
Estabilidad vertical de la atmósfera en las provincias de Loja y Zamora Chinchipe, Ecuador

Vertical Stability of the atmosphere in the provinces of Loja and Zamora Chinchipe, Ecuador

Orlando Álvarez¹
Jorge Maldonado²
Thuesman Montaña³
Miguel Ángel Caraballo⁴

1. Investigador Prometeo, Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables, Universidad Nacional de Loja. Ecuador.

2. Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables, Universidad Nacional de Loja. Ecuador.

3. Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables, Universidad Nacional de Loja. Ecuador. mcaraballon@yahoo.es

*Autor para correspondencia: orlando21alvarez@gmail.com/
jmaldc@yahoo.es/thuesmon@yahoo.es/ mcaraballon@yahoo.es

RECIBIDO: 30/09/2016

APROBADO: 16/11/2016

RESUMEN

En este trabajo, se presentan los resultados obtenidos a partir de la información meteorológica en las cinco estaciones automáticas administradas por el Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables de la Universidad Nacional de Loja, Ecuador. Se utilizan los datos de radiación solar global y de la velocidad máxima del viento, en lugar de valores de temperatura y velocidad y dirección del viento a diferentes alturas, por lo cual se utiliza, de forma alternativa el modelo de estabilidad estática propuesto por Pasquill con modificaciones debido a la ausencia de datos de nu-

ABSTRACT

In the present work are presented the results obtained using the meteorological information in five automatic stations administered by the Area of the Energy, the Industries and the Renewable Natural Resources of the National University of Loja, Ecuador. The data of global solar radiation and of the maximum wind speed are used, instead of values of temperature and wind speed and direction to different heights, reason why it is used, in an alternative way, the pattern of static stability proposed by Pasquill with some modifications due to don't have observations of cloud amount in nocturnal

bosidad en el horario nocturno. Se presenta la metodología utilizada así como los resultados obtenidos en cada una de las estaciones para los meses desde marzo a diciembre de 2013. Se correlacionaron los valores sumarios de precipitación por meses con la clase de estabilidad Inestable y la dirección promedios mensuales, obteniéndose resultados consistentes desde el punto de vista físico.

Palabras clave: Correlación múltiple, Estabilidad atmosférica, Modelo de Pasquill.

periods. The used methodology is presented as well as the results obtained in each one of the stations for the months from March to December of 2013. The summary values of monthly precipitation were correlated with the class of unstable stability and the wind direction monthly averages, obtaining consistent results from the physical point of view.

Keywords: Atmospheric stability, multiple correlation, Pasquill Model.

INTRODUCCIÓN

La razón más importante para desarrollar una climatología de la contaminación potencial del aire para una ciudad, región, o país es brindar una guía para el manejo eficiente de las emisiones de contaminación a partir tanto de fuentes existentes como de nuevas fuentes. La climatología puede ser utilizada en el desarrollo de ordenanzas de uso de la tierra, la ubicación de vías públicas de vehículos de motor, aeropuertos, parques, y fuentes puntuales grandes (Holzworth, 1974).

Aunque la evaluación completa de ubicación de fuentes grandes y específicas de contaminación requiere a menudo información detallada obtenida en el sitio, la información climatológica para las localidades cercanas puede ser muy útil en la planificación preliminar (Holzworth, 1974).

El ciclo diario del calentamiento y enfriamiento del suelo bajo la acción de la radiación del sol, así como la mezcla de masas de aire de procedencia diferente tiene como consecuencia la modificación del valor de la temperatura del aire en función de la altura. Esta modificación repercute en la habilidad de la atmósfera en iniciar o inhibir los movimientos verticales del aire.

La relación entre el perfil adiabático y el real de la atmósfera determina lo que se conoce como estabilidad vertical. En el desplazamiento adiabático seco de una burbuja de aire que sube o baja de altura se produce un enfriamiento o calentamiento de unos 10°C por kilómetro. Se producen tres tipos de niveles: Estable, Neutro e Inestable.

Los movimientos verticales del aire están condicionados a su flotabilidad. La flotabilidad de una burbuja de aire depende de su densidad relativa respecto a la del entorno que la rodea. Aunque la densidad del aire es casi constante, su densidad relativa varía fuertemente en función de su temperatura de forma que al aire más frío le corresponde mayor densidad relativa y por tanto una tendencia al descenso siendo todo lo contrario lo que sucede con el aire caliente.

Teóricamente, el proceso ideal durante el cual no hay absolutamente ningún intercambio de calor con el medio circundante se llama proceso adiabático. Como el aire contiene normalmente agua, y los cambios de fase de ésta implican intercambios de calor latente, distinguiremos entre dos tipos de procesos adiabáticos:

- Adiabático seco: Durante el cual no hay cambios de fase en el agua.

- **Adiabático húmedo:** Con cambios de fase en el agua.

Durante un proceso adiabático húmedo, los cambios de fase de una burbuja que cambia de presión causan la conversión de calor latente a calor sensible y viceversa. Esto es, cuando ocurre condensación el calor latente desprendido calienta la burbuja y hace subir su temperatura, con lo que el descenso no es tan rápido como en un proceso adiabático seco. Cuando ocurre evaporación, el calor latente enfría la burbuja más rápidamente que en el caso seco.

Generalmente, los datos disponibles requieren a menudo un procesamiento especial e interpretación en lo que se refiere a su impacto en el transporte atmosférico y difusión. Estas interpretaciones son difíciles por dos razones principales.

Primero, las observaciones no son en absoluto hechas en todos los lugares para los cuales se requiere la información ni en las suficientes locaciones para permitir una interpolación fácil. Para una fuente puntual específica de contaminación es deseable tener las observaciones en la vecindad inmediata de la fuente.

La segunda razón por lo que la interpretación de datos meteorológicos con respecto a la contaminación atmosférica es difícil es porque las observaciones, sobre todo del aire que está por encima, no son hechas con la frecuencia suficiente.

En el presente trabajo, se presentan los resultados obtenidos de la estabilidad atmosférica a partir de la información meteorológica en cinco estaciones automáticas administradas por el Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables de la Universidad Nacional de Loja (UNL), Ecuador.

Figura 1. Ubicación de las estaciones automáticas administradas por la UNL

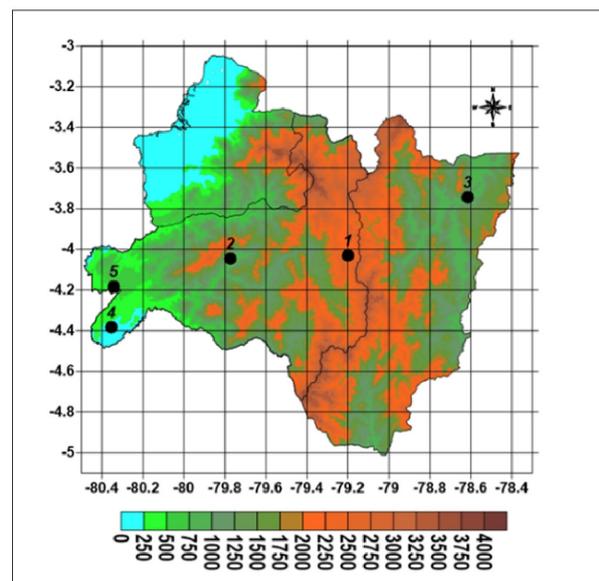
MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron los datos correspondientes a la radiación global y la velocidad del viento en las estaciones meteorológicas automáticas ubicadas en el área de la UNL en Loja, en las zonas de Zapotepamba, Chaquino, Zapotillo y Padmi en la provincia de Zamora Chinchipe con información desde marzo de 2013 hasta marzo de 2014. Los datos correspondientes a cada estación se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de las estaciones.

Long	Lat	Alt	Nº	Denominación
-78.615	-3.74	1117.0	3	Padmi
-79.199	-4.03	2140.3	1	UNL
-79.773	-4.05	1118.5	2	Zapotepamba
-80.342	-4.18	464.4	5	Chaquino
-80.354	-4.38	167.6	4	Zapotillo (Limonos)

Los datos son procesados automáticamente por las propias estaciones automáticas de forma que los datos tomados a cada minuto son promediados, y se calculan los valores máximos y míni-



mos correspondientes y cuyos resultados responden a las horas que van desde las 01:00 hora local hasta las 24:00 (00:00) hora local. La ubicación de las estaciones se muestra en la figura 1.

Se utilizaron los datos de radiación solar y velocidad y dirección del viento, los cuales se registran a 1m los correspondientes a la radiación solar, y a 10m los correspondientes a la velocidad y dirección del viento. Para la velocidad del viento se utilizaron los datos de la velocidad máxima.

La utilización de estos datos, en lugar de valores de temperatura y velocidad y dirección del viento a diferentes alturas, se debe a no contar con los mismos, por lo cual se utiliza, de forma alternativa el modelo de estabilidad estática propuesto por Pasquill y mencionado por Holzworth (1974), y que se muestra en la tabla 2. No se ha considerado el método de Turner utilizando la radiación neta.

Tabla 2. Clases de estabilidad.

Velocidad viento (m/s)	Día (1)			Noche (2)	
	Radiación solar incidente				
a	FUERTE	MODERADA	DEBIL		
10 m de ALTURA	> 50 cal/cm ²	25-50 cal/cm ²	< 25 cal/cm ²	4/8 ≤ N ≤ 7/8	Nubosidad ≤ 3/8
<2	A	A - B	B	F	F
2-3	A -B	B	C	E	F
3-5	B	B - C	C	D	E
5-6	C	C - D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Al no contar con datos medidos ni observados de total de cielo cubierto con nubes durante la noche, se consideró que el cielo estaba parcialmente nublado cuando los valores de radiación global en horarios nocturnos era igual a cero, mientras que si se obtenía algún valor superior a cero se tomó como con nubosidad igual o superior a 4/8 de cielo cubierto, considerando esos valores bajos de radiación como radiación difusa proveniente de las nubes.

Se confeccionó un Libro Excel a partir del cual se obtiene el tipo de estabilidad según este método para cada observación horaria individual, calculándose de igual forma los resúmenes para cada mes y total, así como por hora para cada mes.

Con el objetivo de determinar la existencia de relaciones que nos permitieran comprobar si las premisas que se consideraron para la determinación de las clases de estabilidad responden a condiciones físicas reales, se obtuvieron correlaciones múltiples considerando la precipitación como variable dependiente y los promedios mensuales de las clases y la dirección del viento promedio, teniendo en cuenta que la zona es muy amplia y con topografía variable, así como posibilidades de afectación en la parte oriental por sistemas de presión amazónicos y monzónico sudamericano.

Las direcciones del viento promedio se calcularon para cada día y mes de acuerdo con el método propuesto por Mitsuta (GUTTIKUNDA, 2010) en el cual, la dirección promedio del viento se computa de la siguiente forma:

$$\theta_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i$$

$$\theta_i = 1/N \sum_{i=1}^N D_i$$

Donde:

Para $i = 1, D_i = \theta_i$

Para $i > 1, \delta_i = \theta_i - D_{i-1}$

$D_i = D_{i-1} + \delta_i + 360^\circ$ para $\delta_i < -180^\circ$

$D_i = D_{i-1} + \delta_i$ para $|\delta_i| < 180^\circ$

$D_i = D_{i-1} + \delta_i - 360^\circ$ para $\delta_i > 180^\circ$

D_i está indefinido para $\delta_i = 180^\circ$

θ_i es el ángulo de acimut de la i -ésima muestra

Si el resultado es menor que 0° o mayor que 360° se deben añadir o sustraer 360° hasta que el resultado esté entre 0° y 360°. El valor promedio de dirección del viento obtenido con el algoritmo de Mitsuta (GUTTIKUNDA, 2010) cumple la propiedad estadística de que las desviaciones del valor promedio deben sumar cero, o sea:

$$\sum_{i=1}^N (\theta_i - \bar{\theta}) = 0$$

RESULTADOS

En la figura 2 se muestran los gráficos de las clases de estabilidad promedios mensuales para cada una de las estaciones incluidas en el presente trabajo para el período marzo – diciembre del 2013.

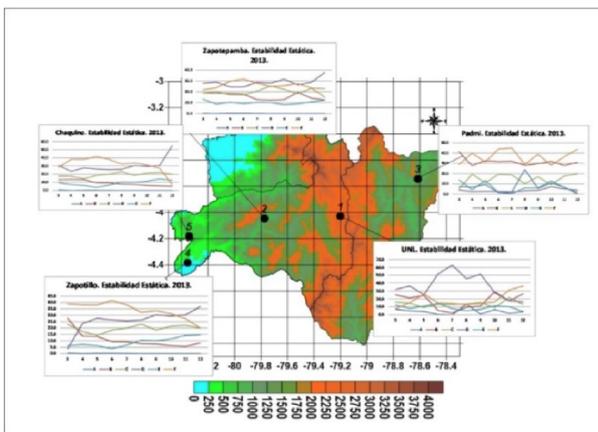


Figura. 2. Clases de estabilidad para las estaciones automáticas administradas por la UNL.

Por su parte en las Tablas 2 a – e, se dan los valores promedio por meses para el mismo período (período marzo – diciembre del 2013); consolidando los resultados en tres clases de estabilidad: Inestable, Neutra y Estable.

Tabla 2 a. Por cientos por clase de estabilidad en la estación Chaquino.

Estación	Mes	% Casos	% Casos	% Casos
		Inestables	Neutros	Estables
CHAQUINO	Marzo	31.5	30.4	38.0
	Abril	31.0	23.6	45.4
	Mayo	28.0	27.7	44.4
	Junio	28.1	26.4	45.6
	Julio	29.4	25.7	44.9
	Agosto	31.1	26.1	42.8
	Septiembre	25.8	30.4	43.8
	Octubre	27.8	29.4	42.7
	Noviembre	27.9	30.4	41.7
	Diciembre	25.3	54.7	20.0

Tabla 2 b. Por cientos por clase de estabilidad en la estación Universidad.

Estación	Mes	% Casos	% Casos	% Casos
		Inestables	Neutros	Estables
UNL	Marzo	48.1	32.0	19.9
	Abril	40.9	36.4	22.7
	Mayo	37.5	25.4	37.1
	Junio	19.1	51.7	29.2
	Julio	15.2	62.9	21.9
	Agosto	36.5	45.5	18.0
	Septiembre	27.3	51.3	21.4
	Octubre	44.8	27.8	27.4
	Noviembre	41.25	17.50	41.25
	Diciembre	43.09	16.26	40.65

Tabla 2 c. Por cientos por clase de estabilidad en la estación El Padmi.

Estación	Mes	% Casos Inestables	% Casos Neutros	% Casos Estables
ZAPOTEPAMBA	Marzo	37.4	27.7	34.9
	Abril	38.9	28.8	32.3
	Mayo	35.7	24.3	39.9
	Junio	35.1	24.2	40.7
	Julio	33.5	28.6	37.9
	Agosto	37.4	27.8	34.8
	Septiembre	34.9	31.6	33.5
	Octubre	37.6	26.2	36.2
	Noviembre	37.1	28.7	34.2
	Diciembre	35.4	37.6	27.0

Tabla 2 d. Por cientos por clase de estabilidad en la estación Zapotillo.

Estación	Mes	% Casos Inestables	% Casos Neutros	% Casos Estables
PADMI	Marzo	53.6	3.9	42.5
	Abril	53.4	2.4	44.1
	Mayo	53.0	2.7	44.3
	Junio	52.1	2.5	45.4
	Julio	52.5	2.0	45.5
	Agosto	61.8	3.1	35.0
	Septiembre	51.8	3.5	44.7
	Octubre	51.8	7.1	41.0
	Noviembre	52.0	5.1	42.9
	Diciembre	50.7	3.8	45.5

Tabla 2 e. Por cientos por clase de estabilidad en la estación Zapotepamba.

Estación	Mes	% Casos Inestables	% Casos Neutros	% Casos Estables
ZAPOTILLO	Marzo	51.2	3.8	45.0
	Abril	31.0	23.6	45.4
	Mayo	28.0	27.7	44.4
	Junio	28.1	26.4	45.6
	Julio	29.4	25.7	44.9
	Agosto	30.9	26.3	42.9
	Septiembre	25.8	30.4	43.8
	Octubre	27.8	29.4	42.7
	Noviembre	27.9	30.4	41.7
	Diciembre	28.4	36.8	34.7

El resultado de la regresión múltiple considerando la precipitación sumaria mensual (RR) con respecto al por ciento de ocurrencia de casos inestables elevados al cuadrado (CI2) y a la dirección el viento promedio (DDR) para cada mes para las cinco estaciones presentó los siguientes resultados (Tabla 3).

Tabla 3. Modelo de la correlación múltiple.

Parámetros	Estimado	Error Estandar	T Estadístico	P-Valor
CONSTANTE	-41.4499	18.0319	-2.29869	0.0260
CI ²	0.0591412	0.00820778	7.2055	0.0000
DDR	0.0728326	0.0542472	1.34261	0.1858

De aquí que el modelo fijado por la correlación múltiple es el siguiente:

$$RR = -41.4499 + 0.0591412 \cdot CI2 + 0.0728326 \cdot DDR$$

En la tabla 3 del Análisis de Varianza, como el P valor es menor que 0,1 indica que la relación entre las variables es significativa a un nivel de confianza del 90 %.

Otros resultados obtenidos fueron:

$$R = 0.7327114$$

$$R^2 = 53.6866 \text{ por ciento}$$

$$R^2 \text{ (ajustado para g.l.)} = 51.7159 \text{ por ciento}$$

$$\text{Error estándar de estimación} = 48.2174$$

$$\text{Error absoluto medio} = 38.6878$$

$$\text{Estadígrafo de Durbin-Watson} = 2.00667$$

$$(P=0.4393)$$

$$\text{Autocorrelación residual de orden } 1 = -0.0218698$$

En cuanto a los resultados, el modelo explica el 53,6866% de la variabilidad de la variable precipitación (RR). El error estándar de la estimación muestra que la desviación de los residuales es de 48,2174.

El error absoluto medio representa el valor promedio de los residuales. Al mismo tiempo el P-valor del estadígrafo de Durbin - Watson, al ser superior a 0,1 está indicando que no existe autocorrelación serial a un nivel de confianza del 90%.

El coeficiente de correlación lineal múltiple superior a 0,73 indica el buen grado de relación que existe entre las variables.

■ DISCUSIÓN

Los resultados que se analizaron nos permitieron corroborar que el método empleado para el cálculo de las clases de estabilidad es adecuado, considerando que por el momento no es posible la ubicación de torres de gradiente con mediciones a diferentes alturas sobre el suelo por razones varias, tales como necesidad de solicitud de autorización a entes privados o públicos para su instalación, presupuestos, etc.

De igual forma se obtuvieron la cantidad de casos para los períodos diurno, nocturno y total para los meses desde marzo a diciembre

2013 y desde enero a marzo 2014, de los cuales se muestra el ejemplo de la estación Padmi para el año 2013 en las tablas 4 a-c.

Tabla 4 a. Clases de estabilidad para la Estación Padmi para ambos períodos.

Ext. Inestable	A	4	0.54
Mod. Inestable	B	204	27.68
Lig. Inestable	C	169	22.93
Neutro	D	28	3.80
Lig. Estable	E	46	6.24
Mod. Estable	F	286	38.81
Total		737	100.0

Tabla 4 b. Clases de estabilidad para la Estación Padmi para el período diurno.

Ext. Inestable	A	4	1.00
Mod. Inestable	B	204	50.75
Lig. Inestable	C	169	42.04
Neutro	D	25	6.22
Lig. Estable	E	0	0.00
Mod. Estable	F	0	0.00
Total		402	100.0

Tabla 4 c. Clases de estabilidad para la Estación Padmi para el período nocturno.

Ext. Inestable	A	0	0.00
Mod. Inestable	B	0	0.00
Lig. Inestable	C	0	0.00
Neutro	D	3	0.90
Lig. Estable	E	46	13.73
Mod. Estable	F	286	85.37
Total		335	100.0

Lo anterior nos permite determinar las clases de estabilidad que se presentaron en esos períodos, ratificando, como en el ejemplo de la estación Padmi, ubicada en la provincia de Zamora Chinchipe, que la clase de estabilidad “Extremadamente Inestable” es la que presenta menor probabilidad de ocurrencia, siendo la clase “Moderadamente Inestable” en el horario diurno la que tiene mayores probabilidades y la clase “Moderadamente Estable” la de mayor predominio en el horario nocturno, lo cual es compatible con las características climáticas de las zonas donde están enclavadas las estaciones (Tabla 5).

Tabla 5. Resumen correspondiente a las cinco esta

Ext. Inestable	A	0	0.00
Mod. Inestable	B	0	0.00
Lig. Inestable	C	0	0.00
Neutro	D	3	0.90
Lig. Estable	E	46	13.73
Mod. Estable	F	286	85.37
Total		335	100.0

CONCLUSIONES

Se obtuvo un método alternativo para estimar las clases de estabilidad atmosférica adaptando el método de Pasquill.

Se comprobaron los resultados utilizando para ello la correlación entre las clases de estabilidad y la precipitación.

Los valores del coeficiente de correlación lineal múltiple entre la precipitación mensual como variable dependiente y el cuadrado del % de ocurrencia mensual de la clase de estabilidad “Inestable” al cuadrado y las direcciones medias mensuales del viento, para todas las estaciones

es superior a 0,73, mientras el coeficiente de determinación explica más del 53% de la variación de la precipitación.

La clase de estabilidad “Extremadamente Inestable” presenta una probabilidad de ocurrencia muy baja como corresponde al clima andino, al tiempo que la clase de estabilidad “Moderadamente Estable” es la que predomina durante el período nocturno, y la clase “Moderadamente Inestable” durante el período diurno.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo científico ha sido cofinanciado por el Proyecto Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia y Tecnología y la Universidad Nacional de Loja (Ecuador).

LITERATURA CITADA

Guttikunda, Sarath (2010): Role of Meteorology on Urban Air Pollution Dispersion: A 20yr Analysis for Delhi, India. SIM-air Working Paper Series: 31-2010. Delhi, India.

Holzworth, G. C. (1974). Climatological Aspects of the Composition and Pollution of the Atmosphere. TECHNICAL NOTE No. 139. WMO - No. 393. ISBN 92-63-10393-3. Secrétariat of the World Meteorological Organization - Geneva - Switzerland.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2000): Meteorological monitoring guidance for regulatory modeling applications. Office of Air and Radiation Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, NC 27711. EPA/454R-99-005.