	n.d.
INIFAP (Castillo et al., 1989)	246 (1987)	23.2
Sheinteum (1996)	277 (1980)	n.d.
	274 (1990)	
Díaz y Masera (1999)	300 (1990)	n.d.
Díaz (2000)	316 (1990)	
	320 (2000)	29.4-34.3
SENER (2002)	256 (2001)	
	338 (2001)	n.d

Cuadro 1: Muestra las estimaciones del consumo residencial de leña en México (Tomada de Díaz y Masera, 2002)

decremento se debe principalmente a la disminución de los usuarios en las zonas rurales, probablemente se deba a que salen a trabajar a las ciudades o emigran al extranjero o por la extensión de las ciudades. Los consumos de leña por entidad federativa para el año 2000 son muy diferentes. Mientras que Veracruz es el estado que consume mayor cantidad de leña con una participación del 11 %, seguido por Chiapas con un 10 % y Oaxaca con 9 %, en Baja California Sur, Baja California Norte, Colima y el Distrito Federal, se presentan consumos prácticamente nulos.

Vergara y Amo (2004) llevaron a cabo un estudio en tres estados de la República Mexicana (Campeche, Chiapas y Veracruz), el objetivo fue: conocer el uso de la madera como fuente primaria de energía, disponibilidad e importancia de la madera en actividades de la vida diaria y mejorar el uso de la madera en forma más eficiente. Los resultados muestran que, el 71 % de las personas utilizan la madera como fuente de energía, el 22 % utilizan una combinación de gas líquido y madera; concluyen que el consumo de leña debe de reducirse debido a que genera daños a la salud.

Escobar *et al.* (2009), realizaron un estudio en Ocuilapa de Juárez, Chiapas con la finalidad de gestionar un proyecto para la producción de leña, que permita cubrir la demanda local y municipal. Estableciendo tres etapas, diagnóstico, implementación y evaluación. Obteniendo como resultado que los sistemas de acopio de leña fueron el cafetal (76 %); el acahual y bosque primario (55 %); y el potrero (40 %) de las familias entrevistadas; el 100 % utiliza leña y solo 37 % de ellas utilizan leña y gas LP. El consumo doméstico de leña fue de 23.85 kilogramos por familia en peso seco. Concluyen que Ocuilapa de Juárez forma parte de la Reserva de la Biosfera Selva El Ocote y toda aportación de conservación y desarrollo local impactará directamente a la Reserva. El acceso a la leña está relacionado a la tenencia de la tierra, en el que los propietarios tienen el más alto control sobre los recursos y pueden manejar la vegetación e integrar varias actividades productivas para su conveniencia. Los dispositivos de combustión que se utilizan para uso doméstico son de baja eficiencia (entre el 5 % y el 17 %), que ocasiona un elevado consumo de leña y

grandes niveles de contaminación al interior de la vivienda y que producen severos daños a la salud. Es necesario trabajar en una difusión y gestión que permitan la apropiación de tecnologías más eficientes de combustión, tales como las estufas ahorradoras de leña.

El presente estudio tuvo como objetivo registrar el estado actual del uso y manejo de la leña en la Selva Tropical Seca que se encuentra ubicada en el Municipio de Santo Domingo Huehuetlán el Grande, inmerso en la Sierra del Tentzo, Puebla.

2. Zona de Estudio

Para la realización del presente estudio, se eligió el municipio de Huehuetlán el Grande, Puebla, debido a que, este lugar se encuentra cerca de la ciudad de Puebla (1 hora) y cuenta con una Selva Tropical Seca, donde se extraen diversos productos forestales (leña de diversas especies, como el caso del encino (*Quercus sp*) y no forestales (palma, frutos, resina, entre otras).

El municipio de Huehuetlán el Grande se localiza en la parte central del estado de Puebla. Sus coordenadas geográficas son los paralelos 18° 41' 06" y 18° 53' 12" de Latitud Norte, y los meridianos 98° 03' 18" y 98° 15' 06" de Longitud Oeste. Tiene una distancia aproximada de 46 Km. a la capital del estado de Puebla y sus colindancias son: Al norte con la ciudad de Puebla y Tzicatlacoyan, al sur limita con Huatlatlauca, al oeste limita con la Magdalena Tlatlauquitepec y al poniente limita con Teopantlán, con una superficie de 264.08 kilómetros cuadrados que lo ubica en el lugar 39 con respecto a los demás municipios del estado. El municipio forma parte de tres regiones morfológicas; a partir de la cota 2,000 hacia el norte, forma parte de la Sierra del Tentzo; el área comprendida entre el río Huehuetlán y la cota 1,500 al suroeste pertenece al Valle de Matamoros; el resto del municipio constituye el extremo oriental del valle de Atlixco.

El relieve en general es accidentado, presenta sus mayores alturas en la Sierra del Tentzo y desciende el nivel hacia el sur de una manera abrupta y constante, de más de 2,000 metros sobre el nivel del mar hasta menos de 1,400. Tiene una distancia aproximada a la capital del estado de 46 km. Con un tiempo aproximado de 1 hora; la población de Santo Domingo Huehuetlán el Grande es de aproximadamente de 2.057 habitantes (Enciclopedia de los Municipios de México, 1999).

3. Material y Métodos

El presente trabajo se llevó a cabo en los meses de Enero a Noviembre del 2009, en la Selva Tropical Seca perteneciente al Municipio de Santo Domingo Huehuetlán el Grande, Puebla. Inicialmente se realizó una salida de prospección para considerar la zona en la cual se iba a trabajar y así estimar la distribución y el daño de los árboles. Además se elaboró un diagrama donde se dibujaron las figuras de los árboles en forma tubular para facilitar el conteo de ramas y de esta forma se facilitara el trabajo de campo.

Después se dispuso de otra salida para determinar los sitios de muestreo, registrando la ubicación geográfica de cada sitio por medio de un GPS (Magallanes), donde se establecieron 10 sitios (Figura 1).

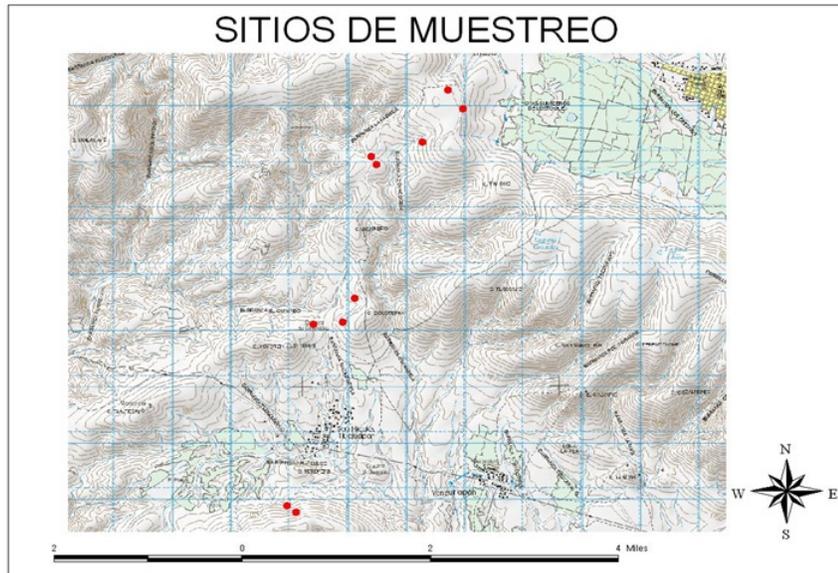


Figura 1: Lugares de muestreo.

Para cada sitio fueron establecidos cinco puntos donde se aplicaron cuadrantes de 16 X16 metros (según la metodología de Cox, 1976), para evaluar el número de individuos y el daño en cada uno de ellos. Cada cuadrante fue georeferenciado con un GPS (Magallanes), los datos que se registraron fueron: número de árboles, árboles sin daño, número de ramas por individuo, ramas cortadas, tocones vivos y muertos, el diámetro a la altura del pecho (DAP) en cada individuo registrado. Además se registró el peso de los atados de leña con el fin de conocer la cantidad en kilogramos (kg) para estimar la cantidad utilizada por cada familia.

Así mismo, se compraron atados de leña con el objetivo de conocer las especies que se manejan comercialmente, posteriormente se seleccionaron muestras de cada una de ellos, etiquetándose para posteriormente realizar un cuadro donde se colocó la fotografía y el nombre común, también se separaron 2 gramos de cada muestra los cuales fueron enviados al laboratorio de investigación en Ingeniería de Alimentos de la Facultad de Ingeniería Química de la BUAP, donde las Doctoras Claudia Santacruz Vázquez y Verónica Santacruz Vázquez llevaron a cabo el análisis para la obtención de calorías de cada una de las muestras, aplicando el método; cálculo de la capacidad calorífica mediante análisis de calorimetría diferencial de barrido (Figura 2).

	Nombre común	Caligr	Uso por la población
	Palo de haba	6,97822967	Si
	Conguillo	11,1746411	No
	Yuyote	11,1925837	No
	Ahuacoxtle Encino (Quercus sp)	2,89593301	No
	Zohuapaxtle	4,81315789	No
	Copalillo blanco	5,7639713	Si
	Comatle	5,95885167	Si
	Cuatillo	7,96722488	Si
	Palo de guaje	11,3983254	Si
	Palo de teclate	3,91866029	Si
	Copatole	3,15885167	No
	Palo de mexquite	2,89904306	Si
	Palo de romerillo	3,14210526	Si

Figura 2: Nombre común y calorías liberadas de las especies encontradas en los atados de leña provenientes de la Selva Tropical Seca, pertenecientes al municipio de Santo Domingo Huehuetlán, El Grande, Puebla.

También se realizaron salidas a las comunidades de San Nicolás Huajuapán y Santa Martha Yancuitlalpan para la aplicación de cuestionarios y relacionarlos al manejo y uso de la leña como combustible (Figura 3).

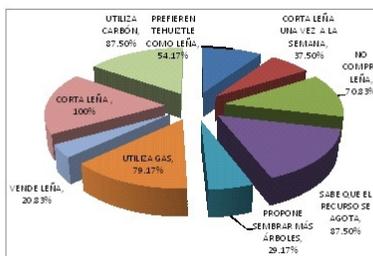


Figura 3: Porcentaje de las encuestas aplicadas a los pobladores de la comunidad de Santa Martha Yancuitlalpan, al municipio de Santo Domingo Huehuetlán El Grande, Puebla.

Para el análisis de los datos cuantitativos se aplicó un análisis de varianza (ANOVA), con una prueba de comparación de medias de Tukey (P 0.05) (Olivares, 1994), así como

el STATISTIC 7.0 para graficar los resultados del análisis.

4. Resultados

En la Figura 4, se puede observar que los sitios muestreados denotaron diferencias significativas en cuanto al número de árboles, como es el caso de los sitios 1 y 2 con respecto a 3, 4 y 5, no habiendo diferencias en los otros sitios muestreados (6-10).

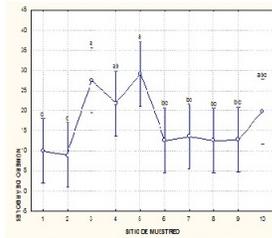


Figura 4: Número de árboles para cada sitio de muestreo. Donde las líneas paralelas muestran el error estándar, las letras indican la diferencia significativa (Tukey<0.05)($n = 50$)(Olivares, 1994 y Statistic 7.0)

En lo referente a ramas vivas los sitios 1 y 2 nuevamente difieren de los sitios 3, 4, 5 y 10, presentando diferencias significativas, probablemente estas diferencias se deban a la distancia en la cual se encuentran los sitios 3-5, excepto el sitio 10 que se encuentran cercano a la población de San Nicolás Huajuapán, donde la gente puede estar respetando a los árboles jóvenes, como se observa en la Figura 5.

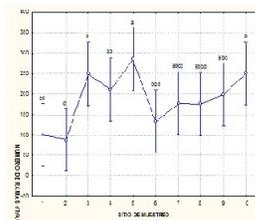


Figura 5: Número de ramas vivas para cada sitio de muestreo. Donde las líneas paralelas muestran el error estándar, las letras indican la diferencia significativa (Tukey<0.05)($n = 50$)(Olivares, 1994 y Statistic 7.0)

Con respecto al número de ramas muertas, los 10 sitios muestreados no mostraron diferencias significativas, como se ve en la Figura 6.

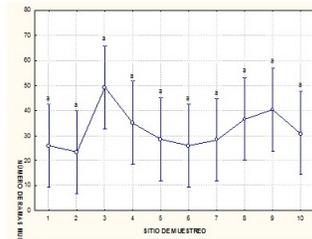


Figura 6: Número de ramas muertas para cada sitio de muestreo. Donde las líneas paralelas muestran el error estándar, las letras indican la diferencia significativa (Tukey<0.05)($n = 50$)(Olivares, 1994 y Statistic 7.0)

Esto quizá se esté presentando debido a que la gente puede ser sancionada si corta el árbol completo, por lo que prefiere solo cortar ramas. En cuanto a tocones vivos el sitio 3 presentó diferencias significativas con respecto a los demás sitios, ya que en dicho sitio se llegaron a registrar hasta cerca de 6 tocones en promedio por individuo, mientras que en la mayoría de los sitios se obtuvo un promedio entre 0.5 y 2.5 tocones vivos, como se observa en la Figura 7.

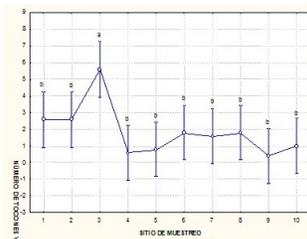


Figura 7: Número de tocones vivos para cada sitio de muestreo. Donde las líneas paralelas muestran el error estándar, las letras indican la diferencia significativa (Tukey<0.05)($n = 50$)(Olivares, 1994 y Statistic 7.0)

Esta tendencia se puede estar presentando ya que la gente probablemente está seleccionando individuos jóvenes que presentan la misma talla que las ramas inferiores de árboles adultos.

En lo referente a los tocones muertos los resultados fueron similares al obtenido en cuanto a los tocones vivos, siendo nuevamente el sitio 3 donde se presentó la mayor cantidad de mortalidad en tocones Figura 8.

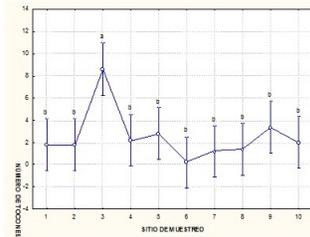


Figura 8: Número de tocones muertos para cada sitio de muestreo. Donde las líneas paralelas muestran el error estándar, las letras indican la diferencia significativa (Tukey<0.05)($n = 50$)(Olivares, 1994 y Statistic 7.0)

A diferencia del número de tocones vivos en este caso hay una mayor mortandad de plantas jóvenes pues el corte la gente lo hace desde la base del tallo. Respecto al diámetro a la altura del pecho de los árboles, los individuos del sitio 2 presentaron el menor diámetro, mientras que los árboles de los sitios 3 y 4 presentaron el mayor diámetro Figura 9.

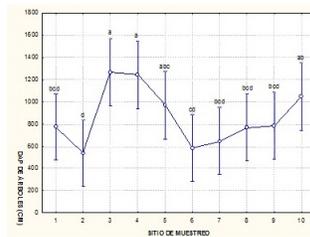


Figura 9: Diámetro a la altura de pecho de árboles para cada sitio de muestreo. Donde las líneas paralelas muestran el error estándar, las letras indican la diferencia significativa (Tukey<0.05)($n = 50$)(Olivares, 1994 y Statistic 7.0)

Estas diferencias se pudiesen deber a que los sitios 3 y 4 se encuentran muy alejado de las comunidades. En referencia al DAP de tocones vivos el sitio 3 presentó el mayor diámetro de ellos, mientras que en los demás sitios el diámetro fue mucho menor respecto a este sitio, lo que podría estar reforzando la idea de la depredación de la biomasa de árboles jóvenes los cuales presentan un diámetro mayor o semejante al de los árboles adultos, dejando el tocón a una altura mayor a un metro lo que le permite que rebroten nuevas ramas, como se observa en la Figura 10.

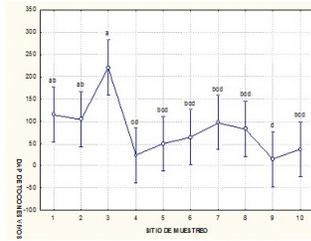


Figura 10: DAP de tocones vivos para cada sitio de muestreo. Donde las líneas paralelas muestran el error estándar, las letras indican la diferencia significativa (Tukey<math>0.05</math>)($n = 50$)(Olivares, 1994 y Statistic 7.0)

En tocones muertos el patrón del DAP fue similar al de tocones vivos siendo el sitio 3 nuevamente el que presentó el mayor diámetro de ellos, mientras que en los demás sitios el diámetro fue mucho menor respecto a este sitio, lo que podría estar reforzando la idea de la depredación de la biomasa en árboles jóvenes los cuales presentan un diámetro menor o similar al de las ramas de los árboles adultos, cortando el tocón desde la base lo que no les permite que rebroten nuevas ramas, como se observa en la Figura 11.

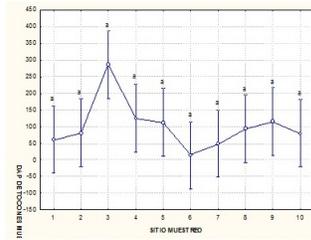


Figura 11: DAP de tocones muertos para cada sitio de muestreo. Donde las líneas paralelas muestran el error estándar, las letras indican la diferencia significativa (Tukey<math>0.05</math>)($n = 50$)(Olivares, 1994 y Statistic 7.0)

En los sitios de muestreo se registraron el peso de los atados de leña oscilando entre 10 y 16 kilogramos a cada atado en peso húmedo, observándose que la leña provenía de diferentes especies lo que denota que no solo el encino es depredado y utilizado como combustible. En cuanto a las especies encontradas y que se utilizan como combustible se registro el nombre común y la cantidad de calorías que cada una de ellas liberó (Cuadro 3 y 3a). Siendo el conguillo, yuyote y palo de guaje las especies con la mayor cantidad de calorías liberadas, mientras que el ahucaxtle (encino) y el palo de mexquite las que menor calorías liberaron. El número de familias dentro de la población de San Nicolás Huajuapán, Santo Domingo Huehuetlán el Grande, Puebla es de 70, encuestándose al 100% de ellas. Los resultados que se obtuvieron de las encuestas aplicadas a la gente de la comunidad mostraron que el 91.42% corta la leña, el 67% tiene conocimiento de que

este recurso puede agotarse, mientras que el 48% y el 45.7% no compra leña y utiliza carbón, respectivamente. Sin embargo, solo el 44% utiliza gas y el 33% solo corta leña una vez a la semana (Figura 12).

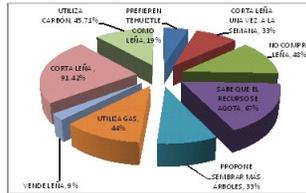


Figura 12: Porcentaje de las encuestas aplicadas a los pobladores de la comunidad de San Nicolás Huajuapán, al municipio de Santo Domingo Huehuetlán El Grande, Puebla ($n = 100$ familias)

La comunidad de Santa Martha Yancuitlalpan, Santo Domingo Huehuetlán el Grande, Puebla es de 40 familias. Las encuestas realizadas a las familias de la comunidad fue de 22 representando el 55% de la comunidad, éstas arrojaron que el 100% de las familias encuestadas corta leña, mientras que el 87.5% utiliza carbón y además sabe que el recurso se puede agotar. El 79.17% utiliza gas y el 70.83% no compra leña.

5. Discusión

Los resultados del muestreo en los sitios seleccionados en el trayecto de la Selva Tropical Seca del Municipio de Santo Domingo Huehuetlán el Grande, Puebla, mostraron que los sitios con un mayor número de árboles fueron los puntos 3,4 y 5, quienes en promedio presentaron de 23-28 árboles, presentando diferencias significativas con los demás puntos muestreados que en promedio presentaron de 9 a 17 árboles, estas diferencias se pueden deber quizá a la distancia en que se encuentran los puntos de muestreo, ya que los puntos 1 y 2 se encuentran cercanos a la población del municipio de San Juan Tzicatlacoyán, mientras que los sitios 6-10 se encuentran cercanos a las comunidades de San Nicolás Huajuapán y Santa Martha Yancuitlalpan, pertenecientes a Santo Domingo Huehuetlán el Grande.

Esto puede repercutir fuertemente en los individuos de los puntos muestreados, pues a mayor distancia menor es el daño a los árboles, así como la energía que se emplea para dicha actividad, pues la gente prefiere los sitios más cercanos a sus hogares para la práctica de colecta, esto se confirma en las encuestas aplicadas a las familias de las comunidades de San Nicolás y Santa Martha, donde el 100% de los encuestados afirmó cortar la leña de la Selva pero en sitios cercanos a sus hogares. Esto último coincide con lo encontrado por Vergara y Amo (2004) y Escobar et al. (2009), quienes mencionan que la colecta de la leña se lleva a cabo en vegetación natural y de cultivos como el cafetal, ya que los pobladores de las comunidades en estudio lo hacen de la Selva Tropical Seca. Pero no coincide con lo mencionado por Vélez et al. (2008), ya que ellos mencionan que los

pobladores de Santiago del Estero en Argentina, solo el 9% colecta la leña y el 91% la compra, pero sí coincide en cuanto al uso de ésta, pues mencionan que el 100% de los pobladores de esta región la usan para combustible en la preparación de alimentos y en la elaboración de artesanías.

En lo referente al número de ramas vivas los sitios que mostraron un menor número de ellas fueron los puntos 3, 4, 5 y 10, con un promedio de 10 ramas, mientras que el mayor número de ramas vivas se registraron en los sitios 1,2,6,7,8 y 9, con un promedio de 12 ramas, esto concuerda con la distancia de los puntos muestreados, a excepción del punto 10 que se encuentra cercano a la comunidad de San Nicolás y Santa Martha, es posible que los sitios menos perturbados al encontrarse alejados de las comunidades presentaron un DAP que demuestra que los individuos con mayor diámetro coinciden con árboles que se encuentran no dañados, ya que al no ser perjudicados en sus estructuras vegetativas presentan menos ramas, en cambio los individuos con mayor daño presentan un mayor número de ramas ya que su DAP es menor, además al podar las estructuras vegetativas se estimula el desarrollo de un mayor número de yemas lo que propicia que se conviertan en nuevas ramas con un menor diámetro, esto la gente lo ha aprovechado para cortar éstas y dejarlas secar para su posterior recolecta y no tener problemas con las autoridades, ya que está prohibido el derribar árboles jóvenes y maduros, con ello se está llevando a cabo el robo hormiga, pues el registro en promedio por sitio de tocones muertos fue de 2, excepto el sitio 3 que presentó un promedio de 8 tocones muertos, tal vez porque los individuos presentaron un tallo con diámetro en su eje principal semejante a las primeras ramas de árboles adultos. En cuanto a tocones muertos el promedio por individuo fue semejante al de los tocones vivos (2 tocones), esto refuerza la idea de que la gente corta ramas con diámetros de 10 centímetros en adelante, dejándolas secar para su posterior recolecta y de esta manera no estar faltando a la ley forestal para no ser multados o encarcelados.

Una vez que la gente regresa a los sitios a colectar las ramas ya secas empieza a elaborar atados de 10 a 16 kilogramos cada uno de ellos, para de esta manera poderlos vender a un precio de \$ 18.00 (dieciocho pesos) la carga (3 atados por carga), a los intermediarios quienes los revenden a un precio de \$ 40.00 (cuarenta pesos) por carga en los mercados locales o comunidades cercanas a la ciudad de Puebla, donde todavía muchas familias manejan el uso de la leña como combustible para satisfacer las necesidades domésticas.

Una mínima población de San Nicolás Huajuapán (9%) y Santa Martha Yancuitlalpan (21%) al contar con vehículo llevan a vender los atados directamente a los mercados o comunidades cercanas, obteniendo de esta manera una entrada de dinero extra que de otra manera no lo tendrían. Esto concuerda con lo reportado por Sarmiento y Vélez (2008) quienes mencionan que los compradores mayoristas consumen anualmente alrededor de 2.275 toneladas, y los compradores minoristas 1.832 t/mes.

El consumo de leña en la región de San Nicolás Huajuapán es de alrededor de 255.5 toneladas de leña/año, y de 91.25 toneladas de leña/año para la comunidad de Santa Martha Yancuitlalpan. De esta manera cada familia consume alrededor de 3.65 toneladas de leña al año para consumo doméstico. Esto concuerda con Cayetano y Meyer (2006), Martínez (1992), INE (2002), quienes mencionan que en México se consumen 36 millones de m³ al año (1m³= 1 tonelada) para la preparación de alimentos, y cada familia con-

sume alrededor de 4 m³ de leña al año. Los atados de leña no solo presentaron encino sino también mostraron 13 especies distintas no se realizó la identificación botánica, debido a que no se colectaron los ejemplares de herbario en cada una de ellas y solo se presentan los nombres comunes, ver cuadro 3), lo que demuestra el manejo que la gente hace de los árboles de la Selva Tropical Seca del municipio de Santo Domingo Huehuetlán el Grande, Puebla.

La colecta de la leña se lleva a cabo principalmente en época de secas cuando la gente se puede mover más rápido sin salir con lesiones por las espinas, ya que en épocas de lluvias la vegetación se cierra, esto no coincide con lo mencionado por Drake et al. (2002), pues él menciona que los pobladores de Temuco, Chile la colectan en los meses de Verano (Diciembre a Marzo) que es la temporada de lluvias, aunque coincide con los meses de secas en esta latitud la temporalidad es distinta ya que la vegetación pertenece a una selva tropical húmeda. La colecta se lleva a cabo cada semana, llegándose a colectar hasta más de 100 kilogramos por familia con la finalidad de que el excedente sea vendido.

Con las colectas de leña que se compraron se realizó una separación de cada especie y se procedió a obtener una muestra la cual fue sometida a un análisis de combustión, con la finalidad de registrar cual o cuales de las muestras presentaron una menor combustión.

Los resultados obtenidos demostraron que las especies de encino, palo de mezquite, palo de romerillo, palo de teclate, copatole y zohuapaxtle liberaron una menor cantidad de calorías por gramo de muestra, esto denota lo que se encontró en las encuestas, donde la gente entrevistada en ambas comunidades mencionó sus preferencias por el palo de mezquite y no por el encino, ya que este último solo lo colectan para su venta y no para su consumo. Pero también las encuestas demostraron que la gente aparte de utilizar la leña, combina esta actividad con otros combustibles como el carbón y el gas LP, para de esta manera obtener mejores beneficios, como alimentos cocidos en menor tiempo y con mayor facilidad. Esto no coincide con lo reportado por Masera (1997), Escobar et al. (2009), quienes mencionan que si la población es menor, mayor es el uso de la leña, pues en este estudio los pobladores de la comunidad de Santa Martha Yancuitlalpan el consumo de gas es elevado debido a que la mayoría de las personas es mayor de 50 años lo que les impide salir a colectar la leña a grandes distancias, una de las razones de que no haya gente joven es la migración a la ciudad de México o a los Estados Unidos de América. Por otro lado, en la comunidad de San Nicolás Huajuapán la población es mayor pero el consumo de leña también es mayor, pues aquí aunque hay migración no es tan grande y dentro de la población hay más jóvenes lo que está permitiendo que colaboren en la colecta de leña.

Como conclusiones tenemos que, en la Selva Tropical Seca perteneciente al municipio de Santo Domingo Huehuetlán el Grande, Puebla, se está llevando a cabo un saqueo de leña el cual denominamos robo hormiga⁷. La perturbación depende de la distancia de colecta de leña por la gente, pues a mayor distancia menor perturbación.

El conocimiento en la selección de las especies arbóreas utilizadas como combustible por los pobladores de las comunidades de San Nicolás Huajuapán y Santa Martha Yancuitlalpan coincide con el número de calorías liberadas por cada una de ellas. Cada familia

de las comunidades en estudio utilizan para uso doméstico alrededor de 3.650 toneladas de leña al año. El tamaño de la comunidad y la migración influyen en la colecta y consumo de leña. Las especies de leña que consumen los habitantes de las comunidades de San Nicolás Huajuapán y Santa Martha Yancuitalpan son palo de haba, copalillo blanco, conixtle, cuatillo, palo de cuete, palo de teclate, palo de mexquite y palo de romerillo. El impacto de destrucción en las 10 zonas es el mismo, pero el estado de conservación es diferente.

6. Bibliografía

Referencias

- [1] Balvanera P., Islas A., Aguirre E., y Quijas S. 2000. Las selvas secas. *Ciencias* 57: 19-24. *Fractal*, revista trimestral. Un viaje alrededor del pensamiento contemporáneo.
- [2] Bellot, M., Benítez H. 2007. *Biodiversidad: Uso, Amenazas y Conservación*, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- [3] Conabio 1998. *La diversidad biológica de México: Estudio de País, 1998*. Conabio, México.
- [4] Cox, G. 1976, *Laboratory Manual of General Ecology, Vegetation Analysis: Plotless Sampling Techniques*, Brown Company, U.S.A.
- [5] Cayetano, H. Meyer L., 2006, la leña, su combustión y sus consecuencias a nivel mundial y en México. *Calidad ambiental*.
- [6] Díaz R. Masera O. 2002. Estudios energéticos, Uso de la leña en México: situación actual, retos y oportunidades, *Balance nacional de energía 2002*.
- [7] Drake F., Von D., Hellwig M. Mellado A. 2002. Cadena de consumo de leña, Descripción de la cadena de consumo de leña de uso residencial. Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad de Concepción.
- [8] Escobar M., Niños J., Ramírez N. Yépez C. 2009. Diagnóstico participativo del uso, demanda y abastecimiento de leña en una comunidad Zoque del Centro de Chiapas, México, *ra ximhai*, vol. 5, núm. 2, mayo-agosto, 2009, pp. 201-223. Universidad Autónoma Indígena de México, México.
- [9] Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales .2001-2002. Capítulo 3, Determinación de los consumos de leña como energético en el ámbito nacional.
- [10] Martínez E. 1992. Especies vegetales como recurso energético de uso domestico, en Zozocolco de Hidalgo, Veracruz. Tesis Profesional, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [11] Masera, O. Navia J., Arias T. y Riegelhaupt E., 1997. Patrones de Consumo de Leña en Tres Micro-regiones de México: Síntesis de Resultados. Proyecto FAO/MEX/TCP/ 4553(A), Pátzcuaro, Michoacán, México.

- [12] Olivares E. 1994. Paquete de diseños experimentales FAUANL. Versión 2.5. Facultad de Agronomía UANL. Marín, N. L.
- [13] Rzedowski, J., 2006. Vegetación de México 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. Capítulo 16. Bosque de Quercus.
- [14] Sarmiento M., Vélez S. 2008. Características del suministro de leña al mercado energético doméstico en la ciudad de Santiago de Estero, Argentina. Boletín del CIDEU 5:125-133.
- [15] Secretaría de Energía (SENER), 2002. Balance Nacional de Energía 2001. SENER, México D. F.
- [16] Vélez, S. Sarmiento M. Pranzoni O. Godoy C. Castro D. 2008. Consumo de biocombustible sólido en la ciudad de Santiago del Estero: Mercado no formal domestico. Quebracho n. 15. Revista de ciencias forestales.

Revisores del libro

- ¹ Lilia Leticia Ramírez Ramírez
² Gabriel Huerta Gómez
³ Ariadna Crisantema Martínez Hernández
⁴ Román Viveros Aguilera
⁵ David Martínez Moreno
⁶ José Agustín García Reynoso

¹*University of Waterloo, Statistics and actuarial Science.*

²*Departamento de Matemáticas y Estadística de la Universidad de Nuevo Mexico.*

³*Universidad de Guanajuato, Departamento de estudios organizacionales, División de ciencias económico administrativas.*

⁴*Universidad de McMaster.*

⁵*Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Escuela de Biología.*

⁶*Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias de la Atmósfera.*

Libro: Matemáticas, Estadística y Medio Ambiente.

Diseño de la portada: Cintli Estefanía Ibarra Reyes

*Se terminó de imprimir en mayo de 2011 en la Facultad de Ciencias Físico
Matemáticas
Tiraje 50
Con domicilio en Av. San Claudio y 18 sur, Col. San Manuel
Ciudad Universitaria, Puebla, Pue., CP 72570. Tel. 2295000, Ext. 7550, Fax
2295636*

Matemáticas, Estadística y Medio Ambiente.