

Distribución Espacial y Ciclo Diurno de la Temperatura Ambiente y Punto de Rocío en una Región de los Andes Tropicales de Colombia

I.C. Johanna P. Jiménez R.

johapjimenez@yahoo.com.ar

I.C. Lina M. Marín A.

I.C. M.Sc (C) Hernán A. Moreno.

I.C. M.Sc. Ph. D. Jaime I. Vélez U.

I.C. M.Sc. José V. Guzmán.

I.C. M.Sc. Ph. D. Germán Poveda J.

Preparado para presentación en el
XVI Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología
Sociedad Colombiana de Ingenieros
Sociedad de Ingenieros del Quindío
Universidad del Quindío
Corporación Autónoma Regional del Quindío
Armenia 29, 30 y 31 de octubre de 2004

Resumen: Con el propósito de cuantificar la disponibilidad del recurso de agua atmosférica proveniente de la condensación del vapor de agua en la atmósfera inferior, se estudia la variabilidad espacial de la temperatura del punto de rocío en una región comprendida entre 5° N a 7° N y 75° W a 76° W, en el sur del departamento de Antioquia y el centro y norte de los departamentos de Caldas y Risaralda. Se estiman relaciones entre los valores promedio de largo plazo de la temperatura del aire y la temperatura de rocío, con la altura sobre el nivel del mar, encontrándose altos coeficientes de determinación. Se identifican diferencias regionales debidas principalmente a la variabilidad de la humedad y pluviosidad de la zona. Se construyen mapas de temperatura y temperatura de rocío para la región de estudio. Basados en la disponibilidad de información, se cuantifican los ciclos anuales y diurnos y se hace la caracterización de los mismos. Se encuentra que la temperatura anual de punto de rocío está estrechamente ligada a los ciclos anual de la lluvia, en respuesta a condiciones termodinámicas impuestas por el ciclo diario del calentamiento radiativo. Los resultados se contextualizan en función de la ecuación de Clausius-Clapeyron, con el objeto de estimar las eficiencias del proceso de extracción del agua atmosférica para propósitos de aprovechamiento de este recurso en zonas donde se demuestre su factibilidad.

1. Introducción

Dada la estratégica ubicación de Colombia, la alta disponibilidad de agua en la atmósfera en casi todo el año en la mayor parte del territorio nacional, permite contemplar la posibilidad de que el aprovechamiento del agua por medio de la condensación del vapor atmosférico sea una alternativa viable y competitiva.

El calentamiento de la atmósfera es el resultado del balance de la radiación solar entrante y saliente de la superficie terrestre y de la propia atmósfera. La temperatura del aire varía en el espacio y en el tiempo; éstas modificaciones son debidas a diferencias de la radiación recibida, a la naturaleza de la superficie, a la distancia desde las grandes masas de agua, a la elevación del relieve, a los vientos dominantes y a los ciclos de insolación que afectan a la atmósfera y la superficie terrestre. Debido a que Colombia está ubicada en la zona tropical, el comportamiento de la temperatura media del aire en la superficie está fuertemente condicionado por la altura sobre el nivel del mar, presentándose una relación significativamente lineal entre estas dos variables, al menos dentro de lo que podría denominarse como baja atmósfera. La temperatura de punto de rocío es la temperatura a la cual, en condiciones adiabáticas, ocurre el cambio de fase del vapor de agua en la atmósfera a agua líquida por saturación de la parcela de aire. El Atlas Hidrológico de Colombia ha estudiado el comportamiento y la variabilidad geográfica de la precipitación oculta en grandes escalas espaciales (*Universidad Nacional, 2001*).

Este trabajo describe los ciclos diurnos y anuales de la temperatura media y el punto de rocío para 21 estaciones meteorológicas de una región que comprende el centro de Antioquia y la parte centro y norte de los departamentos de Caldas y Risaralda. De la misma manera, se consideran las condiciones de contenido de vapor de Agua con base en la ecuación de Clausius-Clapeyron y finalmente, se proponen expresiones matemáticas regionales para la estimación de los valores promedios de la Temperatura y Temperatura de Rocío, de acuerdo a la altura del lugar.

2. Datos y Metodología

Para propósitos de la aplicación de la metodología desarrollada en este trabajo, se escogió un área que abarca la zona central y sur del departamento de Antioquia y la zona del centro y norte de los departamentos de Caldas y Risaralda, entre las latitudes 5° N á 7° N y 75° W á 76° W, como lo ilustra la Figura 1.

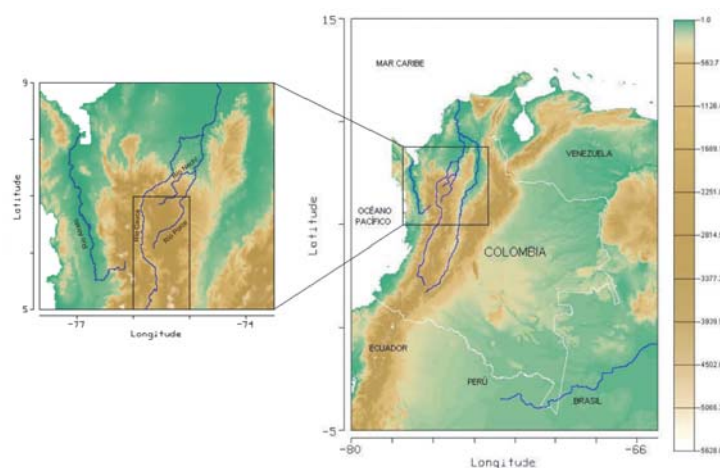
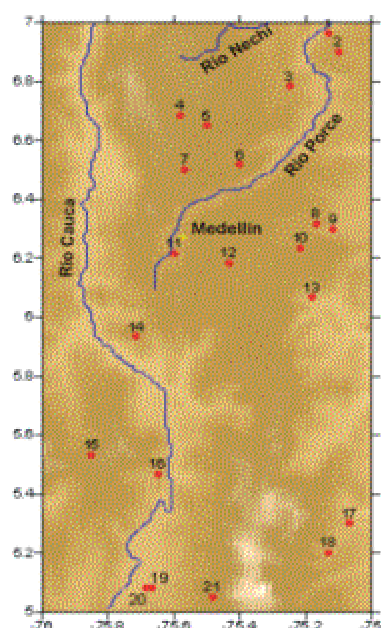


Figura 1. Región de estudio seleccionada

En la Tabla 1 se observan las características de la información recopilada en 21 estaciones con datos de Humedad Relativa y Temperatura media. La Figura 2 ilustra, a una escala de píxel de 90 m x 90 m, el relieve general de la zona de estudio con la distribución espacial de las principales estaciones de registro utilizadas.

Tabla 1. Características de las estaciones utilizadas.

N°	CÓDIGO	TIPO	NOMBRE	MUNICIPIO	ALTURA	LONG	LAT	ORIGEN	AÑOS		FECHA INICIO	FECHA FIN	RESOLUCIÓN
									COMPLETOS	Temp.			
1	2701525	CP	EL ROBLE	ANORI	1175	6.96	-75.13	EPM	2	3	01/04/1979	15/06/1984	Mensual
2	2701525	CP	AMALFI	AMALFI	1500	6.90	-75.10	EPM	0	0	02/11/1981	----	Mensual
3	2701518	CO	TRONERAS	CAROLINA	1800	6.78	-75.25	EPM	19	20	16/07/1943	----	Mensual
4	2701517	CP	MEDELLIN	MEDELLIN	1491	6.68	-75.58	EPM	12	12	01/06/1954	01/04/1967	Mensual
5	2701523	CP	CUCURUCHO	S. ROS DE O.	2580	6.65	-75.50	EPM	4	4	07/05/1982	----	Mensual
6	2701524	CP	RIOGRANDE	DON MATIAS	2210	6.52	-75.40	EPM	19	20	10/06/1982	-----	Mensual
7	2701522	CP	SAN PEDRO	SAN PEDRO	2392	6.50	-75.57	EPM	4	5	19/01/1950	----	Mensual
8	2308505	CP	STA RITA	ALEJANDRIA	1875	6.32	-75.17	EPM	25	27	26/11/1956	----	Mensual
9	2308506	CO	EL BIZCOCHO	SAN RAFAEL	1250	6.30	-75.12	EPM	0	0	01/06/1964	01/02/1966	Mensual
10	2308517	CP	EL PEÑOL	PEÑOL	1880	6.23	-75.22	EPM	22	20	01/03/1960	-----	Mensual
11	801100	CO	APTO. OLAYA H.	MEDELLIN	1495	6.22	-75.60	ISMCS	20	20	01/01/1973	01/12/1993	Horaria(c/3h)
12	801120	CO	APTO. JOSE M. C.	RIONEGRO	2137	6.18	-75.43	ISMCS	20	20	01/01/1973	01/12/1993	Horaria(c/3h)
13	2308052	PM	COCORNA	COCORNÁ	1210	6.07	-75.18	CENICAFE	10	10	01/01/1992	03/12/2001	Horaria(7-1-19)
14	2620502	CP	EL ROSARIO	VENECIA	1600	5.93	-75.72	CENICAFE	10	10	01/01/1992	03/12/2001	Horaria(7-13-19)
15	2619501	CO	MIGUEL VALENCIA	JARDIN	1600	5.53	-75.85	CENICAFE	10	10	01/01/1992	31/12/2001	Horaria(c/3h)
16	2617507	CO	RAFAEL ESCOBAR	SUPIA	1800	5.47	-75.65	CENICAFE	10	10	01/01/1992	31/12/2001	Horaria(c/3h)
17	2302503	PM	STA. HELENA	MEDELLIN	2373	5.30	-75.07	CENICAFE	10	10	01/01/1992	31/12/2001	Horaria(c/3h)
18	2302501	CO	LLANADAS	MANZANARES	2580	5.20	-75.13	CENICAFE	10	10	01/01/1992	31/12/2001	Horaria(c/3h)
19	2615509	CP	SANTAGUEDA	PALESTINA	1880	5.08	-75.67	CENICAFE	10	10	01/01/1992	31/12/2001	Horaria(c/3h)
20	2615514	CO	GRANJA LUKER	PALESTINA	1875	5.08	-75.68	CENICAFE	10	10	01/01/1992	31/12/2001	Horaria(c/3h)
21	2615505	CO	AGRONOMIA	MANIZALES	1925	5.05	-75.48	CENICAFE	10	10	01/01/1992	31/12/2001	Horaria(c/3h)



- | | |
|----------------------|----------------------------|
| 1 El Roble | 12 J. María Córdova |
| 2 Amalfi | 13 Cocorná |
| 3 Troneras | 14 El Rosario |
| 4 Medellín | 15 Miguel Valencia |
| 5 Cucurucho | 16 Rafael Escobar |
| 6 Río Grande | 17 Sta. Helena |
| 7 San Pedro | 18 Llanadas |
| 8 Sta. Rita | 19 Santaguada |
| 9 El Bizcocho | 20 Granja Luker |

Figura 2. Relieve general de la zona de estudio con la densidad de estaciones. (La escala de colores es la misma utilizada en la Figura 1)

3. Análisis de Datos

3.1. Ciclos Diurnos y Anuales

Sería ideal realizar la caracterización de la temperatura de punto de rocío a escala temporal diaria, ya que esta es la escala natural del fenómeno. Debido a la limitación en los datos, ésta se hizo a escala mensual (para la mayoría de las estaciones), lo que lleva a subestimar el valor final de la temperatura de punto de rocío (Vélez J.I.; Poveda G.; Mesa O., 2000).

Las estaciones utilizadas no tienen registros de temperatura de punto de rocío, por lo tanto fue necesario calcular dichas temperaturas haciendo uso de la relación de Clausius-Clapeyron la cual está hecha para una presión atmosférica dada. (Vélez J.I.; Poveda G.; Mesa O., 2000; Wallace y Hobs, 1977).

En la Figura 3 se aprecian los ciclos diurnos y anuales de la temperatura media (T) y de la temperatura de punto de rocío (T_d) para algunas de las estaciones. A lo largo del año estas dos temperaturas son prácticamente uniformes debido a que la región de estudio esta ubicada en la zona tropical. Sin embargo, se encuentra que T presenta pequeñas variaciones en los diferentes meses y T_d muestra ciclos anuales bimodales con máximos entre Abril-Mayo y en Noviembre, y mínimos en Julio, para la mayoría de las estaciones notándose la influencia del ciclo anual de la precipitación (Roldan y Arango, 2004).

Para las estaciones en las cuales se pudo obtener el ciclo diurno, se observa que la variación intradiaria de la temperatura del aire está influenciada por los procesos radiativos y el ciclo de insolación; la temperatura máxima se observa después del medio día (máxima exposición solar) y la mínima un poco antes de la salida del sol. Puede observarse que las mínimas Temperaturas de Punto de Rocío se presentan alrededor del medio día, a las 13 horas y los máximos valores se presentan en las horas de la mañana o en la noche, a las 7 y 19 horas, coincidiendo estos últimos con las horas de máxima y mínima exposición solar respectivamente. En la totalidad de las estaciones, el análisis del ciclo diurno permite concluir que en las horas donde ocurre la mayor temperatura (T) también se presenta la menor temperatura de rocío (T_d) y viceversa, lo cual se explica mediante el diagrama de Clausius-Clapeyron que se explicará más adelante.

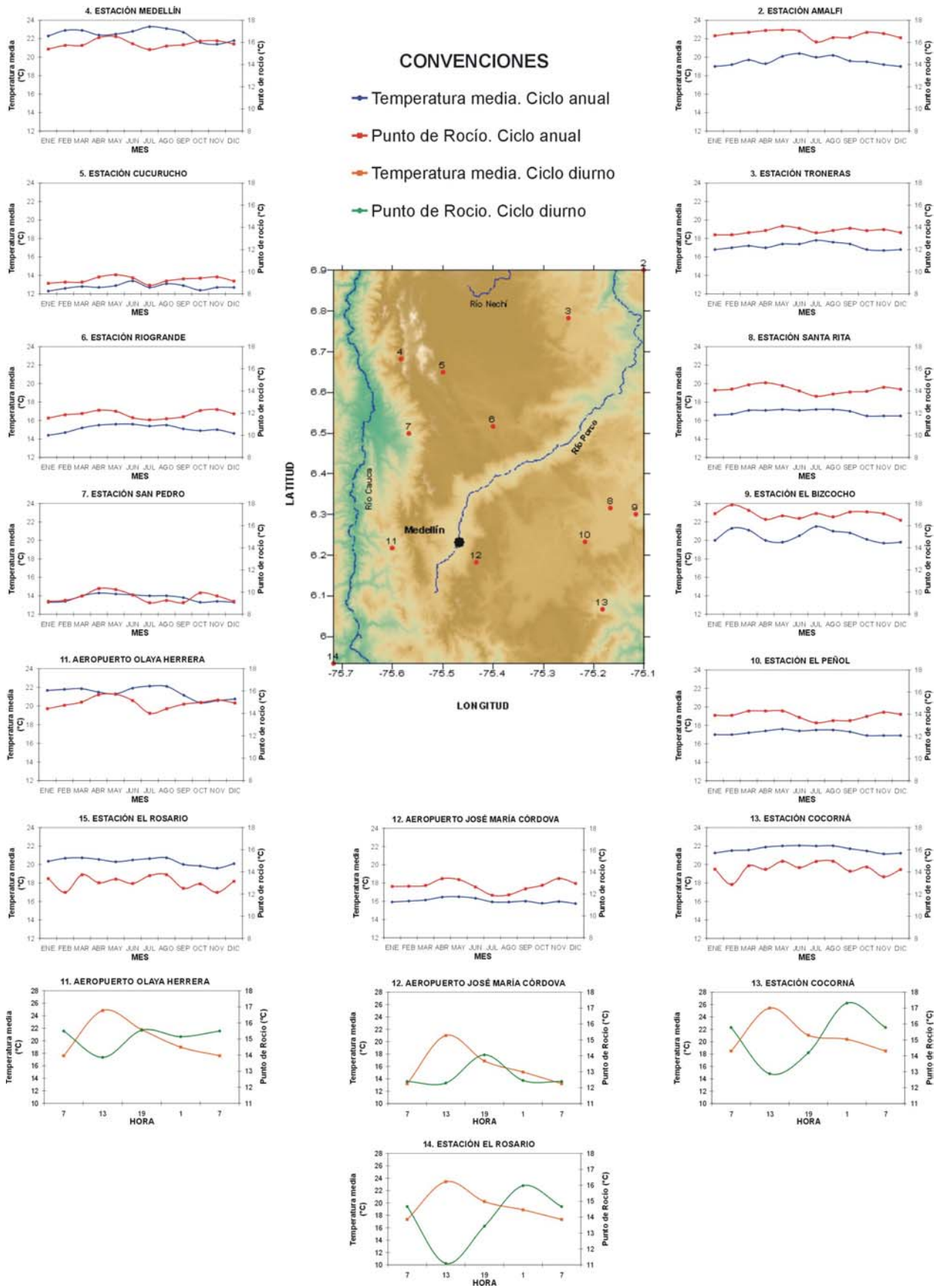


Figura 3. Ciclos diurnos y anuales multianuales de la Temperatura media y de Punto de Rocío

3.2. Consideración de las Condiciones de Contenido de Vapor de Agua con base en la Ecuación de Clausius-Clapeyron.

Con el fin de conceptualizar el fenómeno de condensación para establecer correlaciones entre las condiciones termodinámicas diurnas y la producción de agua a partir de un condensador, se realiza una evaluación de la evolución mensual y diurna de las temperatura media y de punto de rocío para todas las estaciones, desde el punto de vista del diagrama de Clausius-Clapeyron.

Para una temperatura de aire dada existe un máximo valor para la presión de vapor, denominado presión de vapor de saturación, por encima de la cual, manteniendo la misma temperatura, no es posible mantener la misma masa de vapor de agua. Para llegar al punto de saturación se tienen muchas opciones, entre las cuales están: aumentar la presión de vapor, e (aumentando la masa de vapor de agua); o disminuir la temperatura hasta llegar a la temperatura correspondiente al punto de rocío, T_d .

Este procedimiento conduce a la conveniencia de formular la búsqueda de las condiciones del medio ambiente (hora del día y el mes del año) en las cuales la distancia horizontal ($T-T_d$) sea menor, ya que mientras esta diferencia sea más pequeña (grande) el logro de las condiciones de saturación y posterior condensación del vapor de agua presente en el aire pueden obtenerse de forma más rápida y eficiente. Con este propósito, se analizaron las condiciones climáticas en términos del diagrama de Clapeyron, considerando para ello las diferentes horas del día y los meses del año. En las Figuras 4 (a) y (b) se muestran los diagramas para las diferentes horas del día y los diferentes meses del año para la estación del aeropuerto José María Córdova; en éstas graficas, la mañana equivale a las 7:00 horas, el mediodía son las 13:00 horas y la noche representa las 19:00 horas. Se debe tener en cuenta que lo más aconsejable sería trabajar siempre con el ciclo diurno de las estaciones ya que éstos permiten una mayor claridad de la variación de la temperatura y presión de vapor.

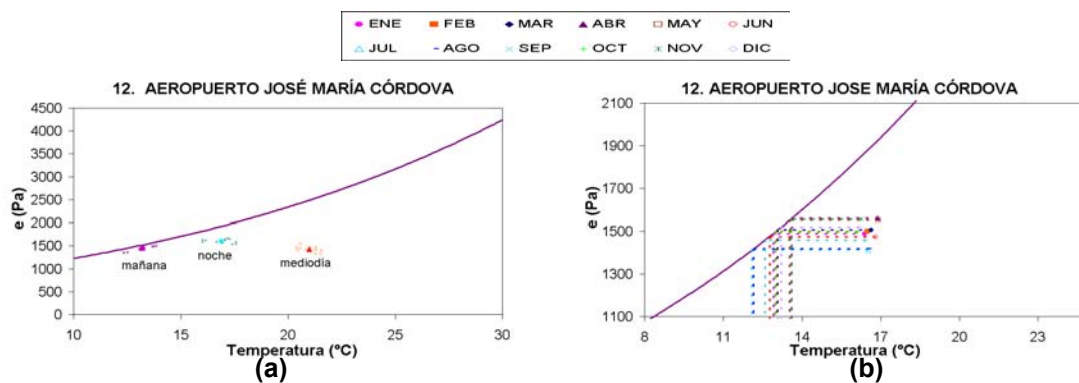


Figura 4. Diagrama de fases que relaciona la presión de vapor como una función de la temperatura en (a) diferentes horas del día (b) diferentes meses del año.

Como ya se ha dicho, uno de los objetivos básicos del estudio consiste en la determinación de los períodos (mes y hora, por ejemplo) en los cuales la atmósfera, en los diferentes sitios analizados, presenta las menores diferencias entre la temperatura ambiente media, T , y la temperatura de punto de rocío, T_d , con este fin se construyeron gráficas para cada estación que ilustran esta diferencia.

En las Figuras 5 (a) y (b) se muestra la gráfica de esta diferencia de temperatura para el Aeropuerto José María Córdova, tanto para el ciclo diurno, (a), como para el anual (b).

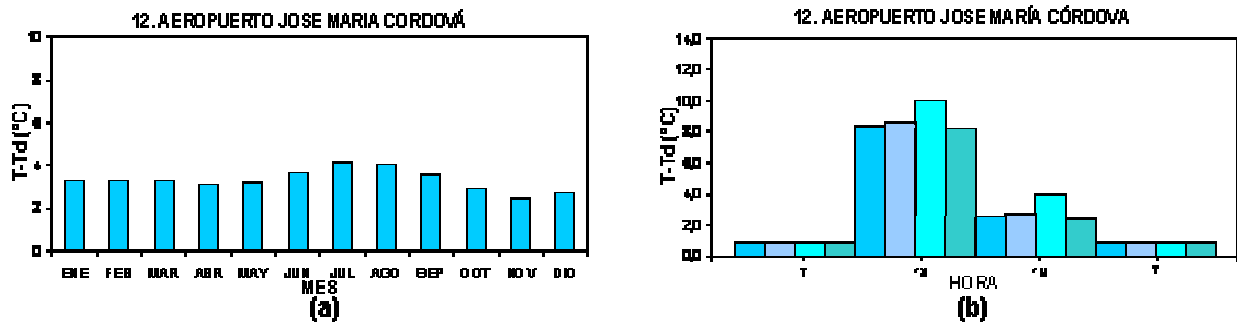


Figura 5. Gráficas de las diferencias entre la Temperatura media y Temperatura de Rocío para la estación del Aeropuerto José María Córdova, (a) Ciclo anual; (b) Ciclo diurno.

Como se puede ver las máximas diferencias entre las dos temperaturas se presentan en todas las estaciones consideradas en el mes de julio, debido a la ocurrencia de la mayor temperatura media, que se presenta en dicho período, como consecuencia de la mayor exposición solar característica del trimestre JJA. Similarmente, las mínimas diferencias se presentan, en su mayoría, en los meses de octubre y noviembre, lo que coincide con los meses durante los cuales la ZCIT se encuentra en esta región en su recorrido hacia el sur de menor exposición solar, septiembre, octubre y noviembre (invierno), época caracterizada con la mayor humedad relativa y menores temperaturas ambiente.

Para las estaciones para las cuales fue posible obtener el comportamiento del ciclo diurno, se hizo una diferenciación de los datos de cada hora de acuerdo con los cuatro trimestres del año hidrológico, definidos éstos de la siguiente manera: DEF, MAM, JJA y SON. Se puede apreciar que la máxima diferencia se presenta a las 13 horas, en el trimestre DEF. Este comportamiento es consistente con el hecho de que en las horas de mayor exposición solar es más difícil alcanzar las condiciones de saturación y coincide con uno de los trimestres de verano. La mínima diferencia de estas temperaturas se presenta a las 7 horas, en el trimestre de MAM, lo cual coincide con uno de los períodos intra-anales en los que ocurre el paso de la ZCIT por esta región, caracterizado por ser una temporada lluviosa.

3.3. Regionalización de la Temperatura y la Temperatura de Rocío.

Colombia está ubicada en la zona tropical, por lo tanto el comportamiento de la temperatura media del aire en la superficie está fuertemente condicionado por la altura sobre el nivel del mar, presentándose una relación significativamente lineal entre estas dos variables. (Chaves y Jaramillo, 1998), al menos dentro de lo que podría denominarse como baja atmósfera.

Así por ejemplo, CENICAFE propone una regionalización para la temperatura promedio del aire (Chaves y Jaramillo, 1998), en la cual se plantea una relación lineal entre la temperatura y la altura, relación que varía de acuerdo a la región geográfica. De esta forma, para la región Andina CENICAFE obtuvo la siguiente expresión, a partir del registro de 626 estaciones climatológicas (Chaves y Jaramillo, 1998):

$$T_{media} = 29.42 - 0.0061H \quad (3)$$

Donde H es la altura sobre el nivel del mar en (m) y T_{media} es la temperatura promedio del sitio en ($^{\circ}C$).

Para los propósitos de este trabajo se preparó un ajuste lineal para la temperatura y la temperatura de punto de rocío multianuales, tomando como punto de partida los estudios hechos por CENICAFE, pero adecuándolos a la zona específica aquí considerada. Se realizó un primer ajuste y se analizó su sensibilidad al remover la información correspondiente a las estaciones Medellín y Aeropuerto Olaya Herrera, debido a que estas representan el comportamiento de centros urbanos, altamente influenciados por la actividad antrópica, a diferencia del resto de estaciones, caracterizadas por condiciones predominantemente rurales, encontrándose que la calidad del ajuste mejora sustancialmente ignorando las dos estaciones mencionadas. La siguiente expresión muestra el ajuste de regresión lineal obtenido, que relaciona el comportamiento de la temperatura con la altura utilizando dicha información:

$$T = 29,3 - 0,0063H, \quad r^2 = 0,9549 \quad (4)$$

Utilizando la expresión (4) se construye el mapa de temperatura media anual que se muestra en la Figura 7 (a). Esta relación lineal muestra el decrecimiento de la temperatura con la altura. Debido a la relación lineal, este mapa representa claramente la topografía de la región, observándose los valles de los ríos Cauca (rojo), Medellín y Porce (amarillo y ocre).

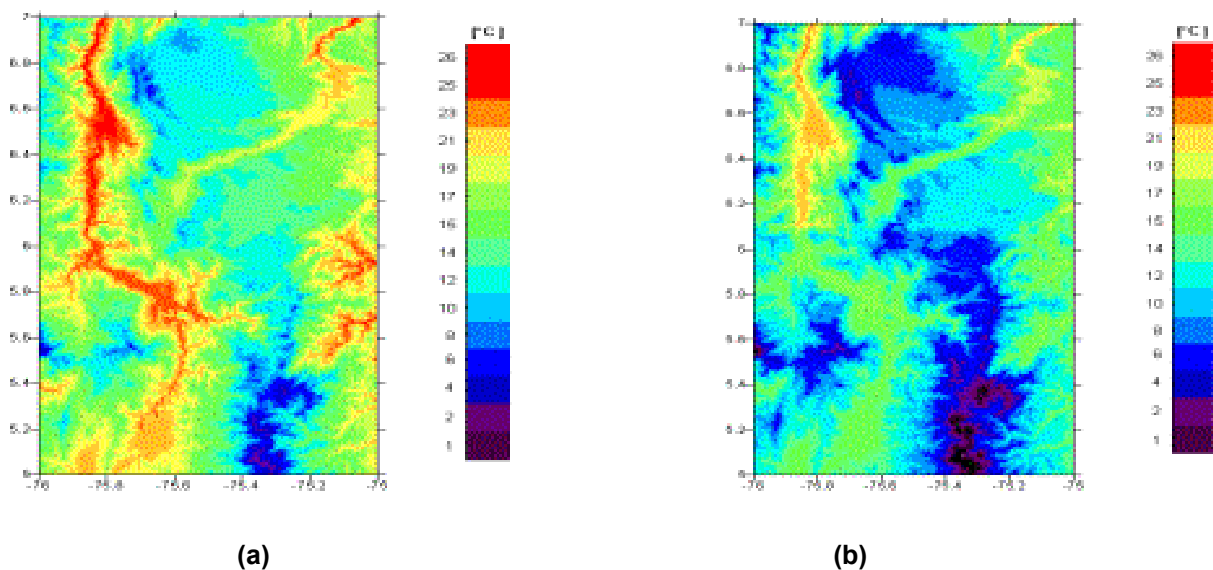


Figura 7. (a) Mapa de temperatura media anual obtenido mediante un ajuste lineal. (b) Mapa de temperatura de Punto de Rocío media anual estimado mediante un ajuste lineal. Ecuaciones 6 y 7.

Bajo los mismos criterios, y debido a que la temperatura del aire y el punto de rocío están relacionadas entre sí, se obtuvo también una expresión regional que relaciona la temperatura de rocío (°C) con la altura (m) utilizando las estaciones antes mencionadas. La expresión obtenida es:

$$T_d = 21.502 - 0.0046H, \quad r^2 = 0,7015 \quad (5)$$

Se observa que la correlación de los datos no es tan buena como la obtenida para el caso de la temperatura del aire. En la búsqueda de un mejor coeficiente de ajuste se consideró la separación de dos grupos de estaciones de medición de acuerdo a la zona en la que están localizadas. En la Figura 8 se muestra la distribución espacial de las estaciones en la cual se diferencian las siguientes dos zonas:

- La Zona 1, corresponde a las diez estaciones de las EPM (sin tener en cuenta la estación Medellín), localizadas todas en la región central de Antioquia.
- La Zona 2, corresponde a las ocho estaciones de CENICAFE, localizadas al sur de Antioquia y la parte central y norte del departamento de Caldas.

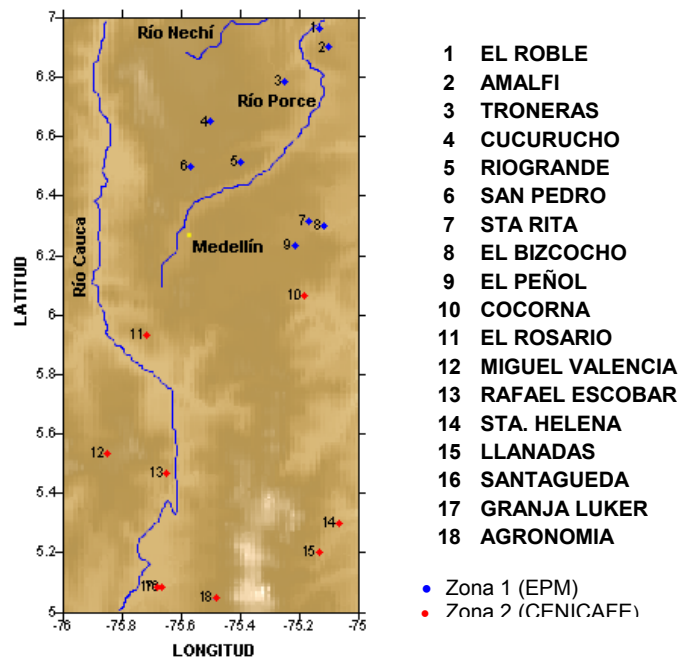


Figura 8. Distribución espacial de todas las estaciones en la región de estudio (5°- 7° N y 75° – 76°W)

Teniendo en cuenta esta división por zonas, se obtienen las siguientes expresiones:

$$T_d = 26.061 - 0.0066H, \quad r^2 = 0,9702 \quad (\text{Zona 1: EPM}) \quad (6)$$

$$T_d = 21.0125 - 0.0052H, \quad r^2 = 0,9736 \quad (\text{Zona 2: CENICAFE}) \quad (7)$$

En ambas expresiones T_d está expresada en grados Celsius y H en msnm.

Puede notarse que los ajustes que se hacen por regiones son mejores, lo que demuestra que estas dos regiones propuestas pueden tener características físicas diferentes. Utilizando las expresiones (6) y (7) se obtiene el mapa de temperatura de punto de rocío medio anual que se muestra en la Figura 7 (b). La expresión (7) se utiliza en las latitudes entre 5° N y 6.08° N, en las demás latitudes se utiliza la expresión (6).

Las Figuras 7 (a) y (b) son muy similares, encontrándose en la segunda temperaturas más bajas, lo cual era lo esperado debido a la relación entre la temperatura y el punto de rocío. Del mismo modo que ocurre con la temperatura, el mapa de T_d representa claramente la topografía de la región.

Las expresiones (6) y (7) muestran la dependencia de la humedad con la altura, pudiéndose utilizar para inferir la temperatura correspondiente al punto de rocío en aquellos sectores de las dos zonas donde no se disponga de información directa de este parámetro o de la humedad relativa. Naturalmente, debido a la reducida cantidad de información utilizada para obtener estas expresiones, éstas no pueden considerarse como definitivas, siendo no obstante, apropiadas para propósitos de evaluar condiciones de referencia.

4. Conclusiones

Debido a que la información encontrada en todas las estaciones no tiene los mismos años de registro ni las mismas variables climatológicas, los cálculos hechos con estos datos pueden tener cierto margen de error. Es pertinente recopilar toda la información existente de forma exhaustiva, con el fin de observar la variabilidad anual e interanual, y así mostrar los efectos de fenómenos como el ENSO, en sus diferentes fases, en los ciclos de las variables climáticas estudiadas, así como variaciones del ciclo diurno a lo largo del año y la influencia cambio climático sobre dichas variables.

A partir de la confrontación hecha con la relación de Clausius-Clapeyron puede verse que las máximas diferencias entre T y T_d se presentan en el trimestre junio, julio y agosto, y las menores se presentan en septiembre, octubre y noviembre coincidiendo con las temporadas secas y húmedas de Colombia. Es importante anotar que la diferencia entre T y T_d es un indicador directo de la oferta de humedad del aire y sobre todo de la facilidad de captación de agua para condensación en un momento dado. Por lo tanto en los meses donde esta diferencia es grande, la humedad atmosférica es menor y los costos para la obtención de agua serían mayores.

A nivel diurno, las variables climatológicas estudiadas responden con las condiciones termodinámicas impuestas por el ciclo diario del calentamiento radiativo y de insolación, llegando a considerarse éstos los principales componentes del ciclo diurno de la temperatura, que por ende afecta el comportamiento diurno de la la temperatura de rocío. La temperatura máxima se observa después del medio día (máxima exposición solar) y la mínima, un poco antes de la salida del sol; se observó que la temperatura de rocío muestra un comportamiento opuesto a éste. A la luz de Clausius-Clapeyron, se

corroboran las afirmaciones anteriores y se encuentra que es más difícil obtener la saturación del aire (mayor diferencia entre T y T_d) en las horas del medio día. Las mejores condiciones para lograr la condensación del vapor de agua en el aire se logran en las horas de la mañana, alrededor de las 7:00 a.m, esperándose aún mejores condiciones en las horas de la madrugada (5- 6 LST). Esta conclusión debe ser corroborada con la inclusión de nuevos datos a una escala temporal más fina.

Se verificó la dependencia lineal entre la temperatura y la altura, y se construyeron ecuaciones regionales para la temperatura de rocío mediante las cuales se pudo ilustrar una dependencia también lineal de ésta con la altura con un buen coeficiente de ajuste. Los resultados finales se ilustran en un mapa de colores los cuales representan la temperatura media ó de punto de rocío correspondiente a la coordenada espacial en el mapa.

Referencias Bibliográficas

- BALANCES HIDROLÓGICOS Y ATLAS DIGITAL DE ANTIOQUIA Tomo I, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín Facultad de Minas, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. 2001. p (2-23)-(2-38)
- CHAVES, B., Jaramillo, A., *Regionalización de la Temperatura del Aire en Colombia*. Avances en Recursos Hidráulicos. Número 6 Septiembre. 1999. p 37-42.
- POVEDA G. y O. J. Mesa. *On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-atmosphere-land interaction by a low-level jet*". Geophysical Research Letters. Vol. 27, No. 11, 1675-1678. June 1, 2000
- SAUCIER, W. J., *Principles of Meteorological Analysis*. Dover Publications, INC., New York., 1955. p 1-16.
- VELEZ J.I., Poveda G., Mesa O., *Balances hidrológicos de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia., 2000. p 30-40.
- WALLACE, J. M., Hobbs, P. V., 1977. *Atmospheric Science an Introductory Survey*. Academic Press, Inc. 1977. 467 p