

BALANCES DE ENERGÍA ASOCIADOS A LOS CAMBIOS DE COBERTURA EN LA ZONA ANDINA COLOMBIANA

Victor Hugo Ramírez-Builes* Álvaro Jaramillo-Robledo**

RESUMEN

RAMÍREZ B., V.H.; JARAMILLO R., A. Balances de energía asociados a los cambios de cobertura en la zona andina colombiana. Cenicafé 60 (3):199-209. 2009

En este estudio se hace un análisis sobre los cambios en los componentes del balance de energía en tres coberturas tipo de la zona Andina de Colombia (bosque, café y pasto), con el fin de cuantificar los aumentos potenciales de la cantidad de energía empleada para calentar el aire como flujos de calor sensible y disminuciones en la energía empleada en la evapotranspiración e intercambio de vapor de agua como flujo de calor latente. La fase de campo de la investigación se realizó en una zona de vida de bosque muy húmedo premontano ubicada a 1.600 de altitud, en donde se tomaron medidas simultáneas de variables edáficas y fisiológicas en las tres coberturas e información meteorológica diaria, y se aplicaron métodos empíricos para estimar los componentes del balance de energía para cada cobertura. Se observa que hay modificaciones en la cantidad de radiación neta en cada una de las tres coberturas debido al cambio en el albedo superficial, al aumento del flujo de calor sensible y a la disminución en el flujo de calor latente en la cobertura de pasto, e igualmente cambios en la relación de *Bowen*, lo que indica mayor cantidad de energía disponible para calentar el aire y menor cantidad de energía disponible para el intercambio gaseoso.

Palabras clave: Flujo de calor latente, flujo de calor sensible, relación de *Bowen*, café, bosque, pasto.

ABSTRACT

In this study, an analysis of changes in energy balance components in three soil vegetal covers of the Colombian Andean zone (forest, coffee and grass) was carried out in order to quantify the potential increases of energy amount used to heat air such as sensible heat fluxes and decreases in energy used in evapotranspiration and water vapor exchange as latent heat flux. The field phase of the research was conducted in a premontane moist forest life area located at 1,600 masl where simultaneous measurements of edaphic and physiological variables in the three covers and daily weather information were taken. Empirical methods were used to estimate the energy balance components for each cover. Modifications in the net radiation amount in each of the three covers due to the change in the superficial albedo, to sensible heat flux increase and to latent heat flux decrease in the grass cover, as well as to changes in the Bowen ratio were observed, which indicates a greater amount of energy available to heat the air and less energy available for gas exchange.

Keywords: Latent heat flux, sensible heat flux, Bowen ratio, coffee, forest, grass.

* Asistente de Investigación. Fitotecnía. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

** Investigador Científico III. Agroclimatología. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

La transformación de ecosistemas tropicales a cultivos anuales y pasturas, inevitablemente genera diversos impactos en los ecosistemas, los cuales se ven reflejados en modificaciones de la flora, la fauna acuática y terrestre, cambios en las características físico-químicas y biológicas del suelo y las aguas superficiales, y en términos generales, en los ciclos biogeoquímicos (11, 23).

Los departamentos de Caldas, Quindío y Risaralda reportan un área aproximada de 396.555 ha en pastos, que corresponde al 15% del área total, siendo mayor que la destinada a bosque, que es de 341.233 ha, y a las destinadas al cultivo de café bajo sombra, con 236.489 ha (4). Estos cambios de cobertura vegetal y de uso del suelo en la región generan cambios significativos en el microclima, especialmente en el balance de energía y en el balance hídrico. Ramírez y Jaramillo (19) reportan variaciones en los componentes del ciclo hidrológico, debido a los cambios de uso del suelo de bosque a cafetal y de cafetal a pasto; en condiciones de bosque muy húmedo premontano (bmh-PM) de acuerdo a la clasificación de Holdridge (El Jazmín, Santa Rosa de Cabal, Risaralda), dentro de los cambios más significativos reportados en el citado estudio se resaltan los aumentos en las tasas de percolación y escorrentía, y la disminución de las tasas de evaporación del agua almacenada en el dosel, asociados a la disminución en la interceptación de la lluvia.

Para condiciones de montaña tropical andina, bosque muy húmedo premontano (bmh-PM), registradas en El Jazmín (Santa Rosa de Cabal, Risaralda), los cambios en la redistribución de la lluvia por modificación del uso del suelo se hacen especialmente críticos con la ocurrencia de La Niña-Oscilación del Sur. Bajo la ocurrencia de La Niña de 1999/2000, en la cobertura de pasto los excesos hídricos fueron mayores en

42% que en la cobertura de cafetal y 27% que en la cobertura de bosque (20).

El balance de energía es útil para establecer la proporción de la radiación neta (R_n) que se emplea en el calentamiento del aire como flujo de calor sensible (H), en la evapotranspiración como flujo de calor latente (λE) y en el calentamiento del suelo como flujo del calor del suelo (G). Cuando se cambia una cobertura vegetal se altera el albedo superficial y, por ende, el balance de energía (9, 12, 27). Cuando se modifican los componentes del balance de energía se afecta la temperatura superficial y la estructura de la capa límite de la atmósfera. Como lo plantean Pielke *et al.* (15) la agricultura hace parte del sistema climático y, por lo tanto, el cambio en el uso del suelo se convierte en uno de los sistemas internos forzantes de dicho cambio.

Actualmente, se requieren estudios que evalúen el efecto del cambio de cobertura y uso del suelo, sobre las modificaciones en los componentes del balance de energía y en consecuencia sobre el microclima y el mesoclima. Es así como el presente trabajo tiene como objetivo valorar los cambios en los componentes del balance de energía asociados al cambio de uso del suelo en una localidad de la zona Andina de Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se realizó en predios del campus Universitario El Jazmín, de la Corporación Universitaria Santa Rosa de Cabal-UNISARC, ubicado sobre la vertiente Occidental de la cordillera Central colombiana, a 04° 55' Norte y 75° 38' Oeste, a 1.600 m.s.n.m., con 2.596 de precipitación y un patrón de distribución bimodal, temperatura media de 19,4°C, temperatura mínima de 15,4°C y temperatura máxima de 24,6°C,

brillo solar de 3,9 h.día⁻¹ y 230,8 cal.cm⁻²día⁻¹ equivalentes a 112 W.m⁻² de radiación (16).

Las observaciones se realizaron entre octubre de 2003 y diciembre de 2004; a nivel diario se registró la información meteorológica, a nivel semanal los registros de humedad del suelo de manera simultánea para cada cobertura, y registros de altura del pasto para el cálculo del índice de área foliar de acuerdo con la metodología descrita por Allen *et al.*(1). Al inicio y al final del estudio se midieron los porcentajes de cobertura e índice de área foliar en café y bosque empleando la metodología de fotografía del dosel (19).

Los suelos predominantes son derivados de cenizas volcánicas. De acuerdo con Suárez (25) se clasifican como Andisoles, con profundidades del horizonte A superiores a 20 cm, con altos contenidos de materia orgánica, bajos contenidos de bases intercambiables, ácidos, con alta capacidad de infiltración y alta retención de humedad.

Parcelas de observación. Las parcelas de observación estuvieron conformadas por:

- Un lote de café (*Coffea arabica* L.) variedad Colombia, sembrado a 2 m x 2 m, con ocho años de edad y con una pendiente del terreno de 15%.
- Un lote de pasto estrella (*Cynodon nlemfluencis*) de ocho años, asociado con añil rastrero y una pendiente del terreno de 17%.
- Un lote con bosque mixto de diez años y con 0% de pendiente

Las variables consideradas en el estudio para cada cobertura fueron: la radiación neta, el flujo de calor latente, flujo de calor sensible, flujo de calor del suelo, resistencia

aerodinámica y resistencia superficial, y relación entre modelos para estimar el flujo de calor sensible, cada una de ellas se explica en detalle a partir del balance de energía.

Balance de energía. La radiación neta es la diferencia entre la radiación solar entrante y la saliente, tanto de onda corta como de onda larga. El balance de energía dentro del cultivo permite conocer de qué manera las plantas o el suelo utilizan y distribuyen la radiación neta en sus diferentes componentes. El balance de energía se puede expresar mediante la Ecuación <<1>> (7, 22):

$$R_n = \lambda E + H + G + P + M \quad \langle\langle 1 \rangle\rangle$$

En donde:

R_n , radiación neta; λE , flujo de calor latente empleado en evaporar el agua (λ , calor latente de evaporación, E es la cantidad de agua evaporada); H , flujo de calor sensible, utilizado en calentar el aire; G , flujo de calor en el suelo; P , fotosíntesis; M , otros intercambios de energía (actividad metabólica y almacenamiento de calor en los tejidos de la planta). Los valores de P y M son muy bajos con relación a los otros y dentro de este estudio no se cuantificaron.

Los flujos de calor latente se estimaron a partir de dos modelos: i) el modelo general de Penman-Monteith y ii) el modelo de la relación de Bowen, los cuales se describen en detalle a continuación:

Modelo general de Penman-Monteith (PMo).

El modelo general de Penman-Monteith integra la energía disponible en la atmósfera, la cantidad de vapor de agua presente y las características fisiológicas y aerodinámicas de la cobertura vegetal, expresado según Allen *et al.* (1) en la Ecuación <<2>>:

$$\lambda E = \frac{\Delta (R_n - G) + p_a C_p \frac{DPV}{r_a}}{\Delta \gamma \left[1 + \frac{r_s}{r_a} \right]} \quad \langle\langle 2 \rangle\rangle$$

En donde:

λE , flujo de calor latente (W.m^{-2}); R_n , radiación neta (W.m^{-2}); G , flujo de calor del suelo (W.m^{-2}); ρ_a , densidad del aire (kg.m^{-3}); C_p , calor específico del aire ($\text{J.kg}^{-1}.\text{C}^{-1}$); DPV , déficit de presión de vapor (kPa); Δ , pendiente de la curva de presión de vapor a saturación ($\text{kPa}.\text{C}^{-1}$) a la temperatura del aire; γ , constante psicrométrica ($\text{kPa}.\text{C}^{-1}$); r_s , resistencia superficial al transporte de vapor (s.m^{-1}); r_a , resistencia aerodinámica (s.m^{-1}).

La resistencia aerodinámica (r_a), describe la resistencia al transporte de calor y de vapor de agua desde la superficie evaporante al aire sobre el dosel, y se estima empleando la Ecuación de Perrier (Ecuación <<3>>), descrita por Allen *et al.*(1) y Alves *et al.* (2).

$$r_a = \frac{\text{Ln} \left[\frac{Z_m - d}{Z_{om}} \right] \text{Ln} \left[\frac{Z_h - d}{Z_{oh}} \right]}{k^2 u_z} \quad \ll 3 \gg$$

En donde:

Z_m , altura de medida de la velocidad del viento (m); z_h , altura a la que se mide la humedad atmosférica (m); d , desplazamiento del plano cero (m) que es igual a $2/3h$ (h es la altura del cultivo); Z_{om} , longitud de la rugosidad (m), que es función del momento de transferencia igual a $0,123h$; Z_{oh} , longitud de la rugosidad (m), que es una función de la longitud de la transferencia de calor y vapor e igual a $0,10Z_{om}$; k , es la constante de von Karman igual a $0,41$; u_z (m.s^{-1}), velocidad del viento medida a la altura Z .

En la Tabla 1 se presenta los parámetros estimados para la r_a .

En la zona de estudio, durante el año, los valores de la velocidad del viento en la mayoría de los casos, son cercanos a cero. Para efectos de comparación se consideró un valor promedio para la región de 2,0

m.s^{-1} y un valor para condiciones de viento en calma, más frecuentes en la zona de estudio, de $0,01 \text{ m.s}^{-1}$.

La resistencia superficial (r_s) describe la resistencia al flujo del vapor de agua a través de las hojas del cultivo y la evaporación de la superficie del suelo; esta resistencia tiene en cuenta factores de la planta como son la resistencia estomática y el índice de área foliar. Szeicz y Long (26) propusieron la Ecuación <<4>> para estimar r_s , que puede ser empleada cuando la evaporación del suelo es mínima y cuando la resistencia superficial del cultivo está muy cerca de la resistencia de todas las hojas cuando se considera una distribución en paralelo. En cultivos, con doseles completamente desarrollados, las hojas inferiores no reciben suficiente radiación solar que permita abrir sus estomas de igual manera que las hojas que se encuentran en la parte superior de la planta, por lo tanto, la contribución de las hojas a la transpiración es menor, para lo cual hubo necesidad de desarrollar el concepto de Índice de Área Foliar efectivo ($IAF_{efectivo}$) (1):

$$r_s = \frac{r_L}{IAF_{efectivo}} \quad \ll 4 \gg$$

En donde:

r_s , resistencia superficial (s.m^{-1}); $IAF_{efectivo}$ es igual a 0,5 el Índice de Área Foliar (m^2 de hojas por m^2 de suelo); r_L , resistencia estomática que es igual al promedio de la resistencia de todas las hojas bien iluminadas (s.m^{-1}).

Para el presente estudio se consideró la información publicada de resistencia estomática (r_L). El Índice de Área Foliar para las coberturas de bosque y cafetal y para el pasto, se estimó empleando el método propuesto por FAO-56 (1). De igual manera la r_s se estimó por el método propuesto por

Tabla 1. Parámetros considerados para la estimación de la resistencia aerodinámica (m).

Cobertura	h^*	Zm^{**}	d^{***}	Zom^{****}	Zoh^{*****}
Bosque	5,0	6,8	3,33	0,615	0,062
Cafetal	1,6	3,4	1,06	0,196	0,026
Pasto	0,2	2,0	0,13	0,025	0,002

* es la altura del cultivo en m, ** altura de medida de la velocidad del viento

*** desplazamiento del plano cero (m) y es igual a $2/3h$

**** longitud de la rugosidad que es función del momento de transferencia = $0,123h$

***** Zoh , longitud de la rugosidad que es función de la transferencia de calor y vapor = $0,10Zom$

Ortega-Farías *et al.* (13), por medio de la Ecuación <<5>>.

$$r_s = \frac{\rho_a c_p \cdot DPV}{\Delta \cdot (R_n - G)} \cdot \frac{\theta_{cc} - \theta_{pmp}}{\theta_i - \theta_{pmp}} \quad \langle\langle 5 \rangle\rangle$$

En donde:

θ_{cc} y θ_{pmp} son la humedad volumétrica del suelo a capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, respectivamente; θ_i es la humedad medida en la zona de raíces durante el estudio a nivel semanal.

La radiación neta (R_n) se estimó a partir de la Ecuación <<6>>, de balance de radiación.

$$R_n = \left[R_a (0,26 + 0,506) \frac{n}{N} (1 - \alpha) \right] - \lambda T^4 \left[0,56 - 0,079 \sqrt{e_a} \left[0,1 + 0,9 \frac{n}{N} \right] \right] \quad \langle\langle 6 \rangle\rangle$$

En donde:

R_a , es la radiación astronómica posible ($W \cdot m^{-2}$); n , brillo solar observado (h); N , brillo solar astronómicamente posible (h); λT^4 , constante de Stefan-Boltzman ($W \cdot m^{-2}$); e_a , tensión de vapor actual (mb). Los valores de a y b ($a=0,26$, $b=0,506$) son los estimados por Gómez y Guzmán (6) para zona cafetera Colombia.

La radiación astronómica se estimó de la siguiente manera (Ecuaciones <<7>>, <<8>>, <<9>> y <<10>>):

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} \cdot dr \left[\omega s \cdot \text{Sen}(\varphi) \text{Sen}(\delta) + \text{Cos}(\varphi) \text{Sen}(\omega s) \right] \quad \langle\langle 7 \rangle\rangle$$

En donde:

R_a , es la Radiación astronómica ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$); G_{sc} , constante solar que es igual a $0,0820 MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$; dr , es el inverso de la distancia relativa del sol a la tierra; ωs , ángulo de la puesta del sol (radianes); φ , latitud (radianes); δ , es la declinación solar (radianes).

$$dr = 1 + 0,033 \text{Cos} \left[\frac{2\pi}{365} J \right] \quad \langle\langle 8 \rangle\rangle$$

$$\delta = 0,409 \text{Sen} \left[\frac{2\pi}{365} J - 139 \right] \quad \langle\langle 9 \rangle\rangle$$

En donde:

J es el número del día del año (1 a 365).

El ángulo de la puesta de sol se estimó así:

$$\omega s = \ar \text{Cos} \left[-\tan(\varphi) \tan(\delta) \right] \quad \langle\langle 10 \rangle\rangle$$

El brillo solar astronómico posible (N) está directamente relacionado con el ángulo de la puesta del sol (ω_s), y se calculó mediante la Ecuación <<11>>:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad \text{<<11>>}$$

Los flujos del calor de suelo para cafetal y bosque se tomaron de los estudios de Jaramillo y Escobar (8), para la zona en donde $G = 0,03Rn$, y para pasto $G = 0,1 * Rn$ de acuerdo con Allen *et al.* (1).

Modelo de la relación de Bowen (β). El segundo modelo para el cálculo de los flujos de calor sensible (λE) en el balance de energía es el modelo de la relación de Bowen (β), se presenta en la Ecuación <<12>>.

$$\lambda E = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad \text{<<12>>}$$

La relación de Bowen es la proporción entre la energía utilizada para calentar el aire y la que se emplea en evapotranspiración ($\beta = H/\lambda E$). La relación de Bowen permite calcular y conocer las pérdidas de calor sensible (H), proceso que regula la temperatura de la hoja. Si no hay limitaciones en el suministro de agua por parte del suelo al cultivo, la relación de Bowen es baja; si los estomas de las hojas se cierran para evitar la pérdida de agua, la relación de Bowen es infinita. Cuando la relación de Bowen es menor que 1,0 gran parte de la energía disponible en la superficie del cultivo está pasando a la atmósfera como flujo de calor latente (vapor de agua).

Si la relación de Bowen es muy baja o su valor es cero, indica que la temperatura de la hoja es igual o casi igual a la temperatura del aire próximo. Cuando la relación de Bowen es negativa, significa que el agua que sale de las hojas por transpiración enfría

el aire circundante y la temperatura del aire es menor que la temperatura de la hoja por pérdidas de calor, con una ganancia de calor y no una pérdida.

Pérez *et al.* (14) proponen un modelo simple para estimar la relación de Bowen (β), con base en las características climáticas por medio de las resistencias climáticas superficiales. El modelo se expresa de la siguiente manera (Ecuación <<13>>):

$$\beta = \frac{\Delta + \gamma}{\Delta} \cdot \frac{I + S}{I + C} - 1 \quad \text{<<13>>}$$

$$C = \frac{\gamma \cdot r_i}{\Delta \cdot r_a} \quad \text{<<14>>}$$

$$S = \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{r_c}{r_a} \quad \text{<<15>>}$$

En donde:

r_c es la resistencia del dosel ($s.m^{-1}$) y es similar a la resistencia superficial (r_s); r_a es la resistencia aerodinámica ($s.m^{-1}$); r_i es la resistencia climática, que de acuerdo con Monteith (10), se puede expresar con la Ecuación <<16>>.

$$r_i = \frac{\rho_a C_p \cdot DPV}{\gamma (R_n - G)} \quad \text{<<16>>}$$

Los flujos de calor sensible (H) se calcularon de la siguiente manera (Ecuación <<17>>):

$$H = \frac{\beta (R_n - G)}{1 + \beta} \quad \text{<<17>>}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resistencia superficial. En la Tabla 2, se presentan los resultados de la resistencia superficial (r_s) estimados por los métodos

Tabla 2. Valores de Índice de Área foliar (*IAF*), albedo, resistencias aerodinámica (r_a), estomática (r_L) y superficial (r_s) ($s.m^{-1}$), para tres coberturas de la zona andina colombiana.

Cobertura	<i>IAF</i> * ($m^2.m^{-2}$)	Albedo**	r_a	r_L ***	r_s ****	r_s *****
Pasto	4,8	0,20	41,3/ u *****	100	41,7	39,0
Café	4,5	0,16	70,2/ u	150	66,7	66,4
Bosque	5,5	0,15	41,3/ u	150	54,5	48,1

- * $IAF = (24 * \text{Altura})$ para pasto, FAO-56 Allen et al. (1). En café y bosque medidos en este estudio.
 ** Valores tomados de Ramírez y Goyal (18).
 *** Tomados de: Allen et al. (1), Angelocci et al. (3) y Alves et al. (2).
 **** Calculado a partir de la Ecuación <<4>>. FAO-56 Allen et al. (1).
 ***** Estimados a partir del modelo propuesto por Ortega-Faria et al. (13), a partir de las lecturas de humedad de suelo y del balance de radiación (θ_v entre 0,60-0,41 $cm^3.cm^{-3}$; R_n entre 170-56 $w.m^{-2}$; DPV entre 0,94-0,059 Kpa; $u = 2 m.s^{-1}$). Ecuación <<5>>
 ***** u : es la velocidad del viento en $m.s^{-1}$.

propuestos por Allen et al. (1) expresado en la Ecuación <<4>> y el método propuesto por Ortega-Faria et al. (13) descrito en la Ecuación <<5>>, para los cultivos de pasto, café y bosque.

El método propuesto en la Ecuación <<4>>, es útil especialmente cuando los Índices de Área Foliar (*IAF*) son mayores a 1,0 (5, 10, 18). Como los *IAF* y r_L son difíciles de medir en el campo, y sus equipos son costosos, el método de Ortega-Faria et al. (13) puede emplearse incluso en condiciones de estrés hídrico y con valores de *IAF* mayores a 1,0 $m^2.m^{-2}$ (17).

En este estudio los valores estimados de r_s para pasto, café completamente desarrollado y bosque, fueron de 39,0 $s.m^{-1}$, 66,4 $s.m^{-1}$ y 48,1 $s.m^{-1}$, respectivamente. En la Tabla 2 se presentan los valores promedio de resistencia aerodinámica (r_a), resistencia estomática (r_L), *IAF* y albedo. Los datos de resistencia superficial presentados en este estudio se constituyen en el primer reporte para la región.

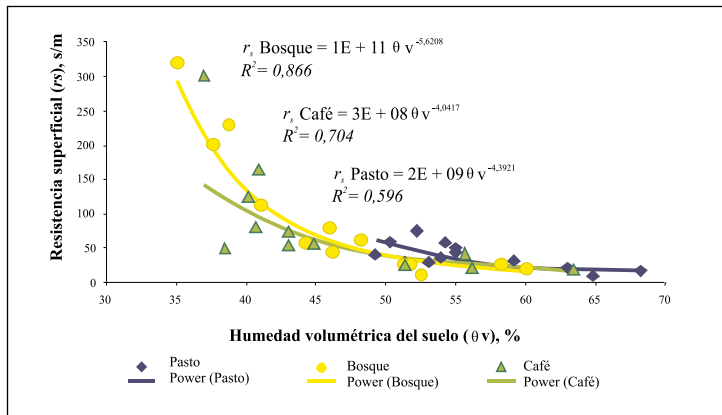
La ventaja de la Ecuación <<5>> sobre la Ecuación <<4>> es la de permitir estimar

las variaciones de la r_s con respecto a las condiciones climáticas y de humedad de suelo (2, 13); r_s no es una variable netamente fisiológica. Una desventaja de la Ecuación <<4>>, es la de asumir un valor promedio de resistencia estomática (r_L) para todo el período de análisis, diferente a lo observado en la Ecuación <<5>>, que considera las variaciones de la apertura estomática como una función de la energía disponible en la atmósfera para transpirar ($R_n - G$), del agua disponible en el suelo y de la demanda de vapor de agua de la atmósfera en el *DPV*.

Relación entre la humedad volumétrica del suelo y la resistencia superficial. Se encontraron relaciones no lineales entre la r_s y la θ_v de suelo para los cultivos de café a libre exposición y bosque. En la Figura 1 se presentan las ecuaciones para cada una de las coberturas.

Descriptivamente, de acuerdo con la Figura 1, los mayores coeficientes de determinación entre la r_s y θ_v del suelo se registraron en el bosque ($R^2 = 0,866$) y café ($R^2 = 0,704$). Para las coberturas de café y bosque a valores de θ_v superiores a 50% la r_s fue baja (56 $s.m^{-1}$ y 60,56 $s.m^{-1}$, respectivamente); lo que indica

Figura 1. Relación entre la humedad volumétrica del suelo y la resistencia superficial para bosque, café y pasto, para condiciones de radiación neta entre 170 y 56 W.m⁻², con velocidad media del viento de 2 m.s⁻¹ y un DPV entre 0,94 y 0,059 KPa.



que a estos valores de humedad se mantendrían las mayores tasas de evapotranspiración. Cuando la θ_v es inferior al 40% la r_s aumenta en bosque y en café, alcanzando valores máximos de 300 s.m⁻¹, lo que estaría indicando una reducción en los flujos de calor sensible (λE) y por lo tanto en el intercambio gaseoso. En pasto no se observan cambios tan pronunciados en la r_s , debido a que la θ_v a 20 cm siempre fue superior a 45%.

Cambios en la relación de Bowen y los componentes del balance de energía. La relación de Bowen (β) es un indicador de la distribución de los dos grandes componentes del balance de energía λE y H . En este estudio se observa que en pasto solamente en el 5% de los casos β fue negativo, mientras que para café fue negativa en el 39% de los casos y en bosque en el 64%. Por otra parte, en pasto en el 40% de la distribución β está en el rango de 0,18 a 0,31, en café el 45% de la distribución está entre -0,03 y 0,40 y en bosque el 27% de la distribución está entre -0,16 y 0,33 (Figura 2). Lo anterior indica que el cambio de cobertura de bosque a café y a pasto, influye directamente en el aumento en la energía disponible para calentar el aire circundante en pasto como flujo de calor sensible (H) y una disminución en la cantidad de energía

que se emplea en evapotranspiración, como flujo de calor latente (λE).

En desiertos el valor de β es de 10, entre 2 y 6 para regiones semiáridas, entre 0,4 a 0,8 para bosques templados y pastos, y de 0,2 para selvas tropicales lluviosas (12). Los promedios obtenidos en este estudio, para la zona Andina de Colombia, indican que los valores de β en bosques tropicales andinos son negativos (-0,13), y para café de 0,13 y para pasto de 0,21 si la velocidad del viento promedio es de 2,0 m.s⁻¹, pero si las condiciones de viento son muy bajas, los valores β aumentan a 0,40 en pasto y café, y a 0,37 en bosque (Tabla 3). En la selva Amazónica, Rocha da *et al.* (21) reportaron valores promedios para β de 0,17 ($\pm 0,10$), siendo relativamente baja durante el inicio de la época de lluvias.

Desde el punto de vista del intercambio gaseoso del ecosistema, un decrecimiento en β indica un incremento en la asimilación de CO₂ debido al incremento en las tasas de evapotranspiración, lo que indudablemente además de las contribuciones negativas que hace la cobertura de pasto en términos de la distribución de las lluvias por incrementos en la escorrentía y la percolación en la región (19), se le agregaría una disminución en la capacidad del ecosistema para fijar CO₂ al disminuirse

el intercambio gaseoso, e igualmente ocurre una disminución de la recarga atmosférica de vapor de agua por una disminución en las tasas de evapotranspiración.

Adicionalmente, en pastos un incremento en los flujos de calor del suelo (G), puede ocasionar otras modificaciones tales como incrementos en la actividad biológica del suelo y, por ende, un incremento en las tasas de descomposición de materia orgánica y aumentos en los aportes de CO_2 del suelo hacia la atmósfera.

En estudios realizados en la Amazonía, por Shukla *et al.* (24), se registran incrementos en la temperatura del aire debido a cambios

en el balance de energía, por la reducción en la energía recibida (R_n) de 204 W.m^{-2} a 186 W.m^{-2} , ocasionada por la transformación de la selva a pasturas, tendencia similar a la reportado en este estudio (Tabla 3).

Relación entre modelos para estimar flujos de calor latente.

En la cobertura de café y bosque, el modelo general de Penman-Monteith fue semejante al modelo de la relación de *Bowen* (Figura 3) en la estimación de los flujos de calor latente (λE) representados en la pendiente de la recta (0,9396 y 1,1059 respectivamente) al igual que en los coeficientes de determinación (0,940 y 0,939 respectivamente). En el caso de la cobertura de pasto, se observó una mayor diferencia entre ambos modelos, lo que indica que el modelo de la relación de *Bowen* sobrestima al modelo general de Penman-Monteith representado en la pendiente de la recta (1,3794) y un coeficiente de determinación más bajo (0,737), lo que indica que hay problemas en la asignación de parámetros del modelo de Penman-Monteith para este t9 puede concluirse que:

Se presentan aumentos en los flujos de calor sensible al transformar el bosque a pasto o de bosque a café, lo cual se comprueba por el incremento en la relación de *Bowen* y por la disminución en la proporción de energía empleada en la evapotranspiración ($\lambda E/R_n$), lo que indica una menor cantidad de energía disponible para los procesos de intercambio de vapor de agua y aumentos de energía disponible para calentar el aire, lo que representa aumentos en la temperatura superficial, por el incremento de las áreas en potrero en la zona andina colombiana.

La cobertura vegetal afecta la distribución de la humedad del suelo a 20 cm de profundidad, lo que influye directamente en el control que hace la cobertura vegetal a la pérdida de agua representada en una mayor resistencia superficial.

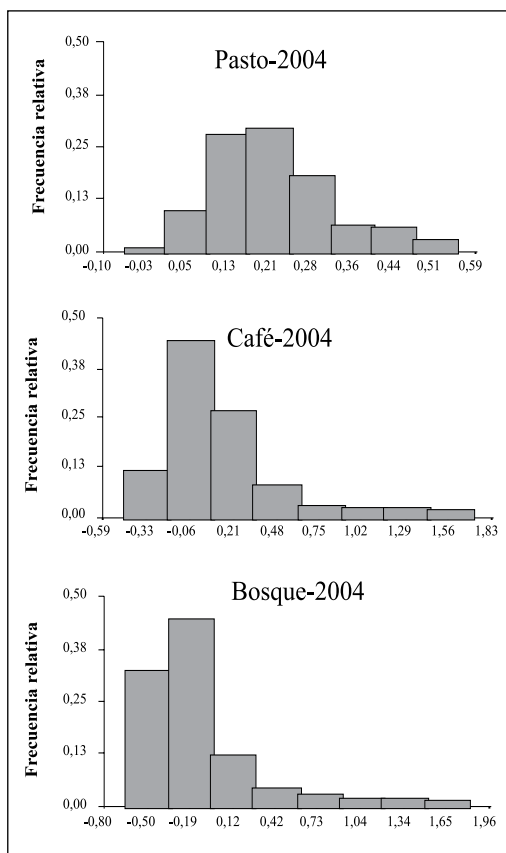


Figura 2. Distribución de frecuencias para la relación de *Bowen* (β), estimada simultáneamente en pasto, café y bosque.

Tabla 3. Promedios de los componentes del balance de energía para tres coberturas tipo de la zona Andina colombiana y para dos condiciones de velocidad del viento promedio.

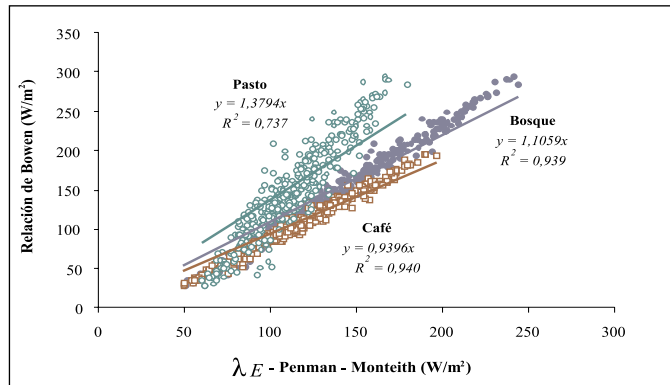
Cobertura	β	*Kc	$\lambda E/Rn$	** λE	***H	Rn	G
Velocidad del viento = 2,0m.s⁻¹							
W.m²							
Pasto	0,21	1,16	1,06	79,03	15,32	104,8	10,48
Café a libre exposición	0,13	1,12	1,02	105,7	2,87	119,6	3,36
Bosque	-0,13	1,20	1,2	148,5	-38,28	113,6	3,41
Velocidad del viento = 0,01m.s⁻¹							
Pasto	0,40	0,99	0,90	67,49	26,86	104,8	10,48
Café a libre exposición	0,40	1,10	0,97	78,05	30,54	111,9	3,36
Bosque	0,37	1,07	0,97	80,33	29,9	113,6	3,41

* Coeficiente de cultivo (Kc=ETc/ETo). La evapotranspiración de referencia (ETo) se estimó empleando el modelo propuesto por la FAO-56 Allen *et al.* (1), que es la Ecuación de Penman-Monteith para condiciones de referencia

** Estimado a partir de la relación de Bowen, modelo 2 (Ecuación 12).

*** Estimado a partir de la relación de Bowen (Ecuación 17).

Figura 3. Comparación del modelo general de Penman-Monteith con el modelo de la Relación de Bowen, para estimar flujos de calor latente (λE) en tres coberturas vegetales en la zona Andina colombiana (Bosque, café y pasto).



El modelo general de Penman-Monteith tiene una buena correlación con el modelo de la relación de *Bowen* en las coberturas de café y bosque, y un menor ajuste en la cobertura de pasto.

LITERATURA CITADA

- ALLEN, G.R.; PEREIRA, S.L.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300 p.
- ALVES, I.; PERRIER, A.; PEREIRA, L.S. Aerodynamic and surface resistance of complete cover crops: How good is the "Big Leaf"? Transactions ASAE 41(2):345-351. 1998.
- ANGELOCCI, L.R.; BRUNINI, O.; MAGALHAES, A.C. Variacao de resistencia estomática á difusao de vapor da água associada ao estado de energia da água na folha em cafeeiros jovens. En: Reunion simposio relaciones agua-planta. (9: Julho 25-28 1983: Viçosa). Viçosa: Universidade federal de Viçosa, 1983. 18 p.
- CARDER. Ecorregión eje cafetero, un territorio de oportunidades. 2a. ed. Pereira: Corporación autónoma regional de Risaralda, 2004. 345 p.
- FARAHAMI, H.J.; W.C. BAUSCH. Performance of evapotranspiration models for maize-bare soil to close canopy. Transactions ASAE 38:1049-1059. 1995.

6. GÓMEZ, G.L.; GUZMÁN M., O. Relación empírica entre la radiación global y el brillo solar en el área de Cenicafé, Chinchiná, Caldas. *Cenicafé* 46(4):205-218. 1995.
7. JARAMILLO R., A. la redistribución de la radiación solar y la lluvia dentro de plantaciones de café (*Coffea arabica* L.). *Revista de la academia colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales* 29(112):371-382. 2005.
8. JARAMILLO R., A.; ESCOBAR E., B. Balance de energía en *Coffea arabica* L. *Cenicafé* 34(4):115-126. 1984
9. KJELGAARD, J.K.; STOCKLE, C.O.; VILLAR, J.M.; EVANS, R.G.; CAMPBELL, G.S. Evaluation methods to estimate corn evapotranspiration from short-time interval weather data. *Transactions ASAE* 37(6):1825-1833. 1994.
10. MONTEIH, J.L. Evaporation and the environment. *Proceedings society experimental biology* 19:205-234. 1965.
11. NOBEL, P. S. *Physicochemical and environmental plant physiology*. 2a. ed. San Diego: Academic Press, 1999. 635 p.
12. OLEASON, K.W.; BONAN, G.B.; LEWIS, S.; VETENSTEIN, M. Effects of land use change on North America climate: Impact of surface datasets and model biogeophysics. *Climate dynamics* 23:117-132. 2004.
13. ORTEGA-F., S.; OLIOSO, R.; ANTONIOLETTI, A.; N. BRISSON. Evaluation of the Penman-Monteith model for estimating soybean evapotranspiration. *Irrigation science* 23:1-9. 2004.
14. PÉREZ P., J.; CASTELLVI F.; MARTINEZ-C., A. A simple model for estimation the Bowen ratio from climatic factors for determining latent and sensible heat flux. *Agricultural and forest meteorology* 148:25-37. 2008.
15. PIELKE S., R.S.; ADAGOKE, J.O.; CHASE, N.T.; MARSHALL, H.C.; MATSUI, T.; NIYOGI, D. A new paradigm for assessing the role of the agriculture in the climate system and in climate change. *Agricultural and forest meteorology* 142:234-254. 2007.
16. RAMÍREZ B., J.H. Estudio Agroclimático para la zona de influencia de la granja el Jazmín. *Investigaciones Unisarc* 2(2):25-32. 2004.
17. -----. Plant-water relationships for several common bean genotypes (*Phaseolus vulgaris* L.) with and without drought stress conditions. Mayaguez : University of Puerto Rico. Department of agronomy and soils, 2007. 193 p. Trabajo de grado: Maestro en agronomía.
18. RAMÍREZ B., V. H.; GOYAL, R. M. Elementos de agroclimatología. Santa Rosa de Cabal: Corporación Universitaria Santa Rosa de Cabal, 2008. 263 p.
19. RAMÍREZ B., V. H.; JARAMILLO R., A. Distribución de la lluvia en cuatro coberturas vegetales en la zona andina colombiana. *Investigaciones Unisarc* 5(1):18-33. 2007.
20. -----. Cambios en la hidrología superficial asociados a los cambios de cobertura vegetal en la zona Andina colombiana. En: Congreso colombiano de la ciencia del suelo. (14: Octubre 29 al 31 2008: Villavicencio). Villavicencio: La sociedad, 2008.
21. ROCHA, H. DA; GOULDEN, M.L.; MILLER, D.S.; MENTON, C.M.; PINTO, L.; FREITAS, H.D. DE; SILVA, E.; FIGUEIRA, M.A. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia. *Ecological applications* 14:22-32. 2004.
22. ROSENBERG, N. J. *Microclimate; the biological environment*. New York: McGraw Hill, 1974. 315 p.
23. SALATI, E.; NOBRE, C.A. Possible climatic impacts of tropical deforestation. *Climate change*. 19(1-2):1480-1573. 1991.
24. SHUKLA, J.; NOBRE, C.; SELLER, P. Amazon deforestation and climate change. *Science* 247:1322-1325. 1990.
25. SUÁREZ, V.S. Características físicas de los suelos del departamento de Risaralda, relacionadas con el uso, manejo y conservación. Chinchiná: Cenicafé, 1998. 8 p. (Avances Técnicos No. 257).
26. SZEICZ, C.; LONG, L.F. Surface resistance of crop canopies. *Water resources research* 5(8):622-633. 1969.
27. WANG, S.; DAVISON, A. Impact of climate variation on surface albedo of a temperate grassland. *Agricultural and forest meteorology* 142:133-142. 2007.