

## Experimentación microclimática aplicada a coberturas horizontales urbanas

Néstor Santillán Soto, O. Rafael García Cueto, Sara Ojeda Benítez,  
Zalia Patricia Haro Rincón.

Instituto de Ingeniería. Universidad Autónoma de Baja California, Baja California, México.  
[nsantillan@uabc.edu.mx](mailto:nsantillan@uabc.edu.mx), [rafaelcueto@uabc.edu.mx](mailto:rafaelcueto@uabc.edu.mx), [sara.ojeda.benitez@uabc.edu.mx](mailto:sara.ojeda.benitez@uabc.edu.mx),  
[zharo@uabc.edu.mx](mailto:zharo@uabc.edu.mx)

### RESUMEN

La respuesta térmica de las coberturas altera el clima urbano, derivando en afectaciones energéticas y de confort que impactan a los habitantes ciudadanos, por lo que el objetivo de este estudio es analizar los flujos de energía de las coberturas horizontales urbanas, en especial el poliestireno expandido impermeabilizado con pintura elastomérica en la ciudad de Mexicali, Baja California, ubicada al Noroeste de México. La experimentación se realizó en el verano de 2011 mediante el uso de sensor radiométrico de cuatro componentes, equipo de covarianza turbulenta e higrómetro de Kriptón, con lo que fue posible analizar el comportamiento e intensidades de los flujos de calor utilizando el modelo  $Q^* = Q_H + Q_E + Q_G + Q_A + Q_D$ . Se observa un flujo de calor en este material impermeabilizante que se suma al calor sensible que rebasa la energía neta disponible. Se atribuye este flujo adicional a la influencia térmica de los equipos de aire acondicionado (calor antropogénico y calor advectivo), lo cual modifica el modelo de balance a  $Q^* = Q_H + Q_A + Q_D$ . Con los resultados obtenidos surge la necesidad de llevar la experimentación a una escala mayor en la que sea posible modelar los flujos en fraccionamientos habitacionales. Se proponen para esta futura etapa dos fraccionamientos ubicados en la ciudad de Mexicali, en uno de los cuales haya diferentes coberturas: aislantes impermeabilizados (techos blancos), pavimentos, banquetas peatonales de concreto, suelo nativo y muy pocas áreas verdes, para ser comparado con otro fraccionamiento en el que la única diferencia con respecto al anterior es que el techo sea de color marrón. El conocimiento del modelo de balance de energía para diferentes fraccionamientos ayudará a proponer los materiales que minimizan el impacto térmico a la ciudad de Mexicali.

**Palabras clave:** flujos de energía, coberturas, impacto térmico, climatología urbana.

### INTRODUCCIÓN

El efecto de la Isla de Calor Urbano (ICU) se presenta como un incremento de las temperaturas atmosféricas y de superficie en las zonas urbanas en contraste con las zonas de los alrededores (zona rural). Este efecto se debe principalmente a la concentración de las actividades humanas y los cambios de la superficie natural terrestre (Kato, 2005; Shimoda et al, 2005; Naruma et al, 2009a, 2009b).

Mexicali se ha visto en la necesidad de modificar su cobertura nativa, derivado del rápido crecimiento poblacional de los últimos años, tan solo en el año 2010 se contaba con 936 826 habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010). Esta aceleración poblacional exige enormes y costosas exigencias, entre ellas la construcción de conjuntos habitacionales y vías de comunicación más rápidas y eficaces, invadiendo espacio aéreo, tierras, ríos, etc., con impactos que modifican la vegetación, calidad del aire y clima (Giorgi, 2007). Con el estudio de Casillas (2009) se ubicaron la ocurrencia de la ICU en la parte norte de la ciudad de Mexicali y la zona oriente con un diferencial térmico de 10 y 12 centígrados respectivamente, en contraste con sus alrededores.

Los intercambios de superficie-atmósfera afectan la partición del flujo de energía, lo que resulta en climas locales variables, de tal manera que los habitantes urbanos

experimentan una variedad de climas en diferentes partes de la ciudad en diferentes momentos del día (Balogun et al, 2009;. Coutts, Beringer, y Tapper, 2007; Coutts, Beringer, y Tapper, 2010; Grimmond et al, 2010;. Hart & Sailor, 2009; Xu, Wooster, y Grimmond, 2008). El primer estudio de balance de energía fue realizado por Oke et al. (1992) en una zona residencial / comercial / industrial mixta en el distrito de Tacubaya de la Ciudad de México. Los resultados mostraron una considerable similitud con las de las zonas residenciales en ciudades con climas templados, incluyendo la razón de Bowen ( $\beta = Q_H / Q_E$ ), que era un poco mayor que la unidad. Una debilidad subyacente en el estudio Tacubaya fue el hecho de que sólo la radiación neta ( $Q^*$ ) y el flujo turbulento de calor sensible ( $Q_H$ ) se midieron directamente, dejando el flujo evaporativo ( $Q_E$ ) como el residual en el balance energético y parametrizar las estimaciones del almacenamiento de calor sensible en los materiales urbanos ( $\Delta Q_S$ ). Masson (2006) describe los principales impactos de la urbanización en el balance local de energía superficial causadas por la forma tridimensional heterogénea del dosel urbano. En primer lugar la captura de la radiación en el dosel urbano ( $Q^*$ ), en segundo lugar la absorción y almacenamiento de calor durante el día ( $\Delta Q_S$ ), debido a las propiedades térmicas de los materiales de construcción y las características de las superficies urbanas, la generación de un flujo de calor turbulento positivo a la atmósfera por la noche ( $Q_H$ ), la cuarta modificación es la de favorecer al calor sensible mediante el intercambio de calor latente lo cual no es posible en zonas densamente urbanas y con poca vegetación ( $Q_E$ ). Por último, la posibilidad de grandes flujos de calor antropogénico ( $Q_F$ ). Este estudio demuestra que la cobertura de la tierra urbana y el uso del agua se entrelazan de manera, lo que sugiere que la planificación urbana del uso del suelo y la gestión del agua deben integrarse plenamente al diseñar ciudades que pueden albergar el futuro crecimiento de la población, el desarrollo y reducir al mínimo los impactos negativos del cambio climático (House-Peters y Heejun, 2011).

La división de la radiación neta en los flujos turbulentos de calor y de la humedad es un factor determinante del tiempo atmosférico y el clima de la región. La división de estos flujos son determinados por los atributos físicos de la superficie, incluyendo la cubierta vegetal y el tipo, así como las propiedades del suelo, en particular, el contenido de humedad del suelo. En las regiones desérticas, donde la humedad del suelo es limitado y la cubierta vegetal es escasa y/o seca, dominará el flujo de calor sensible. En los resultados del estudio de Sturman y McGowan (2009) destaca la arcilla como fuente importante de calor sensible en paisajes desérticos.

Este estudio se centra en identificar y cuantificar la aportación energética del poliestireno expandido impermeabilizado con pintura elastomérica hacia la atmósfera, en días calurosos y despejados de verano, analizar la influencia de la proximidad de unidades de aire acondicionado y su relación con las afectaciones energéticas antropogénicas y confort humano.

## **LUGAR DE ESTUDIO**

La ciudad de Mexicali, ubicada al noreste de Baja California, México (32° 33' N, 115° 28' W, y una altitud de 4 metros sobre el nivel del mar), cuenta con un clima seco y árido, con veranos muy calurosos e inviernos fríos. Es una de las ciudades más cálidas de México, con un promedio de temperaturas máximas en julio de 42,2 ° C y en enero temperaturas máximas promedio de alrededor de 21 ° C, recibe el 90% de las horas de máximo potencial de la luz solar cada año. En promedio, Mexicali recibe alrededor de 75 mm de lluvia al año. El 28 de julio de 1995, alcanzó su máximo histórico de 52 ° C (García-Cueto y Santillán, 2012).

## METODOLOGÍA

El arreglo experimental se ubicó en las instalaciones del Instituto de Ingeniería Campus Mexicali, sobre la cubierta a una altura de 8.50 m., y a 1.25 m., sobre la misma, todo esto dentro de la capa de dosel urbano (capa rugosa). Se construyó una caja de madera cuyas dimensiones fueron de 1 m x 1 m, con 0.55 m de profundidad, que fue completamente llena de suelo desnudo (arcilla). Se colocó un espécimen de concreto de 0.1 m de espesor y sobre éste, poliestireno expandido impermeabilizado con pintura elastómera de espesor 0.050 m (este tipo de cubierta es el arreglo típico losa-poliestireno-impermeabilizado). El equipo de balance energético y radiativo fue colocado a 20 cm de altura de tal manera que su campo de visión abarcó el área activa hacia los sensores como se muestra en el esquema (Figura 1). Mediante mediciones previas se estableció que a esta altura se obtienen las mediciones que corresponden a la cobertura ubicada sobre el arreglo experimental.



**Figura 1. Esquema del arreglo experimental losa de concreto poliestireno impermeabilizado.**

Se realizó la campaña de medición en un ciclo de 48 horas para posteriormente obtener un ciclo promediado de 24. El modelo utilizado en este estudio, es un balance en el sistema superficie-atmósfera, formulado de acuerdo a la primera ley de la termodinámica (conservación de la energía), con la que es posible identificar los cinco tipos de flujos energéticos: la radiación neta ( $Q^*$ ), el flujo de calor sensible ( $Q_H$ ), flujo de calor latente ( $Q_E$ ), flujo neto de calor en el suelo ( $Q_G$ ), flujo de calor antrópico ( $Q_A$ ) y el flujo de calor advectivo ( $Q_D$ ).

Este balance de energía superficial se puede escribir como:

$$Q^* = Q_H + Q_E + Q_G + Q_A + Q_D$$

Donde,  $Q^*$  es el resultado de la diferencia entre la radiación solar global ( $Q_S$ ) y la radiación reflejada y emitida por la superficie ( $Q_R$ ), por lo que:  $Q^* = Q_S - Q_R$  (radiación neta); flujo de calor sensible,  $Q_H$ , se refiere al intercambio turbulento de calor entre la superficie y la atmósfera, originado por la diferencia térmica entre los dos medios; el flujo de calor latente,  $Q_E$ , ó flujo de vapor de agua, es el intercambio turbulento de calor, por procesos evapotranspirativos (ó de condensación) entre la superficie y la atmósfera,  $Q_G$ , es el flujo de calor al suelo o medio superficial, el flujo de calor antrópico,  $Q_A$ , es el flujo de calor generado por la actividad humana y; el flujo de calor advectivo,  $Q_D$ , es el flujo de calor transportado horizontalmente.

El método de la razón de Bowen ( $\beta$ ), se aplicó a los flujos de calor turbulento sensible y latente, para determinar el flujo predominante. Esta se define como la razón entre el flujo de calor sensible y el flujo de calor latente sobre una superficie:

$$\beta = Q_H / Q_E$$

$\beta$  es más pequeño para superficies húmedas, donde hay mayor energía para la evaporación, y más grande para superficies secas.

### MATERIAL Y CONDICIONES ATMOSFÉRICAS

Se experimentó con poliestireno expandido impermeabilizado con pintura elastomérica, PPE (este corresponde a un sistema típico para aislamiento e impermeabilizado de viviendas, comercios y edificios). Los días 18 - 20 de Agosto de 2011, las condiciones meteorológicas promedios prevalentes fueron: temperatura del aire de 33 ° C, humedad relativa de 36% y velocidad del viento 0.33 ms<sup>-1</sup>.

### Equipo

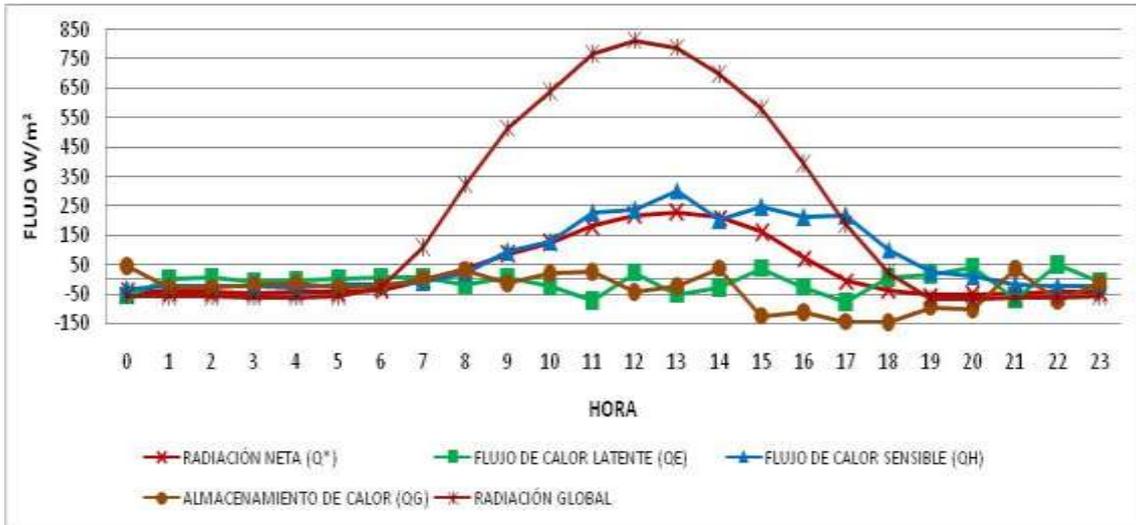
El equipo utilizado se describe en la Tabla 1.

**Tabla 1. Equipo utilizado en la experimentación.**

NOMBRE	COMPañÍA	MEDICIÓN	UNIDAD
NR01, four component net radiation sensor	Campbell Scientific	Radiación global, radiación neta, albedo	Wm <sup>-2</sup> (radiación), adimensional (albedo)
CSAT3, anemómetro sónico tridimensional	Campbell Scientific	Velocidad y dirección del viento	ms <sup>-1</sup> , grados
KH20, higrómetro de Kriptón	Campbell Scientific	Densidad de vapor de agua en la atmósfera	gm <sup>-3</sup>
Sonda HMP45	Campbell Scientific	Temperatura del aire y humedad relativa	°C (temperatura), % (humedad relativa)
SI-111, radiómetro termómetro infrarrojo	Campbell Scientific	Temperatura de superficie	° C

### RESULTADOS

En la campaña realizada sobre el poliestireno expandido impermeabilizado con pintura elastomérica (PPE), el  $Q_H$  (flujo de calor sensible) resultó predominante, mientras que el  $Q_E$  (flujo de calor latente) y  $Q_G$  (almacenamiento de calor) fueron insignificantes, el comportamiento del PPE por ser una superficie seca y debido a que no almacena calor dada su característica aislante, no presentó un comportamiento relevante en la gráfica de balance para los flujos antes mencionados (Figura 2). El flujo de calor sensible resultó el flujo más significativo, rebasando la cantidad de energía disponible desde las 11 horas hasta las 20 horas. Puede observarse que el flujo de calor sensible rebasa la radiación neta en varias horas del ciclo diario.



**Figura 2. Flujos promedio poliestireno expandido impermeabilizado con pintura elastomérica, condiciones despejadas, verano 2011**

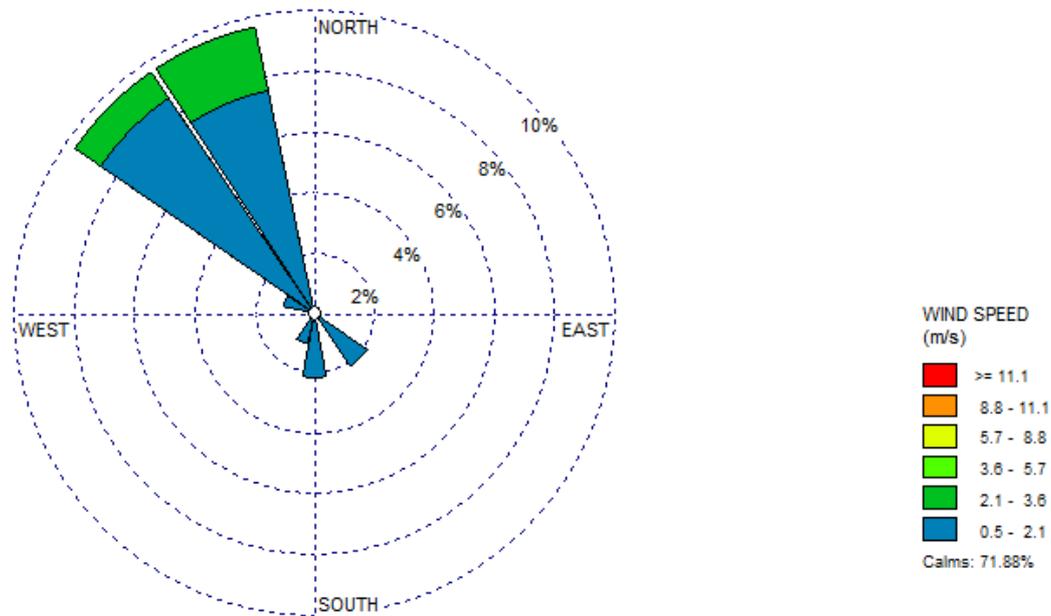
De la figura anterior puede deducirse que el modelo propuesto  $Q^* = Q_H + Q_E + Q_G + Q_A + Q_D$  se reduce a  $Q^* = Q_H + Q_A + Q_D$ . Se atribuye el flujo adicional ( $Q_A + Q_D$ ) a la influencia del calor antropogénico y calor advectivo proveniente de los equipos de aire acondicionado, que precisamente están ubicados en la zona noroeste respecto al lugar de experimentación, 18 equipos que suman 90 toneladas aproximadamente.

El flujo de calor sensible llega a su máximo alrededor de las 13 horas con  $300 \text{ Wm}^{-2}$ , contrastando con los  $250 \text{ Wm}^{-2}$  de la radiación neta.



**Figura 3. Ubicación del experimento y equipos de aire acondicionado.**

La Figura 3 muestran la ubicación del experimento y de los equipos de aire acondicionado (ubicados en el cuadrante noroeste), estos están ubicados sobre toda la cubierta del edificio, al analizar las componentes horizontales del viento resultó que éste proviene del noroeste, coincidiendo con la ubicación de los equipos (Figura 4).



**Figura 4. Rosa de los vientos, 18 – 20 de Agosto 2011**

**Tabla 2. Resultados promediados a un ciclo de 24 horas.**

Variable	PPE
<b>Material</b>	
Radiación neta ( $Wm^{-2}$ )	31.41
Flujo Calor Sensible ( $Wm^{-2}$ )	74.9
Flujo Calor Latente ( $Wm^{-2}$ )	9.51
Almacenamiento de Calor ( $Wm^{-2}$ )	-53
Temperatura de superficie ( $^{\circ}C$ )	33.35
Albedo	0.67
Razón de Bowen ( $\beta$ )	7.88

En la Tabla 2 se muestran los resultados cuantitativos para el PPE, el flujo promedio de calor sensible con  $74.9 Wm^{-2}$ , y en el que presumiblemente van sumados los flujos de calor antropogénico y advectivo, rebasa a la radiación neta la cual promedió  $31.41 W/m^2$ . El promedio de  $Q_E$  refleja un valor muy pequeño y por otra parte, el almacenamiento  $Q_G$  muestra un valor que acumula la diferencia para cerrar el balance. El albedo tiene un valor de 0.67, como resultado de sus características reflectiva y aislante. La razón de Bowen ( $\beta$ ) es mayor a la unidad lo que indica ser una superficie seca.

### COMENTARIOS FINALES Y RECOMENDACIONES

El trabajo presentado nos permite conocer el comportamiento y la magnitud de cada uno de los flujos de energía involucrado en el balance de este material de cobertura urbana. Se concluye que esta superficie aporta toda la energía disponible para

calentar el aire circundante. Se identificó la presencia del calor antropogénico como una fuente importante de calor adicional que podría resultar en más carga térmica al medio ambiente de los alrededores.

El poliestireno expandido impermeabilizado con pintura elastomérica (PPE) cumple el propósito de aislar y proteger las cubiertas, sin embargo debido a la cantidad de calor sensible que genera y que repercute en la temperatura de los alrededores, será importante considerarlo al momento de tomar decisiones en cuanto a ubicación de los equipos de aire acondicionado sobre los techos, ya que los equipos estarían funcionando con aire afectado térmicamente, y por ende, el consumo de energía eléctrica será mayor. Esto deja abierta la línea de investigación para una futura etapa en que se pueda monitorear el consumo sin esta influencia térmica identificada en este trabajo.

Posterior a este trabajo, se realizarán campañas in situ en fraccionamientos habitacionales con techos blancos para ser comparados con fraccionamientos con techos de color marrón, de esta forma se realizará un comparativo del balance de flujos de energía.

A la fecha se han podido detectar espacios afectados por el efecto de la Isla de Calor Urbano, seguramente la ciudad no dejará de crecer y si no se tiene el conocimiento adecuado sobre los materiales utilizados las afectaciones estarán creciendo proporcionalmente al desarrollo urbano.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Balogun, A. A., Adegoke, J. O., Vezhapparambu, S., Mauder, M., McFadden, J. P., & Gallo, K. (2009). Surface energy balance measurements above an exurban residential neighborhood of Kansas City, Missouri. *Boundary-Layer Meteorology*, 133,299–321. doi:10.1007/s10546-009-9421-3
2. Casillas H. A. (2009). Climatología de la isla urbana de calor en Mexicali, B.C., y su relación con el uso del suelo. Tesis de Maestría en Ciencias, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California.
3. Coutts, A. M., Beringer, J., & Tapper, N. J. (2007). Impact of increasing urban density on local climate: Spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia. *Journal of Applied Meteorology Climatology*, 46, 477–493. doi:10.1175/JAM2462.1
4. Coutts, A., Beringer, J., & Tapper, N. (2010). Changing urban climate and CO2 emissions: Implications for the development of policies for sustainable cities. *Urban Policy and Research*, 28(1), 27–47. doi:10.1080/08111140903437716
5. Giorgi F, Meleux F. (2007). Modeling the regional effects of climate on air quality. Elsevier, ScienceDirect, C. R. Geoscience 339, pp. 721-733.
6. García C.O.R., Santillán S.N. (2012). Modeling Extreme Climate Events: Two Case Studies in México. *Climate Models*, INTECH, Rijeka, Croatia ISBN: 979-953-307-338-4. 2012.
7. Grimmond, C. S. B, Blackett, M., Best, M. J., Barlow, J., Baik, J.-J., Belcher, E., et al.(2010). The international urban energy balance models comparison project: First results from phase 1. *Journal of Applied Meteorology Climatology*, 49, 1268–1292. doi:10.1175/2010JAMC2354.1

8. Hart, M. A., & Sailor, D. J. (2009). Quantifying the influence of land-use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology*, 95, 397–406. doi:10.1007/s00704-008-0017-5
9. House-Peters, Lily A., Chang, Heejun. 2011. Modeling the impact of land use and climate change on neighborhood-scale evaporation and nighttime cooling: A surface energy balance approach. *Landscape and Urban Planning*.
10. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010
11. Kato Souchi, Yamaguchi Yasushi. 2005. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux. *Remote sensing of environment*, 99: 44-54.
12. Masson, V. (2006). Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities. *Theoretical and Applied Climatology*, 84, 35–45. doi:10.1007/s00704-005-0142-3
13. Naruma, D., Kondo, A., Shimoda, Y., 2009b. The effect of the increase in urban temperature on the concentration of photochemical oxidants. *Atmospheric Environment*, in press, doi:10.1016/j.atmosenv.2009.01.028.
14. Naruma, D., Shimoda, Y., Mizuno, M., 2009a. Effect of temperature change upon the regional electric power consumption. *Applied Energy*, in press
15. Oke, T.R., Zeuner, G., Jauregui, E., 1992. The surface energy balance in Mexico City. *Atmospheric Environment* 26B, 433-444.
16. Shimoda, Y., Narumi, D., Mizuno, M., 2005. Environmental impact of urban heat island phenomena—cause-effect chain and evaluation in Osaka City. *Journal of Life Cycle Assessment*, 144–148.
17. Sturman, A.P., McGowan, H.A. 2009. Observations of dry season surface energy exchanges over a desert clay pan, Queensland, Australia. *Journal of Arid Environments*.
18. Xu, W., Wooster, M. J., & Grimmond, C. S. B. (2008). Modelling of urban sensible heat flux at multiple scales: A demonstration using airborne hyperspectral imagery of Shanghai and a temperature-emissivity separation approach. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3493–3510. doi:10.1016/j.rse.2008.04.009