

# BASES PARA LA MODELACIÓN DEL CAMPO TÉRMICO Y EL BALANCE DE ENERGÍA EN UNA CIUDAD MEXICANA DEL DESIERTO: MEXICALI

Adalberto TEJEDA MARTÍNEZ<sup>1</sup>, Onofre Rafael GARCÍA CUETO<sup>2</sup>, Lourdes Paola AQUINO MARTÍNEZ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Climatología Aplicada de la Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz (México). <sup>2</sup>Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California (México), <sup>3</sup>Posgrado en Ciencias de la Tierra de la UNAM. [atejeda@uv.mx](mailto:atejeda@uv.mx), [rafaelcueto@uabc.edu.mx](mailto:rafaelcueto@uabc.edu.mx), [lulusita.am@gmail.com](mailto:lulusita.am@gmail.com)

## RESUMEN

En este trabajo se presentan modelos preliminares de las componentes del balance de energía (BE) para diferentes usos de suelo, que permiten calcular la temperatura del aire (T) en función de la radiación solar global, con el propósito de modelar estadísticamente el comportamiento de la isla de calor (IC) en la ciudad de Mexicali (México). Los modelos de BE para usos de suelo urbano, suburbano y rural, se generaron por medio de ecuaciones de regresión a partir de datos obtenidos en campañas de mediciones que se llevaron a cabo en junio de 2003. Los modelos para cuerpos de agua se obtuvieron en función de la emisividad y el albedo aplicando un proceso iterativo.

**Palabras claves:** Clima urbano, balance de energía, isla de calor, Mexicali (México).

## ABSTRACT:

Preliminary energy balance parameterizations for three different land covers are presented in order to estimate the air temperature as a function of solar global radiation in Mexicali City (Mexico). The parameterizations are regression models from field measurements from June 2003. For water bodies those models are iterative approximations from albedo and emissivity.

**Key words:** Urban climate, energy balance, urban heat island, Mexicali City (Mexico).

## 1. INTRODUCCIÓN

En ausencia de advección, la radiación neta ( $Q_n$ ) en la interfaz superficie/atmósfera se disipa a través del calor sensible turbulento ( $Q_h$ ), el calor latente de evaporación ( $Q_e$ ) y el calor almacenado en la superficie ( $Q_s$ ), resultando la siguiente ecuación (OKE, 1987; MALHI *et al.*, 2005; FOKEN, 2008):

$$Q_n = Q_h + Q_e + Q_s \quad \dots (1)$$

Ese balance de energía proporciona la explicación básica de la isla urbana de calor, ya que en áreas citadinas rodeadas por vegetación, el contraste térmico se presenta porque la radiación solar en el ambiente rural es consumida mayoritariamente en la evaporación del agua mientras que en las superficies urbanas la energía es empleada para calentar las estructuras, y una parte de este calor es liberado hacia la atmósfera durante las noches (TEJEDA-MARTÍNEZ Y JÁUREGUI-OSTOS, 2005; GARCÍA-CUETO *et al.*, 2004), provocando dicho fenómeno de la isla urbana de calor.

Por tanto, es factible concebir un modelo de los campos térmicos atmosféricos superficiales a partir de mediciones de balance de energía para diferentes usos de suelo. En particular para la ciudad de Mexicali ya se han llevado a cabo estudios sobre la isla de calor (ver por ejemplo, GARCÍA-CUETO *et al.*, 2007), pero no partiendo de mediciones de BE.

Como producto preliminar de este trabajo, se presentarán los algoritmos de estimación para tres periodos: el ciclo diario completo, el tiempo diurno y el nocturno. Se usarán como punto de partida datos de balance de energía de mediciones realizadas en junio de 2003.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS

La ciudad de Mexicali se ubica en 32,6° latitud norte, 115,5° longitud oeste y a una altitud promedio de 10 msnm. Con una extensión de 113,7 km<sup>2</sup>, Mexicali es la capital del estado de Baja California, situado al noroeste del país, en la parte septentrional de la península del mismo nombre (fig. 1). Tiene un clima cálido seco con lluvias en invierno y temperaturas muy extremosas, ya que en el verano las máximas son cercanas a los 50 °C, mientras que en el invierno las mínimas están alrededor de los 0 °C (GARCÍA-CUETO, 2006).

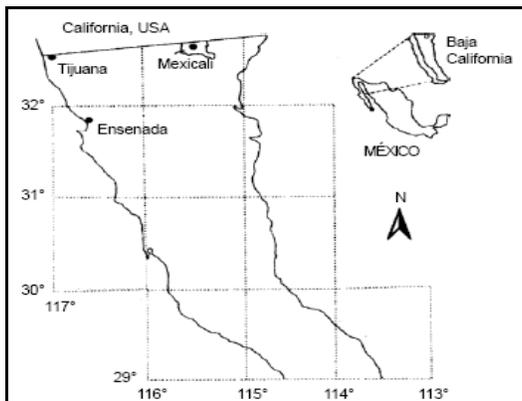


Figura 1. Localización geográfica de la ciudad de Mexicali, Baja California (México).

Los datos fueron obtenidos a partir de campañas de mediciones de BE para diferentes usos de suelo de la ciudad de Mexicali, realizadas en el mes de junio de 2003. Los métodos de medición y las características de los instrumentos usados en las campañas se resumen en la tabla 1.

Lugar y periodo de datos	Uso predominante de suelo	$Q_n$	$Q_h$	$Q_e$	$Q_s$	Intervalos de muestreo
Instituto de Ingeniería, 14 al 26 de junio de 2003	Urbano	Pirradiómetro neto	Covarianza turbulenta	Covarianza turbulenta	Estimado como residuo*	30 min
Campestre, 13 al 25 de junio de 2003	Rural cultivada	Pirradiómetro neto	Sistema de razón de Bowen	Sistema de razón de Bowen	Placas	20 min
Villa Zapata, 11 al 25 de junio de 2003	Rural desierto	Pirradiómetro neto	Covarianza turbulenta	Covarianza turbulenta	Estimado como residuo	30 min

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LAS CAMPAÑAS DE BALANCE ENERGÉTICO REALIZADAS EN JUNIO DE 2003 EN MEXICALI B. C. (MEXICO).

### 3. MÉTODO

TEJEDA-MARTÍNEZ y JÁUREGUI-OSTOS (2005) encontraron que los valores altos de los coeficientes de correlación entre las distintas componentes del BE en el valle de México permiten modelar esas componentes por medio de ecuaciones de regresión. En Mexicali se observó algo similar, como se mostrará más adelante. Puesto que en esta ciudad se observa la isla de calor durante la noche, dando lugar a una isla urbana fría diurna según (GARCÍA-CUETO *et al*, 2007), los modelos de estimación deberán corresponder por separado al ciclo diario completo, al periodo diurno y al nocturno.

Primeramente se propone estimar la radiación neta ( $Q_n$ ) para cada uso de suelo en función de la radiación global ( $Q_g$ ), bajo la consideración de que la  $Q_g$  incidente sobre las superficies de Mexicali es uniforme. Los modelos para el ciclo diario y el periodo diurno se generaron por regresión partiendo de mediciones directas de ambas variables. Como en el periodo nocturno (8pm a 7am locales)  $Q_g$  es igual a cero, los modelos de  $Q_n$  nocturna se establecieron como regresiones de la radiación neta mínima ( $Q_{n_{\min}}$ ) en función de la radiación solar máxima ( $Q_{g_{\max}}$ ) y tomando en cuenta el intervalo de tiempo en el que  $Q_n$  es igual a cero, para estimar las ecuaciones de las rectas para los intervalos de  $Q_n = 0$  a  $Q_{n_{\min}}$  y de  $Q_{n_{\min}}$  a  $Q_n = 0$  (figura 2).

Para el cálculo de las componentes del balance energético  $Q_s$ ,  $Q_h$  y  $Q_e$ , se generaron ecuaciones de regresión en función de la radiación neta obtenida en las campañas de mediciones (Tabla 1), con el objeto de que el modelo sólo use como variables de entrada los usos del suelo, la hora del día y la radiación solar global. El calor latente de evaporación ( $Q_e$ ) será estimado como un residuo de la ecuación (2), excepto para la estación

Campestre, donde fue medido con placas de flujo de calor en el suelo, pero en todos los casos se busca contar con una relación estadística para ulteriores estimaciones.

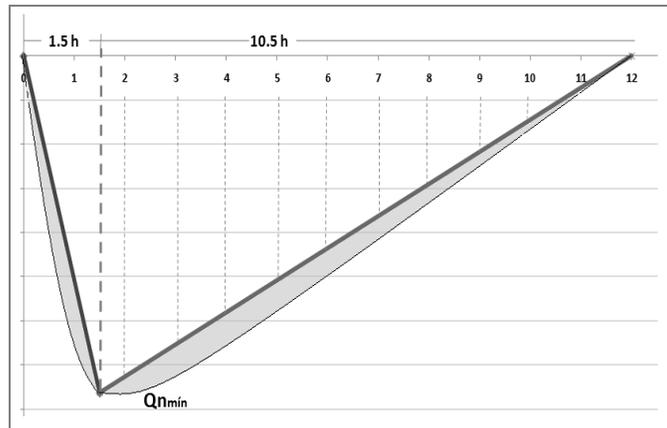


Figura 2. Comportamiento de los intervalos de tiempo entre la transición de  $Qn$  igual a cero en ambos periodos y  $Qn_{\min}$ . La parte sombreada en color gris representa el error de estimación.

Por su parte, las magnitudes promedio anual de  $Qs$  y  $Qe$  en cuerpos de agua (en lo sucesivo con el subíndice  $w$ ) oscilan entre los  $\pm 150 \text{ W/m}^2$ ; en cambio las magnitudes de  $Qh$  son de 0 a  $40 \text{ W/m}^2$  (HARTMANN, 1994), por tanto con el fin de simplificar el modelo no se considerará para superficies de agua la componente de  $Qh$  dentro del BE, quedando la ecuación del balance energético:

$$Qn_w = Qs_w + Qe_w \quad \dots (3)$$

Si para el periodo diurno se considera la radiación solar incidente menos la reflejada y la de emisión de la superficie (HARTMANN, 1994), se obtiene que:

$$Qn_w = Qg (1 - \alpha_w) - \varepsilon \sigma T_w^4 \quad \dots (4)$$

Siendo:  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ,  $\varepsilon = 92 - 96 \%$  y  $\alpha_w = 7\%$  es el valor típico del albedo del agua y  $Qg$  es la radiación global incidente en la superficie acuosa, compuesta tanto por radiación solar como por la emitida por la atmósfera que rodea a dicha superficie (LINACRE, 1992).

Como no se cuenta con el valor de  $T_w$  ni de  $Q_n$ , se procederá a estimarlos por medio de iteraciones, proponiendo primeramente un valor arbitrario de  $T_w(Q_e, Q_g \text{ y } \alpha_w)$ , y parando el proceso iterativo hasta que:

$$|T_w^n - T_w^{n-1}| = \varepsilon \text{ tal que } \varepsilon \leq 0.5^\circ\text{C}$$

Teniendo ya la temperatura se obtiene  $Q_s$  de la siguiente ecuación:

$$Q_s = \bar{c}T \quad \dots\dots (5)$$

Donde:  $\bar{c} = \rho_w c_w d_w$  y  $\rho_w = 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $c_w = 4218 \frac{\text{J}}{\text{K}} \text{ kg}$  y  $d_w$  es la profundidad, para finalmente calcular con la ecuación (3) del balance de energía la componente  $Q_e$ .

$$Q_{e_w} = Q_{n_w} - \rho_w c_w d_w T_w \quad \dots\dots (6)$$

En el periodo nocturno solamente se toma en cuenta la emisión de la radiación de longitud de onda larga, considerando que la emisión de onda larga de la atmósfera hacia la superficie acuosa es insignificante:

$$Q_{n_w} = -\varepsilon\sigma T_w^4 \quad \dots\dots (7)$$

Desde luego, se procederá a realizar la misma aproximación sucesiva como en el caso de las componentes para el periodo diurno.

Por otra parte, para alcanzar el objetivo de modelar las componentes del balance energético para distintos usos de suelo en la ciudad de Mexicali, se partió de clasificarlas en base a la carta topográfica 11ID65 escala 1 a 50 000 del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). Se obtuvieron cinco tipos de usos de suelo, los cuales son representativos de la superficie donde se realizaron las campañas (tabla 2).

	<b>Usos de suelo</b>	<b>Campaña</b>
1	Edificaciones	Instituto
2	Cultivo	Campestre
3	Dunas	Zapata
4	Cuerpos de agua	Parametrizaciones
5	Cementerios	Parametrizaciones

TABLA 2. PRINCIPALES USOS DE SUELO EN LA REGIÓN DE ESTUDIO

El cálculo de las componentes del balance energético en cuerpos de agua ya fue explicado. Los cementerios, en los que suelen edificarse monumentos de regular tamaño al contrario

de la costumbre estadounidense, se considerarán conformados en un 50% de edificaciones (tipo Instituto) y el otro 50% de cultivos (tipo Campestre).

Para llegar al objetivo final de estimar la temperatura del aire en función de la radiación neta, se utilizará el algoritmo propuesto por LINACRE (1992):

$$T = Q_n (0,086) - (0.006 \text{ } ^\circ\text{C/m}) z \quad \dots (8)$$

Donde  $Q_n$  es la radiación neta; en el término de 0,086 está implícita la latitud de Mexicali,  $0.006^\circ\text{C/m}$  es el gradiente térmico vertical,  $Z$  es la altitud en metros y  $T$  es la temperatura del aire buscada en  $^\circ\text{C}$ .

### 3.1 ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN NETA

Los modelos para cada campaña del ciclo diario y del periodo diurno, obtenidos por medio de rectas de regresión con sus valores del coeficiente de correlación y de error estándar se muestran en las tablas 3 y 4.

Modelo de $Q_n$	Coficiente de correlación	Error estándar de estimación $\text{W/m}^2$
$Q_{nI} = -66.43 + 0.48 Q_g$	0,96	60,06
$Q_{nZ} = -52.18 + 0.50 Q_g$	1,00	12,44
$Q_{nC} = -52.98 + 0.59 Q_g$	0,96	71,50

TABLA 3. MODELOS DE  $Q_n$  EN FUNCIÓN DE  $Q_g$  PARA EL CICLO DIARIO (I: INSTITUTO DE INGENIERÍA, URBANO; Z: VILLA ZAPATA, DESIERTO RURAL; C, CAMPESTRE, RURAL CON CULTIVO).

Modelo de $Q_n$ Diurna	Coficiente de correlación	Error estándar de estimación $\text{W/m}^2$
$Q_{nI} = 20.44 + 0.38 Q_g$	0,85	70,36
$Q_{nZ} = -58.24 + 0.51 Q_g$	1,00	15,22
$Q_{nC} = 28.49 + 0.49 Q_g$	0,85	89,60

TABLA 4. MODELOS DE  $Q_n$  ( $Q_g$ ) PARA EL PERIODO DIURNO (I: INSTITUTO DE INGENIERÍA, URBANO; Z: VILLA ZAPATA, DESIERTO RURAL; C, CAMPESTRE, RURAL CON CULTIVO).

En la tabla 5 se presentan las ecuaciones que se obtuvieron para llegar a calcular la  $Q_n$  nocturna en función del tiempo.

Campestre	Zapata	Instituto
Para $t_i = 0 - 1.5$ hrs.		
$Q_{nC \text{ nocturna}} = -50.80 t_i$	$Q_{nZ \text{ nocturna}} = -40.53 t_i$	$Q_{nI \text{ nocturna}} = -61.05 t_i$
Para $t_j = 1.5 - 10.5$ hrs.		
$Q_{nC \text{ nocturna}} = 7.26 t_j - 87.08$	$Q_{nZ \text{ nocturna}} = 5.79 t_j - 69.48$	$Q_{nI \text{ nocturna}} = 8.72 t_j - 104.65$

TABLA 5. MODELOS DE RADIACIÓN NETA NOCTURNA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO (I: INSTITUTO DE INGENIERÍA, URBANO; Z: VILLA ZAPATA, DESIERTO RURAL; C, CAMPESTRE, RURAL CON CULTIVO).

Por lo que se refiere al resto de las componentes del BE se utilizarán los modelos de las tablas 6, 7 y 8. Nótese que para el caso del calor almacenado en el suelo suburbano y urbano, su estimación está en función de  $Q_n$  para suelo rural ya que presenta coeficientes de correlación más altos que los generados con su propia  $Q_n$ .

Periodo	Modelos	Coefficiente de correlación	Error estándar de estimación $W/m^2$
Ciclo diario	$Q_{sC} = -48.37 + 0.32 Q_{nC}$	0,94	29,85
	$Q_{sZ} = -19.93 + .54 Q_{nZ}$	0,95	35,58
	$Q_{sI} = -40.84 + .48 Q_{nI}$	0,91	45,24
Diurno	$Q_{sC} = -60.18 + 0.35 Q_{nC}$	0,84	38,28
	$Q_{sZ} = -32.48 + 0.58 Q_{nZ}$	0,88	47,3
	$Q_{sI} = -77.58 + .59 Q_{nI}$	0,8	58,35
Nocturno	$Q_{sC} = -51.96 + 0.30 Q_{nZ}$	0,57	2,07
	$Q_{sZ} = -5.76 + 0.83 Q_{nZ}$	0,93	11,81
	$Q_{sI} = -58.74 + 0.28 Q_{nZ}$	0,5	17,09

TABLA 6. MODELOS PARA ESTIMAR EL CALOR ALMACENADO EN EL SUELO ( $Q_s$ ) PARA DISTINTOS PERIODOS (I: INSTITUTO DE INGENIERÍA, URBANO; Z: VILLA ZAPATA, DESIERTO RURAL; C, CAMPESTRE, RURAL CON CULTIVO).

Periodo	Modelos	Coefficiente de correlación	Error estándar de estimación W/m <sup>2</sup>
Ciclo diario	$Q_{hC} = 17.75 + 0.38 Q_{n_C}$	0,9	46,41
	$Q_{hZ} = 18.88 + 0.45 Q_{n_Z}$	0,94	33,33
	$Q_{hI} = 38.09 + 0.52 Q_{n_I}$	0,94	37,9
Diurno	$Q_{hC} = -17.98 + 0.46 Q_{n_C}$	0,79	61,85
	$Q_{hZ} = 36.88 + 0.40 Q_{n_Z}$	0,81	44,26
	$Q_{hI} = 72.78 + 0.42 Q_{n_I}$	0,75	48,59
Nocturno	$Q_{hC} = 1.98 - 0.02 Q_{n_C}$	0,03	12,06
	$Q_{hZ} = 3.66 + 0.16 Q_{n_Z}$	0,58	8,09
	$Q_{hI} = 45.56 + 0.70 Q_{n_I}$	0,68	15,63

TABLA 7. MODELOS PARA ESTIMAR EL CALOR SENSIBLE TURBULENTO ( $Q_h$ ) PARA DISTINTOS PERIODOS (I: INSTITUTO DE INGENIERÍA, URBANO; Z: VILLA ZAPATA, DESIERTO RURAL; C, CAMPESTRE, RURAL CON CULTIVO).

Periodo	Modelos	Coefficiente de correlación	Error estándar de estimación W/m <sup>2</sup>
Ciclo diario	$Q_{eC} = 30.80 + 0.30 Q_{n_C}$	0,82	52,49
	$Q_{eZ} = 1.05 + .01 Q_{n_Z}$	0,07	18,14
	$Q_{eI} = 2.73 - 0.01 Q_{n_I}$	0,08	19,53
Diurno	$Q_{eC} = 79.55 + 0.19 Q_{n_C}$	0,43	68,45
	$Q_{eZ} = -4.45 + 0.02 Q_{n_Z}$	0,14	23,35
	$Q_{eI} = 4.80 - 0.01 Q_{n_I}$	0,08	24,6
Nocturno	$Q_{eC} = 39.08 + 0.59 Q_{n_C}$	0,56	17
	$Q_{eZ} = 2.15 + 0.01 Q_{n_Z}$	0,02	10,15
	$Q_{eI} = 8.97 + .08 Q_{n_I}$	0,14	12,33

TABLA 8. MODELOS PARA ESTIMAR EL CALOR LATENTE DE EVAPORIZACIÓN ( $Q_e$ ) PARA DISTINTOS PERIODOS (I: INSTITUTO DE INGENIERÍA, URBANO; Z: VILLA ZAPATA, DESIERTO RURAL; C, CAMPESTRE, RURAL CON CULTIVO).

#### 4. COMENTARIOS FINALES

En resumen, para el cálculo de las componentes del BE y de la temperatura del aire correspondiente al ciclo diario completo y a los periodos diurno y nocturno se proponen ecuaciones empíricas con altos coeficientes de correlación en la mayoría de los casos, y con

errores de estimación tolerables. Los menores coeficientes de correlación se presentan para el calor latente de evaporación ( $Q_e$  en Tabla 8) y  $Q_{hc}$  en Tabla 7, pero puede prescindirse de las regresiones y estimarlos por residuo de la ecuación de balance de energía.

Los modelos provienen de datos observados durante el verano, y previo a su implementación computacional se tendrán que realizar ajustes a partir de mediciones termométricas directas para corroborar la bondad al simular las islas urbanas de calor (nocturna) y de frío (diurna).

### **AGRADECIMIENTOS:**

A Maryam Nava Assad y Abraham Torres Alavez, por la edición de este documento y las sugerencias para su mejora.

### **REFERENCIAS**

- FOKEN, T. (2008). *Micrometeorology*. Springer Verlag, Berlín-Heidelberg, 306 p.
- GARCÍA-CUETO, R., E. JÁUREGUI-OSTOS, D. TOUDERT, A. TEJEDA- MARTÍNEZ (2007), Detection of the urban heat island in Mexicali, B.C., México and its relationship with land use. *Atmósfera* 20(2), 11-131.
- GARCÍA-CUETO, O.R. (2006). *El balance de energía y capa límite superficiales sobre distintos usos del suelo en la ciudad de Mexicali, B.C.* Tesis de Doctorado en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM, 204 pp.
- GARCÍA- CUETO O.R, E. JÁUREGUI-OSTOS, A. TEJEDA- MARTÍNEZ (2004), Contraste ciudad/desierto del balance de energía en la atmósfera superficial en el NW de México,, en *El clima, entre el mar y la montaña*. (J.G. García-Codron et al, compiladores). Asociación Española de Climatología Serie A, No.4, 754 p: 291-302.
- HARTMANN, D.L. (1994). *Global physical climatology*. Academic Press, Inc. NY, 410p.
- LINACRE, E. (1992). *Climate data and resource: a reference and guide*. Editorial Routledge. London and New York, 366p.
- MALHI, Y., K. McNAUGHTON Y C. VON RONDOW (2005). Low frequency atmospheric transport and surface flux measurements, 101-117, en LEE, X., W. MASSMAN Y B. LAW (EDITORES). *Handbook of Micrometeorology: A guide for surface flux measurement and analysis*. Kluwer Academic Publishers. New York, 250 p.
- OKE, T.R. (1987). *Boundary Layer Climates*. Methuen Ed. New York, 435 p.
- TEJEDA-MARTÍNEZ A. Y JÁUREGUI-OSTOS E. (2005). Surface energy balance measurements in the México City region: a review. *Atmósfera* 18 (1):11-131.