



## CARACTERIZACIÓN DE LA DIFUSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS BAJO CONDICIONES FÍSICAS Y METEOROLÓGICAS DE LA CIUDAD DE RIOBAMBA, USANDO MODELOS MATEMÁTICOS

Nelly Patricia Perugachi Cahueñas<sup>1</sup>  
Gloria Elizabeth Miño Cascante<sup>2</sup>  
Arquímides Xavier Haro Velasteguí<sup>3</sup>

Para citar este artículo puede utilizar el siguiente formato:

Nelly Patricia Perugachi Cahueñas, Gloria Elizabeth Miño Cascante y Arquímides Xavier Haro Velasteguí (2018): "Caracterización de la difusión de contaminantes atmosféricos bajo condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad de Riobamba, usando modelos matemáticos.", Revista Caribeña de Ciencias Sociales (junio 2018). En línea: [//www.eumed.net/rev/caribe/2018/06/contaminantes-atmosfericos-ecuador.html](http://www.eumed.net/rev/caribe/2018/06/contaminantes-atmosfericos-ecuador.html)

### Resumen

El trabajo desarrolló un estudio de difusión de contaminantes aéreos desde fuentes fijas, considerando las condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad de Riobamba, para lo cual se aplica el modelo ISCLT (Industrial Source Complex in Large Time) avalado por la agencia del medio ambiente de los Estados Unidos EPA (Enviro Mental American Pollution), que se adapta a las condiciones de altura (2750 msnm) y posición geográfica (latitud 1° 30') de la ciudad de Riobamba, aplicando el modelo de Van Ulden y Hostlang, que se ajusta a las condiciones físicas y meteorológicas de la atmósfera de la zona, usando datos de la estación meteorológica de la ESPOCH (Escuela Superior Politécnica de Chimborazo), determinando la dispersión relativa de los contaminantes, en función de la dirección del viento, velocidad del viento y grado de estabilidad, clasificado según las clases de Pasquill, simulando la difusión de contaminantes atmosféricos en la zona.

**Palabras claves.** Modelos matemáticos, contaminantes atmosféricos, estabilidad atmosférica, parámetros meteorológicos.

### Abstract

The work developed a study of the diffusion of air pollutants from fixed sources, considering the physical and meteorological conditions of the Riobamba city, for which the ISCLT model (Industrial Source Complex in Large Time) endorsed by the environmental agency of the United States EPA (Enviro Mental American Pollution), which adjusts to the conditions of height (2750 meters above sea level) and geographical position (latitude 1° 30'), applying the Van Ulden and Hostlang model, which adjusts to the physical and meteorological conditions of the atmosphere of the area, using data from the ESPOCH meteorological station (Chimborazo Polytechnic High School), determining the relative dispersion of the pollutants, in function of wind direction, wind speed and degree of stability, classified according to Pasquill classes, simulating the diffusion of atmospheric pollutants in the area.

1 Docente de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ingeniera Ambiental, MSc en Matemática [ncperugachii@yahoo.com](mailto:ncperugachii@yahoo.com).

2 Docente de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ingeniera Ambiental, PhD., [gloriamino@yahoo.es](mailto:gloriamino@yahoo.es).

2 Docente Facultad de Ciencias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, PhD, [arquimidesharo@yahoo.es](mailto:arquimidesharo@yahoo.es).

**Key Words.** Mathematic models, atmospheric pollutions, atmospheric stability, meteorological parameters.

## 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es uno de los problemas más serios para los seres vivos, que habitan en el planeta, perjudica su desarrollo y la calidad de vida, lo que se ha incrementado con el desarrollo tecnológico, debido al aumento del uso de fuentes de energía contaminantes (Figuruelo, J.E. Davila, 2004).

El Ecuador y particularmente la ciudad de Riobamba, no está libre de este tipo de contaminación, debido al crecimiento poblacional, y por ende el aumento de las actividades industriales y comerciales, también, la existencia de algunas industrias, así como la erupción del volcán Tungurahua, lo que afecta la calidad del aire en la zona de estudio (A. Haro et al., 2014).

Otro de los factores importantes que se debe considerar en el estudio de la contaminación del aire son las condiciones de altura respecto al nivel del mar, la posición geográfica y la topografía irregular del suelo, que afectan la difusión de los contaminantes (Alarcon et al. 2000, Amanda H., et al, 2006).

En la ciudad de Riobamba se han realizado algunos estudios sobre contaminantes atmosféricos, principalmente usando sensores pasivos, pero no cuenta con una red de monitoreo automático como las grandes ciudades (Quito, Cuenca), debido a los altos costos que conllevan estos sistemas (Figuruelo et al. 2004, Palacios E. et al, 2014).

Los modelos matemáticos son una herramienta para determinar la difusión de contaminantes atmosféricos, sin que implique grandes inversiones económicas, los que se pueden ser útil para aplicarlo en municipios pequeños que no cuentan con grades presupuestos y no pueden invertir en una red automática, para usarlos en el control y prevención de contaminación, así como, planificar el desarrollo urbano, minimizando el impacto ambiental causado por las fuentes contaminantes (Kiely, 2000, Aeromod, 2003).

Los modelos de difusión de contaminantes se han usando desde hace algunos años atrás en los países desarrollados con éxito, sin embargo, los mismos en general no se adaptan a las condiciones del altiplano ecuatoriano, por sus condiciones físicas y meteorológicas particulares (A. Haro, 2015, Trozzi C et al 3003).

En el presente trabajo se desarrolla una propuesta para ajustar los modelos micrometeorológicos a las condiciones de la zona, considerando sus variaciones de presión y densidad del aire debido a su altura (Van Ulden, 1985), implementarlo a un modelo de difusión y determinar la difusión relativa de contaminantes en la ciudad de Riobamba.

## 2. Metodología

### 2.1. Estabilidad atmosférica

Para determinar la estabilidad atmosférica se considera un balance total de energía, correspondiente a un elemento de volumen con base a la superficie, que contiene la cobertura vegetal y la atmósfera circundante. Una parte de la energía que recibe se empleará en producir evapotranspiración y es la que interesa evaluar, traduciendo el resultado a unidades de agua evaporada.

La **ecuación del balance de energía**, de forma simplificada sería, la dada en la ecuación 1:

$$R_N = Q_H + Q_E + Q_G \quad 1$$

- $R_N$  flujo de radiación neta
- $Q_G$  flujo de calor almacenado en el suelo
- $Q_H$  flujo de calor sensible.
- $Q_E$  flujo de calor latente

Los términos  $R_N$  y  $Q_G$  se pueden medir con bastante aproximación directamente con el pirómetro usando la relación de (Kasten y Czeplak, 1980), para determinar la nubosidad, con  $Q_G$  en función de  $R_N$ , (Bruin and Holtslag, 1982), con pequeños termopares enterrados en el suelo. En ocasiones también se desprecia el flujo de calor almacenado en el suelo ( $C_a$ ) lo que puede dar lugar a que se incurran en errores importantes. Por ejemplo, a primeras horas de la mañana  $Q_G$  puede ser negativo y del orden del 25% de  $R_N$  por lo que despreciar este término producirá tanto más error, cuanto más corto sea el intervalo de medida, y más próximo a las horas matinales. Otras veces  $C_a$  se estima empíricamente como función fija de  $R_N$  (Aeromod, 2004).

El flujo de calor sensible ( $Q_H$ ) ecuación 3, y el flujo de calor latente ( $Q_L$ ) no pueden medirse por separado. El flujo de calor sensible es el calor que calienta el aire en el volumen elemental considerado y el flujo de calor latente, es la energía que se emplea exclusivamente para producir evaporación. El cociente entre ambos flujos ( $Q_H/Q_L$ ) se conoce con el nombre de relación de Bowen (Cain et al, 2004).

Partiendo de un balance de energía superficial (Van Ulden and Holtslag, 1985):

$$Q_G = aR_N \quad 2$$

$$Q_H = \left[ \frac{(1-\alpha)+S}{1+S} \right] R_N (1-\alpha) - \beta \quad 3$$

$a = 0,1$  para áreas rurales y  $a = 0,3$  para áreas urbanas, son los datos que se tomó para este estudio (Doll D, Ching J. K. S. y Kaneshire J, 1985),  $\beta$  es una constante igual a  $20 \text{ W m}^{-2}$ . y  $\alpha$  como  $0.75$  para ambientes urbanos, el parámetro  $S$  es definido por:

$$S = \exp[0,055(T - 279)] \quad 4$$

La radiación neta es observada, también puede ser parametrizada, según la ecuación 5, basada en el albedo  $A$ , ángulo de elevación solar  $\theta$ , fracción de nubosidad  $N$ , flujo de radiación incidente  $Q$ , y la temperatura del aire  $T$ .

$$R_N = \frac{((1-A)Q + c_1 T^6 - \sigma T^4 + c_2 N)}{1 + c_3} \quad 5$$

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  es la constante de Stefan-Boltzmann

$c_1 = 5,31 \times 10^{-13} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-6}$  y  $c_2 = 60 \text{ W m}^{-2}$

$$A = 0.185 \left( 1 - \exp\left(-\frac{h}{100}\right) \right)$$

Con  $h$  humedad, el parámetro  $c_3$  es dado por la fórmula:

$$c_3 = \frac{0.38(1-\alpha)S+1}{S+1} \quad 6$$

$$Q = (a_1 \text{sen}\phi + a_2)(1 - b_1 N^{b_2}) \quad 7$$

$a_1 = 990 \text{ W m}^{-2}$

$a_2 = -30 \text{ W m}^{-2}$

$b_1 = 0,75$

$b_2 = 3,4$

Con  $\phi$  elevación solar, que se puede calcular en función de la latitud, longitud de la zona de estudio y el día juliano, donde se determina la nubosidad aproximada (Aeromod, 2004, Bohren, C.F., Clothiaux, 2006).

$$N = \left( 1 - \frac{b_1 * Q}{(a_1 \text{sen} \phi + a_2)} \right)^{1/b_2} \quad 8$$

Aplicando la teoría de similaridad de Monin-Obukhov se puede determinar la velocidad de fricción  $u_*$  en función de la velocidad del viento  $U_z$  y la altura  $z$  (Cian et al, 2014).

$$u_* = k U_z \left[ \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) - \psi_M \left( \frac{z}{L} \right) + \psi_M \left( \frac{z_0}{L} \right) \right]^{-1} \quad 9$$

Con  $k$  constante de Von Karman ( $k = 0.4$ ),  $z_0$  largo de rugosidad superficial del lugar ( $z_0 = 0.5 \text{ m}$ ) que se determina mediante tablas (Marrero, 2011).

$$L = - \frac{\rho C_p T u_*^3}{k g Q_H} \quad 10$$

$L$  longitud de Obukhov, con  $T$  temperatura del aire,  $g$  constante de aceleración de gravedad,  $\rho$  densidad del aire,  $C_p$  calor específico del aire a presión constante y  $Q_H$  flujo de calor sensible (Garratt, 2004).

La función de estabilidad  $\psi_M$  se determina por  $L < 0$  (Inestable), como:

$$\psi_M = 2 \ln \left( \frac{1+x}{2} \right) + \ln \left( \frac{1+x^2}{2} \right) - 2 \tan^{-1}(x) + \frac{\pi}{2} \quad 11$$

De las ecuaciones 9 y 10 se puede hallar la velocidad de fricción y la longitud de Obukhov por interacción tomándose inicialmente  $\psi_M = 0$  y  $L = \infty$  (Wyngaard, 1998) hasta alcanzar una variación aproximada del 1% de dos valores sucesivos de  $L$  para valores mayores de cero y menores de cero y con el mismo criterio, para el caso estable,  $L > 0$  se aplica la relación (Panofsky and Dutton, 1984).

$$\psi_M = -5 \left( \frac{z}{L} \right) \quad 12$$

Con

$$x = \left( 1 - 16 \frac{z}{L} \right)^{1/4} \quad 13$$

La estabilidad atmosférica se puede asociar al gradiente de temperatura, comparando con el gradiente de temperatura adiabática. Bajo condiciones adiabáticas, un volumen templado de aire ascendente se comporta como un globo. Se expandirá hasta que su densidad se iguale con la del aire circundante (Sang et al, 2009). El aire seco se expande a una velocidad de 9.8 Grados Centígrados por cada 100 metros de altura. Una atmósfera Neutralmente Estable tiene lugar cuando el gradiente de temperatura ambiental (GTA), es igual al gradiente de temperatura seca Adiabática (GTSA) o lo que es lo mismo la velocidad de enfriamiento es igual aproximadamente 1 grado centígrado cada 100m.

Una Atmósfera Inestable se da cuando el gradiente de temperatura ambiental excede del gradiente de temperatura seca adiabática, o lo que es lo mismo la velocidad de enfriamiento en la ascensión es mayor a 1 grado centígrado por cada 100 m. Una Atmósfera Estable tiene lugar cuando el gradiente de temperatura ambiente es menor que el gradiente de temperatura seca adiabática, o lo que es lo mismo la velocidad de enfriamiento, es menor a 1 grado centígrado sobre 100 m (Teixeira, J. et al, 2008).

## 2.2. Corrección de parámetros físicos

El comportamiento del aire no es constante con la temperatura, presión o humedad, para el caso del altiplano ecuatoriano, estas variaciones pueden ser representativas, por lo que se procede a realizar una corrección de los mismos basado en la teoría termodinámica (A. Haro et al., 2014).

### Calor específico del aire $C_e$ (J/kg.K)

$$C_e = 999,2 + 0,1434T + 1,101 \times 10^{-8} T^2 - 6,7581 \times 10^{-8} T^3 \quad 14$$

T temperatura ambiente.

### Densidad $\rho$ (kg / m<sup>3</sup>)

$$\rho = \frac{0,34848p - 0,009h_r e^{0,0617T}}{273,15 + T} \quad 15$$

$h_r$  humedad relativa en el aire en %

p presión atmosférica local (mbar)

**Tabla 1.** Correspondencia entre la longitud de Monin – Obukhov y las clases de estabilidad de Pasquill.

Clases de Pasquill	1/L
A Muy Inestable	$1/L < -0.056$
B Inestable	$-0.056 \leq 1/L < -0.016$
C Moderadamente Inestable	$-0.016 \leq 1/L < -0.004$
D Neutra	$-0.004 \leq 1/L < 0.002$
E Moderadamente Estable	$0.002 \leq 1/L < 0.006$
F Estable	$0.006 \leq 1/L < 0.022$
G Extremadamente Estable	$1/L \geq 0.022$

En la Tabla 1 se presenta los limites asociados a las clases de estabilidad de Pasquill tomando como referencia el largo de Monin – Obukhov (L) calculado para  $z_0 = 0.5 \text{ m}$  y  $z = 10 \text{ m}$ ,

(Martinez, 2004).

## 2.3. Modelo ISCTL

Para calcular las concentraciones de contaminantes se ha utilizado el modelo de difusión Gaussiano ISCTL, modelo desarrollado por la Agencia de Protección de Medio Ambiente (EPA) estadounidense, que es uno de los más usados y se emplea para cálculos de concentraciones promedios a nivel del suelo en periodos de tiempos mensuales, trimestrales o anuales, a partir de datos de fuente y meteorológicos, escogiendo las opciones apropiadas según las condiciones de la zona y posteriormente calcular las concentraciones. Este tipo de modelo se usa para una o varias fuentes, área y volumen (Aeromod, 2004).



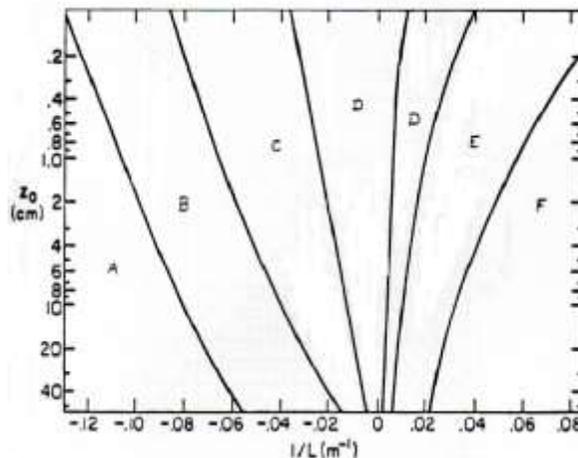
**Figura 1.** Formulario principal para calcular la distribución de contaminantes atmosféricos (*Software Modelo ISCLT*).

El modelo ISCLT es un modelo de tipo Gaussiano, que determina la difusión de los contaminantes atmosférico de una fuente desde el nivel del suelo tomando en base a datos meteorológicos y características físicas de la zona de estudio, en esta parte se describirá el modelo. El formulario contiene todas las funciones del sistema, desde este podremos acceder a todos los módulos del programa como son el ingreso de datos fuente, opciones del modelo y cálculo de la distribución de concentración de contaminantes atmosféricos (Boublé et al., 1990) (Figura 1).

#### 2.4. Ingreso de datos de estabilidad

El criterio para definir las estabildades atmosféricas se basa primordialmente en la rugosidad y la longitud de Obukov, para lo cual se aplico el modelo de Van Undel y Hostlang (1985), para determinar las categorías de estabilidad definidas según Pasquill (1962).

- A: Extremadamente Inestable
- B: Moderadamente Inestable
- C: Levemente Inestable
- D: Neutra
- E: Levemente Estable
- F: Moderadamente Estable



**Figura 2.** Determinación de la estabilidad según en función de la rugosidad y la Longitud de Obuko.

#### 2.5. Ingreso de Datos de la Fuente

La Tabla 2 resume el ingreso de datos de la fuente comúnmente requeridos por la mayoría de modelos de difusión de contaminantes atmosféricos (estándar EPA). Como se muestra en la tabla, aquí tenemos tres tipos de fuentes: chimenea, volumen y área.

El volumen de la fuente es también utilizado para simular fuentes lineales. Si la Universal Transverse Mercator (UTM) utiliza un sistema de coordenadas para definir receptores locales, las coordenadas de UTM solo pueden ser utilizadas para definir fuentes locales si se emplea la formación o el orden de un receptor Cartesiano.

Con una formación de receptor polar, el origen es en ( $x=0$ ,  $y=0$ ), las coordenadas  $x$  e  $y$  de las otras fuentes con respecto a este origen son obtenidos desde una fábrica.

El eje  $x$  es positivo para el este y el eje  $y$  es positivo para el norte. Notemos que el origen del receptor polar es siempre  $x=0$ ,  $y=0$ .

La razón de emisión de la polución es también requerida por cada fuente. Si la polución varía por un mecanismo que puede ser descrito por el decaimiento exponencial dependiendo del tiempo, podemos extraer un coeficiente de decaimiento  $\psi$ . Notamos que, si  $SO_2$  es modelado en el modelo urbano, un decaimiento de vida media de 4 horas se asigna automáticamente. Los parámetros  $\Phi_n$ ,  $V_{sn}$ ,  $\gamma_n$  son solo datos de ingreso si la concentración o cálculos de deposición son hechas para fuentes particulares con apreciable velocidad fija gravitacional (diámetro más grande que 20 micrómetros). Emisiones de partículas de cada fuente pueden ser divididas para un máximo de 20 categorías de velocidad fija gravitacional.

**Tabla 2:** Datos de ingreso requeridos por un modelo de difusión.

Parámetro	Definición
<b>Chimenea</b>	
<b>Q</b>	Emisión de la polución para cálculos de concentración (masa por unidad de tiempo)
<b>Q<sub>τ</sub></b>	Emisión de la polución total durante el periodo $\tau$ para el cual la deposición es calculado (masa)
<b>ψ</b>	Coeficiente de decaimiento de la polución
<b>X, Y</b>	Coordenadas X, Y de la chimenea (metros)
<b>z<sub>s</sub></b>	Elevación de las base de la chimenea (metros sobre el nivel del mar)
<b>H</b>	Altura de la chimenea (metros)
<b>v<sub>s</sub></b>	Velocidad de salida de la chimenea (metros por segundo)
<b>D</b>	Diámetro interior de la chimenea (metros)
<b>T<sub>s</sub></b>	Temperatura de salida de la chimenea
<b>Φ<sub>n</sub></b>	Fracción de masa de las partículas en la n-ésima categoría de la velocidad de asentamiento.
<b>V<sub>sn</sub></b>	Velocidad de asentamiento gravitacional para partículas en la n-ésima categoría de la velocidad de asentamiento (metros por segundo)
<b>Y<sub>n</sub></b>	Coeficiente de reflexión superficial para partículas en la n-ésima categoría.
<b>h<sub>b</sub>, BH<sub>j</sub></b>	Altura adyacente de construcción de la chimenea (metros) direcciones específicas de las alturas de construcción (metros) para la j-ésima categoría de la dirección del viento.
<b>w, BH<sub>j</sub></b>	Ancho adyacente de construcción de la chimenea (metros) dirección específica de los anchos de construcción (metros) para la j-ésimo categoría de la dirección del viento.
<b>Lo</b>	Longitud adyacente de la construcción de la chimenea (metros).

Fuente: Datos, EPA

Las razones de emisión utilizadas para el modelo a grandes intervalos de tiempo, pueden ser promedios anuales o variados por temporadas, por la velocidad del viento y las categorías por temporadas, por la velocidad del viento y las categorías de estabilidad.

Los modelos de dispersión permiten seleccionar un sistema de receptores (para monitoreo), sea coordenadas cartesianas ( $x, y$ ) o polar ( $r, \theta$ ). Si la fuente es compleja y está comprendida de

múltiples fuentes que no son localizadas en el mismo punto, es común usar un sistema de coordenadas cartesianas a usar que un sistema de coordenadas polares.

En el sistema de coordenadas polares, los puntos receptores son usualmente en intervalos de 10 grados en una pista de concentraciones, así, tendremos 36 receptores. Las distancias radiales desde el origen para la pista del receptor son seleccionadas y generalmente son iguales a las distancias para separar las máximas concentraciones, considerando siempre las estabilidades más frecuentes y las velocidades del viento.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Descripción general de la zona

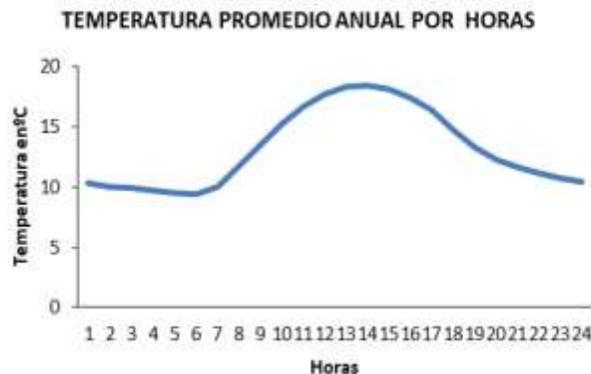
La ciudad de Riobamba es la capital de la provincia de Chimborazo, se encuentra ubicada en el centro geográfico del Ecuador, en la cordillera de los Andes, a  $1^{\circ}40'28''S$   $78^{\circ}38'54''O$  y a una altura de 2750 m s. n. m., en el centro de la hoya de Chambo, con una población de 350 000 habitantes, en su zona metropolitana, una de las más pobladas del país. La superficie delimitada por el perímetro urbano de la ciudad es de aproximadamente 45 km<sup>2</sup>, está en una zona de topografía plana – meseta, se los conoce con el nombre de basalto conformada por productos piroclásticos, con una temperatura promedio anual de 12 °C, con pocas variaciones a lo largo del año por su posición geográfica (Geografía del Ecuador, 2015).

#### 3.2. Datos Meteorológicos

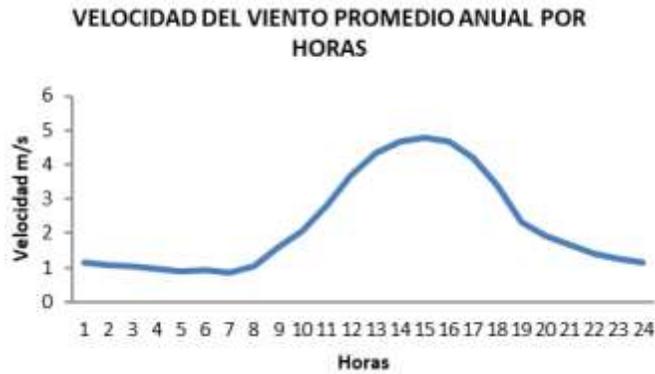


**Figura 3.** Datos de dirección del viento (Datos, Estación Meteorológica del Grupo de Energías Alternativas de la ESPOCH).

La dirección predominante del viento esta hacia entre el sur y oeste, de acuerdo a los resultados de la Figura 3.



**Figura 4.** Temperatura promedio anual por días (Datos, Estación Meteorológica del Grupo de Energías Alternativas de la ESPOCH).



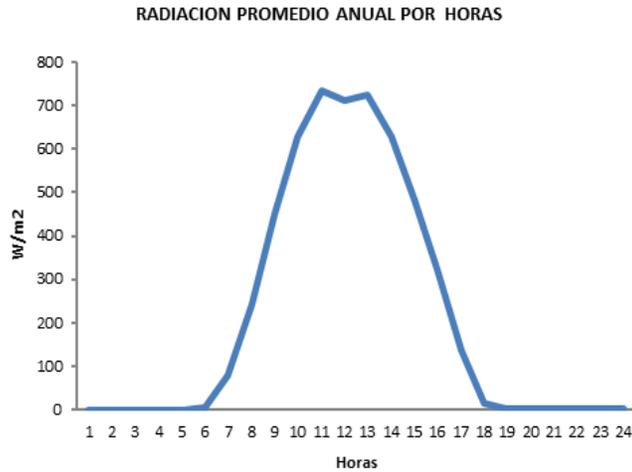
**Figura 5.** Velocidad del viento anual por horas (Datos, Estación Meteorológica del Grupo de Energías Alternativas de la ESPOCH).

En las Figuras 4 y 5, muestran el comportamiento de la temperatura y la velocidad del viento promedio horas, en las que se puede observar una tendencia regular con temperaturas y velocidades del viento mas altas a las horas de la tarde, con las variaciones más significativas entre las 9:00 y 18:00, debido a su posición geográfica las mismas se mantienen a lo largo del año.



**Figura 6.** Nubosidad promedio anual por horas (Datos, Estación Meteorológica del Grupo de Energías Alternativas de la ESPOCH).

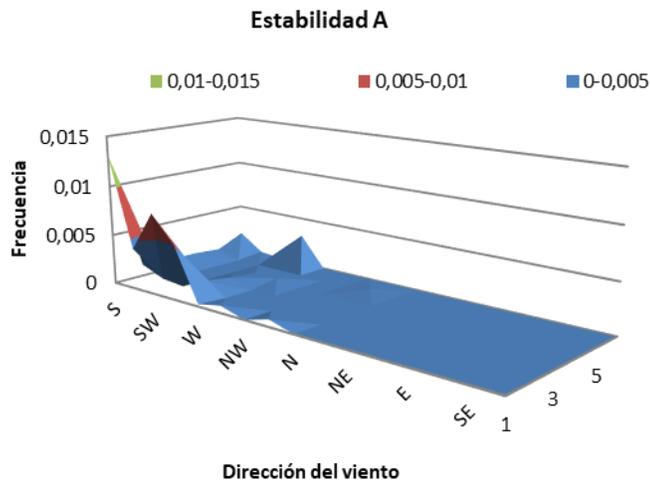
En la Figuras 6 se presenta la nubosidad, en la cual se puede observar mayor nubosidad en las horas de la mañana respecto a la tarde y noche.



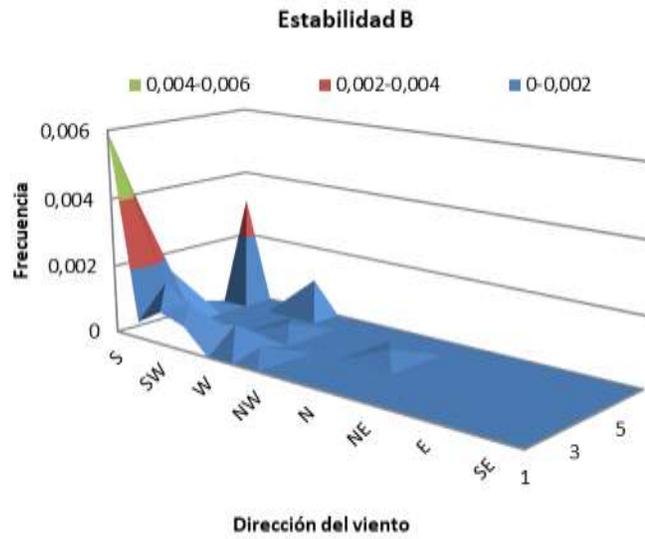
**Figura 7.** Radiación promedio anual por horas (Datos Estación Meteorológica del Grupo de Energías Alternativas de la ESPOCH).

En el Figura 7 se observa que el máximo de Radiación se da entre 10:00 de la mañana y las 13:00 en la ciudad de Riobamba, con niveles de radiación que llegan alrededor de los 700 w/m2 entre las 9:00 y 15:00.

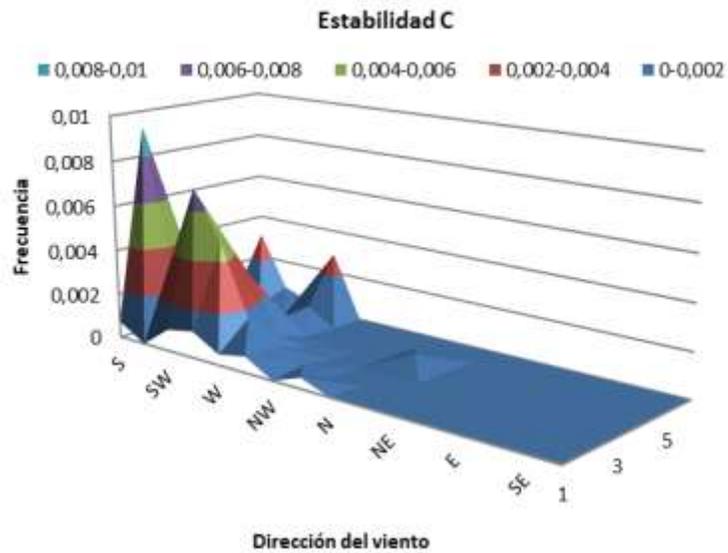
### 3.3. Estabilidad atmosférica



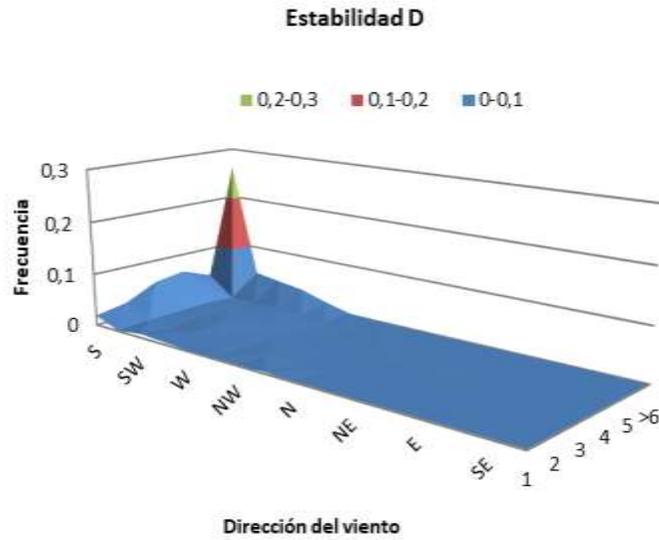
**Figura 8.** Resultados de estabilidad extremadamente inestable (A) según Pasquill, en función de la dirección y velocidad del viento.



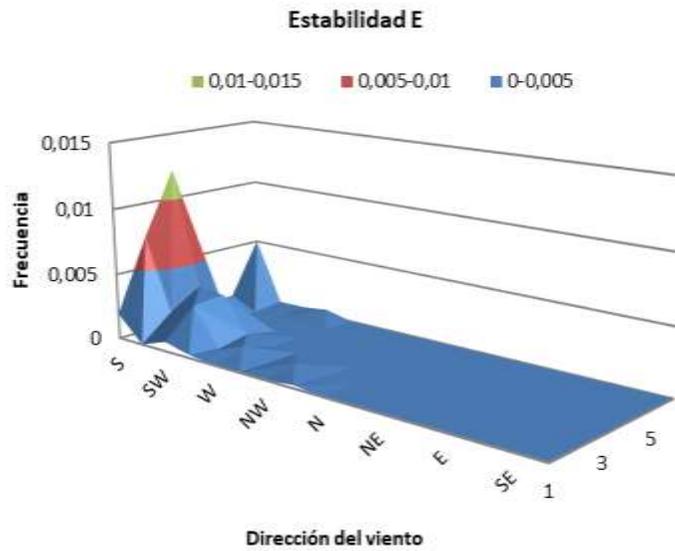
**Figura 9.** Resultados de estabilidad moderadamente inestable (B) según Pasquill, en función de la dirección del viento y velocidad del viento.



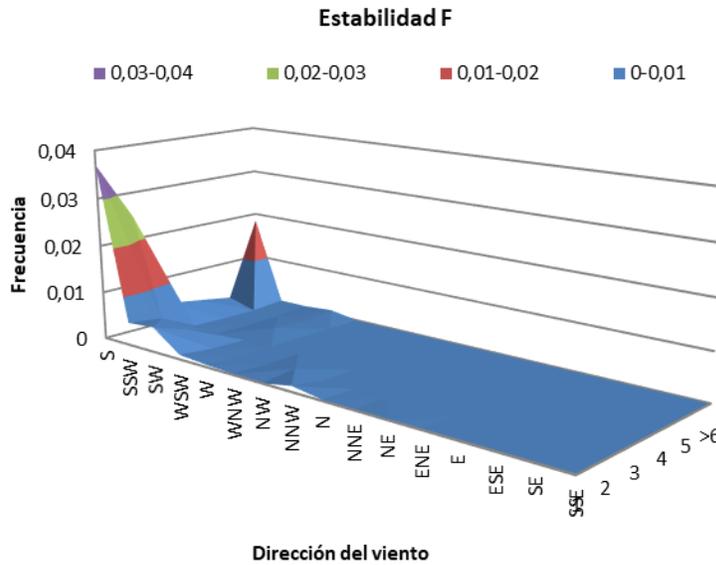
**Figura 9.** Resultados de estabilidad inestable (C) según Pasquill, en función de la dirección del viento y velocidad del viento.



**Figura 10.** Resultados de estabilidad neutra o adiabática (D) según Pasquill, en función de la dirección del viento y velocidad del viento.



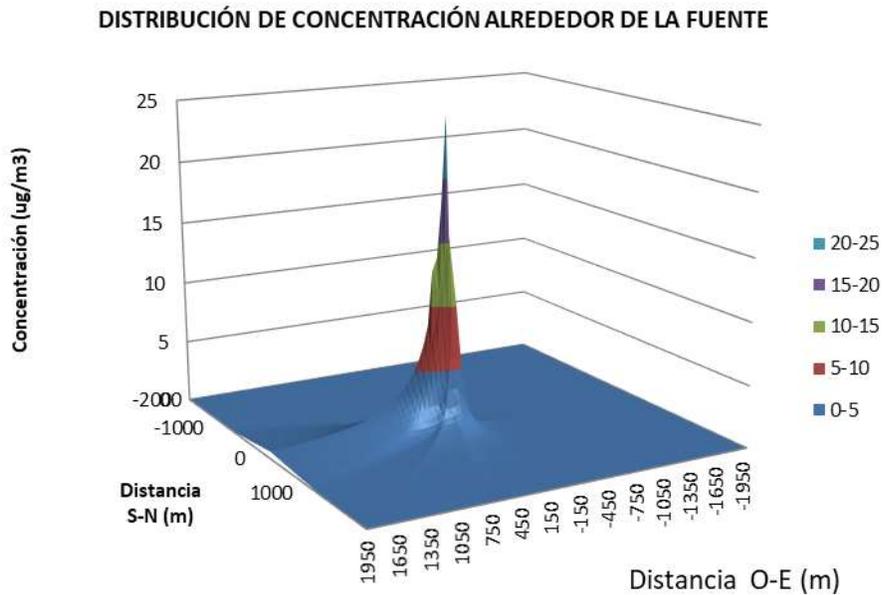
**Figura 11.** Resultados de estabilidad estable (E) según Pasquill, en función de la dirección del viento y velocidad del viento.



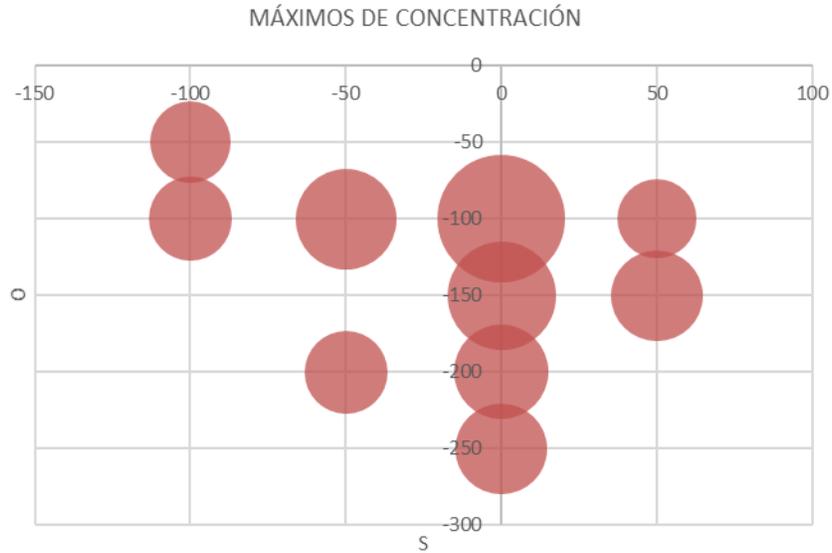
**Figura 12.** Resultados de estabilidad moderadamente estable (F) según Pasquill, en función de la dirección del viento y velocidad del viento.

En las Figuras 8 al 12 se muestra la distribución de la frecuencia de estabilidad en función de la dirección del viento y diferentes valores de velocidad, las cuales representan como variara la distribución de contaminación en estas diferentes condiciones, con prevalencia clara en el caso neutro (estabilidad D, Figura 10) con direcciones predominantes que se dirigen hacia el sur oeste.

### 3.4. Distribución de contaminantes



**Figura 13.** Distribución del contaminante alrededor de la fuente.



**Figura 13.** Puntos donde se ubican los 10 máximos de concentración alrededor de la fuente.

**Tabla Nº 6.** Máximos de concentración tomados desde el Sur y Oeste

X (m)	Y (m)	Concentración ( $\mu/m^3$ )	Concentración relativa
0	100	24.932	1
0	150	18.137	0.727
50	100	15.627	0.627
0	200	13.786	0.553
0	250	12.860	0.516
50	150	12.709	0.510
100	100	10.816	0.434
50	200	10.496	0.421
100	50	10.178	0.408
-50	100	9.783	0.392

En la Figura 10 se observa la distribución relativa de los contaminantes calculadas con el modelo ISCLT, bajo las condiciones físicas y meteorológicas de la zona y en la Figura Nº 11 y Tabla 6, se observa los máximos de concentración, los cuales se dirigen principalmente hacia el sur oeste, dado la predominancia de la dirección del viento en esa dirección, razón por la cual hay más puntos de máximo en la misma, cabe recalcar que el sistema tomado en nuestro caso para representar estos puntos es hacia el sur oeste por la dirección del viento.

#### 4. CONCLUSIONES

- ✓ Se determinó la distribución de contaminantes atmosféricos bajo condiciones físicas y meteorológicas de la ciudad de Riobamba, aplicando el modelo matemático gaussiano ICSLT, con mayor distribución de concentración hacia el suroeste.
- ✓ La dirección del viento es dominante hacia el suroeste de la ciudad, lo que influye en la dispersión de los contaminantes en ese sentido.

- ✓ Se estableció la estabilidad atmosférica de la zona usando el modelo de Van Ulden y Hostlag, ajustándole a las condiciones de altura y posición geográfica de la ciudad de Riobamba.
- ✓ La estabilidad predominante en la zona es la D (neutro), con dirección hacia el suroeste.
- ✓ Los parámetros meteorológicos que inciden en la difusión de contaminantes tienen un comportamiento regular a lo largo del año debido a la posición geográfica de la ciudad, lo que incide en la difusión de los contaminantes para que los mismos tengan un comportamiento similar.

## 5. AGRADECIMIENTO

*Al centro de energía y Ambiente de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y al proyecto “Programa integrado de monitoreo para el control de la calidad del aire en la ciudad de Riobamba”, de la Universidad Nacional de Chimborazo, por contribuir con los datos y el modelo usado respectivamente.*

## 6. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Alarcon, E. Callarotti, et al. (2000). Modelos Matemáticos en Ingeniería Moderna. Caracas-Venezuela. Universidad Central de Venezuela. pp301-303.
- Aeromod, EPA, (2004) *Description of model formulation*. EPA-454/R-03-004, Office of Air Quality Planning and Standards, p. 91.
- Amanda H., et al, (2006), *Applied Atmospheric Dynamics*, John Wyle and Sons, England.
- Bohren, C.F., Clothiaux, (2006) E.E., *Fundamentals of Atmospheric Radiation*, John Wiley & Sons, United State.
- Boublel, R. Fox Donal, et al. (1990). *Fundamentals at Air Pollution*. 3ª ed. NewYork - Estados Unidos. Academic Press. pp. 243-362.
- Bruni, Holtslag, (1982) A simple parametrization of de surface fluxes of sensible and latent heat during day time compared whit the Penman Monteinth concept, *Applied Meteorology*, 21, p 1610-1621.
- Cian J Desmond, Simon Watson, (2014) A study of stability effects in forested terrain, *Journal of Physics: Conference Series* 555.
- Cian J Desmond, Simon Watson, (2014) A study of stability effects in forested terrain, *Journal of Physics: Conference Series* 555, 2014.
- Doll D, Ching J. K. S. Y Kaneshire J, (1985) Parametrization of surfaces heating for soli and concrete using net radiation data, *Boundary Layer Meteorology*, 32, p 351-372.
- Figuruelo, J.E. Davila ,M.M. (2004). *Química Física del Ambiente y de Procesos Medio Ambientales*. Barcelona – España. Reverte. pp. 1-104.
- Geografía de Ecuador, [https://es.wikipedia.org/wiki/Geograf%C3%ADa\\_de\\_Ecuador](https://es.wikipedia.org/wiki/Geograf%C3%ADa_de_Ecuador). Revisado en línea, 3 de junio de 2015.
- Haro A. et al, (2015), Characterization of the atmospheric dynamics in Riobamba city using de chaos theory, *Atmospheric and Climate Sciences*, Vol.5 No.4, pp. 441-449, October 2015.
- Haro A. et al, (2014) Thermal flows in the surface atmosphere of the Riobamba city, *Atmospheric and Climate Sciences*, 4, pp. 679-684.
- Garratt J.R., (1994) The atmospheric boundary layer, *Earth-Science Reviews*, Volume 37, Issues 1–2, Pages 89-134, October.
- Kiely, G. (2000). *Ingeniería Ambiental, Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. 1ª ed. Madrid- España. Mc Graw Hill. pp. 453-524.
- Kasten F., Czeplak G., (1980). Solar and Terrestrial Radiation dependent on the Amount and Type of Cloud, *Solar Energy*, Vol. 24, 177-189.
- Marrero Santana M. (2011) *Parámetros de rugosidad representativos de terrenos naturales*, Departamento de Física Aplicada. Universidad de Granada.
- Martinez, E. Díaz, Y. (2004). *Contaminación atmosférica*. Cuenca- España. Ediciones de la Universidad de Castilla. pp 13-87.
- Palacios Espinoza Elvira, Molina Claudia Espinoza, (2014) Contaminación del aire exterior. Cuenca - ecuador, 2009- 2013. Posibles efectos en la salud, *Revista de la Facultad de Ciencias*

- Médicas, Volumen 32, Cuenca, Ecuador.  
file:///C:/Users/Arquimides%20Haro/Downloads/883-2784-1-PB.pdf, 27 de enero de 2017.
- Panofsky Ha And Dutton Ja, (1984) Atmospheric Turbulence – *Models and Methods for Engineering Applications*. New York: Wiley, 1984.
- Reyes. S. (2002). *Introducción a la Meteorología. Baja California* – Mexico. Universidad de Baja California. pp 21-49.
- Rodríguez D. y otros, (2015) Variación de la estabilidad y altura de la capa de mezcla en la ciudad de pinar del río: su relación con condiciones sinópticas, *Revista Brasileira de Meteorología*, v. 30, n. 1, 1 - 15,.
- Rodríguez R., Capa A. y Portela A., (2004) *Meteorología y Climatología*, FECYT (Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología), , ISBN: 84-688-8535-5.
- Sang-Jong Park, Soon-Ung Park, Chang-Hoi Ho And Larry Mahrt, (2009) Flux-gradient relationship of water vapor in the surface layer obtained from CASES-99 experiment, *Journal of Geophysical Research*, VOL. 114 2009.
- Teixeira, J. et al, (2008) Parameterization of the Atmospheric Boundary Layer, *Bulletin of the American Meteorological Society* 89.4, 453-458.
- Trozzi C., Piscitello E., et. al. (2003). Modeling area, line and point sources for ISC model. methodology, computer interface and case studies, Emission inventories, Roma -Italy. pp. 1-27. <http://nlquery.epa.gov/epasearch>. 2015- 09-25
- Van Ulden, Hostlang. (1985) Estimation of Atmospheric Boundary Layer Parameters for Diffusion Applications". *Journal of climate and Applied Metereology*, 24, 1196-1207.
- Wyngaard, J. C., (1998) Convection viewed from a turbulence perspective. *Buoyant Convection in Geophysical Flows*, Advanced Science Institute Series, 23– 39.