

Caracterización Fisiográfica e Hidrológica: Cuenca Hidrográfica del Río Cali

Alvaro Hernán Montoya R.*

Yesid Carvajal E. **

Resumen

Se determinaron los parámetros fisiográficos, morfológicos e hidrológicos de la cuenca del río Cali (123.0 Km^2), localizada en la vertiente oriental de la cordillera Occidental, en el municipio de Santiago de Cali, Valle del Cauca (Colombia). Mediante la estimación del balance hídrico en la cuenca de su principal afluente, el río Pichindé (62.9 Km^2), fueron probados tres métodos para determinar la evapotranspiración potencial (Penman, Christiansen y Hargreaves); seleccionándose Hargreaves, para conducir al mejor ajuste en el balance hídrico. La precipitación media fue determinada empleando los métodos de Isoyetas, Thiessen y Promedio aritmético, encontrándose el de las isoyetas como el más apropiado para la zona. Combinando las variables de precipitación, evapotranspiración y escurrimiento para determinar el balance hídrico, con el objeto de analizar la dinámica espacial y temporal de la producción hídrica.

- *Ingeniero Agrícola, M.Sc. Ingeniería Civil, Area de Recursos Hidráulicos de la Universidad del Valle, Colombia*
- *Ingeniero Agrícola, M.Sc. Suelos y Aguas de la Universidad Nacional de Colombia. Profesor del Departamento de Mecánica de Fluidos y Ciencias Térmicas - Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle, Colombia.*

Abstract

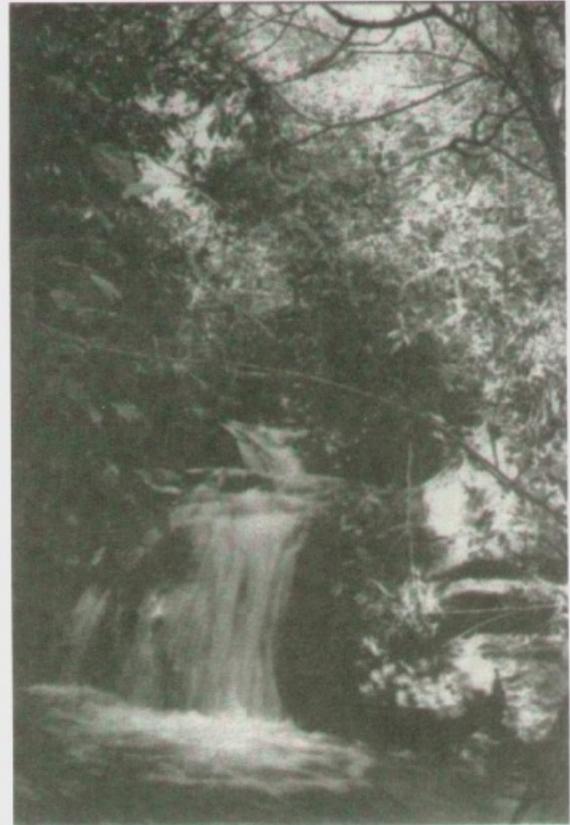
Physiographical, morphological and hydrological parameters were determined for the Cali river watershed (123 Km²), located in the eastern side of the western mountains chain, in the municipality Cali, Valle (Colombia). The water balance was estimated in the watershed of its main tributary, the Pichindé river (62.9 Km²), as well as the Cali river watershed. Three methods were tested to determine the potential evapotranspiration (Penman, Christiansen and Hargreaves). Hargreaves method was selected due it had the best adjustment for the water balance.

The mean rain was determined using isohyets, Thiessen and arithmetic mean methods, being the isohyets method the appropriate for the area. The water balance was determined combining the variables correspondents to rain, evapotranspiration and runoff to analyze the spatial and temporal dynamic of the water balance.

Introducción

La cuenca del río Cali forma parte del Parque Nacional Natural Los Farallones de Cali, considerado el tercero más importante de los Andes americanos por su alta biodiversidad; el Río Cali surte el acueducto de San Antonio, que cuenta con una capacidad de 1.50 m³/s y atiende la demanda de agua potable del 20% de la población urbana (400000 habitantes); también es fuente de generación de 1800 Kw de energía eléctrica, además de formar parte del sistema de drenaje y del patrimonio cultural, paisajístico y ornamental de la ciudad, al punto de ser considerado el río tutelar de los caleños.

En la cuenca se evidencian problemas de deterioro ecológico, relacionados entre sí: erosión, deforestación, quemadas, caza, conflictos por el uso del agua y del suelo, así como degradación de los recursos naturales; la cuantificación del recurso hídrico permitirá planificar y trazar estrategias para optimizar su manejo y conservación en aras de un desarrollo sostenible. Por lo anterior, se consideró relevante caracterizar fisiográficamente la cuenca y analizar el comportamiento de su balance hídrico, con el fin de aportar elementos básicos en el manejo racional y eficiente del recurso agua.



Parte alta de la cuenca del río Cali

Cortesía C.V.C

Metodología

Características fisiográficas

Fueron determinados los parámetros relacionados con las principales características fisiográficas de la cuenca del río Cali (área, posición, orientación, forma, elevación, pendiente y sistema de drenaje). Estos parámetros permitieron inferir, preliminarmente, el comportamiento hidrológico de la cuenca y en su estimación se aplicaron los procedimientos propuestos por KLOHN, W. y STANESCU, S. (1970)

Información hidrológica y red de medición

Con un nivel de agregación mensual multianual, fueron recopilados los registros de precipitación total, caudal medio, brillo solar medio, evaporación total, humedad relativa media, recorrido medio del viento,

temperatura media y tensión de vapor media, así mismo, con criterios de ubicación, tiempo de registro y vigencia de funcionamiento, se conformó una red hidrometeorológica integrada por ocho estaciones pluviométricas, dos estaciones limnigráficas (una por cada fuente) y tres estaciones climatológicas.

Análisis de consistencia

Aplicando la metodología de la curva de dobles acumulaciones, o dobles masas, según los principios de SEARCY, J.K., (1983) se verificó la consistencia de las series hidroclimatológicas, por medio de la comparación del dato acumulado de una estación con el de otra tomada como patrón; en este caso la estación Planta río Cali. Posteriormente, fueron ajustados los datos de precipitación inconsistentes.

Complementación de datos faltantes

Precipitación. Mediante la aplicación del método de las proporciones normales, se determinaron los datos faltantes de precipitación y los datos climatológicos. La ecuación empleada fue:

$$p_x = (P_x/3) * [(p_a/P_a) + (p_b/P_b) + (p_c/P_c)]$$

Donde:

P_x, P_a, P_b, P_c :	dato de precipitación total mensual de las estaciones X, A, B y C
p_x, p_a, p_b, p_c :	promedio mensual multianual de las estaciones X, A, B y C
X:	estación en estudio
A, B, C:	estaciones índices

Los datos faltantes de caudal se calcularon mediante la aplicación de regresiones lineales entre los datos mensuales de las dos estaciones de aforo.

Cálculo de los componentes del balance hídrico

- **Precipitación media mensual.** Fue determinada aplicando los métodos del promedio aritmético, los polígonos de Thiessen y las curvas isoyetas. Aunque Thiessen ofrece la ventaja de manejar áreas de ponderación constantes en el tiempo, su aplicación no se recomienda para regiones montañosas. Las isoyetas describen el régimen pluviométrico con mejor aproximación, pero están basadas en áreas de ponderación variables en el tiempo; por esta razón, y buscando agilidad en los

calculos, se estableció una correlación entre los valores estimados por Thiessen y las curvas isoyetas con el fin de "ajustar" el primer procedimiento para aplicarlo confiablemente.

- **Evapotranspiración potencial media mensual.** Aplicando los métodos de Hargreaves, Christiansen y Penman, que según CASTRO M., M.A. y GUZMAN M., O. (1985) presentan el mejor comportamiento en la zona, se determinó la evapotranspiración potencial media mensual. Para los métodos respectivos el lector puede remitirse a la bibliografía referenciada.

Calculando el balance hídrico en la cuenca del río Pichindé con cada método de evapotranspiración, se determinó el de mejor ajuste para aplicarlo a la cuenca del río Cali.

Cálculo del balance hídrico.

El cambio en el almacenamiento de la cuenca del río Cali se calculó, mensualmente, aplicando la siguiente expresión:

$$P - EVT - Q - \delta A - \Phi = 0$$

Donde:

P:	precipitación media (mm)
EVT:	evapotranspiración potencial media (mm)
Q:	caudal medio (mm)
δA :	cambio en el almacenamiento (mm)
Φ :	término residual o de diferencia (mm)

Hargreaves fue el método de evapotranspiración seleccionado, por presentar el menor error en el balance (0.47%) de la cuenca del río Pichindé, con respecto a Christiansen (-1.67%) y Penman (-14.91%).

Análisis y discusión de resultados

Por su alta pendiente (29.07%) y densidad de drenaje (2.36 Km/Km²), la cuenca presenta tendencia a concentrar grandes volúmenes de agua cuando ocurren lluvias muy intensas, ocasionando crecientes de gran magnitud que son favorecidas por el rápido escurrimiento, la deforestación y la intervención antrópica. Lo anterior coincide con resultados obtenidos por CARVAJAL E., Y. (1995) en otras cuencas de la región. Ver Tabla 1.

Tabla 1. Características Fisiográficas - Cuenca Río Cali

Característica	Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades	Observaciones
AREA	Superficie	A	122.90	km ²	Subcuenca
	Coefficiente Cubrimiento con Bloque	Cb	0.78		Buena Conservación
POSICION Y ORIENTACION	Posición		ZLT		Insolación Uniforme
	Orientación		W-E		EV y EVT Altas
FORMA	Factor de Forma	Kf	0.46		Rectangular
	Coefficiente de compacidad	Kc	1.27		Oval Red. A Oval Obl
	Indice de alargamiento	La	1.50		Alargada
	Indice asimétrico	las	3.78		Asimétrica
ELEVACION	Elevación Mediana	Em	2200	msnm	38% Area (1600 y 1200 m)
	Elevación Media	Hm	2111	msnm	Precipitación Alta
	Coefficiente de Masividad	Km	17.17	m/km ²	Producción Hídrica Alta
PENDIENTE CUENCA	Pendiente Media Cuenca	Sm	29.07	%	78% area (10 y 45%)
	Coefficiente Orográfico	Ko	7.26	km	Erosión Hídrica
SISTEMA DE DRENAJE	Longitud de Tributarios	I	290.40	km	Red Extensa
	Densidad de Drenaje	Dd	2.36	Km/Km ²	Drenaje Mod.Eficiente
	Coefficiente Torrencialidad	Ct	1.99		Torrencialidad Alta
CAUCE PRINCIPAL	Orden del Cauce Principal		5		Red Bifurcada
	Longitud	L	25.50	Km	Río Felida
	Sinuosidad	Sin	1.09		Disipación Energía Baja
	Pendiente Media	Sc	16.07	%	79% longitud (2 y 20%)

Más del 80% del área de la cuenca está ubicada por encima de los 1600 msnm, esto garantiza una producción hídrica importante y sostenible, debido a que las lluvias en la región son de tipo orográfico, incrementándose con la altura.

Precipitación media. La precipitación media anual es de 2042 mm y oscila entre 3600 mm y 1200 mm en

las partes alta y baja respectivamente, presentando un comportamiento bimodal que consta de dos períodos secos (diciembre-Febrero y junio-agosto), y dos lluviosos (marzo-mayo y septiembre-noviembre), con julio y abril como los meses extremos respectivamente. Ver Tabla 2.

Tabla 2. Precipitación media mensual multianual de la cuenca del río Cali (mm)

Mes	Isoyetas		Thiessen		Promedio	
	Pichindé	Cali	Pichindé	Cali	Pichindé	Cali
ENERO	154	133	118	109	126	111
FEBRERO	161	132	139	127	140	125
MARZO	218	182	165	152	169	156
ABRIL	300	251	228	212	232	214
MAYO	272	240	223	209	232	208
JUNIO	166	149	145	136	140	126
JULIO	93	84	80	77	80	73
AGOSTO	109	102	103	101	107	96
SEPTIEMBRE	176	157	150	142	152	137
OCTUBRE	276	244	232	216	242	220
NOVIEMBRE	257	222	167	158	192	178
DICIEMBRE	170	147	137	129	150	135
ANUAL	2351	2042	1887	1766	1962	1778

Caudal. Al igual que la precipitación, el escurrimiento se rige por un comportamiento bimodal, con dos períodos de caudales de estiaje (enero-marzo y julio-septiembre) y dos periodos de caudales altos (abril-junio y octubre-diciembre).

Existe una estrecha relación entre los regímenes hidrológicos y climatológicos, sin embargo los meses extremos de precipitación no coinciden con los de caudal, presentándose el desfase de un mes; debido a que después de un período seco, la precipitaciones iniciales recargan la matriz del suelo, reportando caudales mayores sólo un mes después. Por otro lado, al final de un período húmedo el caudal medio disminuye significativamente, cuando la reserva hídrica del suelo comienza a agotarse.

Evapotranspiración potencial media. Durante el año la cuenca del río Pichindé tiene el mismo comportamiento. No se presentaron grandes diferencias entre Hargreaves y Christiansen (ver figura 1), contrario a los valores de Penman que registran sobreestimación de la evapotranspiración media debido, posiblemente, al efecto de la velocidad del viento en la parte alta; además, ésta técnica, al igual que Christiansen, no considera el tipo de vegetación que influye determinadamente. Existe una estrecha relación inversa entre la altitud y la evapotranspiración, razón por la cual en la cuenca del río Pichindé es menor que en la del río Cali.

Descripción del régimen de evapotranspiración. En ambas cuencas, la distribución de la evapotranspiración, durante el año, registra un comportamiento bimodal aunque menos marcado que en la precipitación y el caudal. Se presentan altos valores en los meses de febrero, marzo, junio, julio, agosto y septiembre, alcanzando su máximo punto en agosto.

Balance hídrico sobre la cuenca del río Cali. Se presentó un error de cierre mayor de 9.56% (ver tabla 3) debido posiblemente a derivaciones efectuadas aguas arriba del punto de cierre, a la pérdida de caudal por percolación profunda a través de fallas geológicas y a trasvases hacia otras cuencas GIRALDO, L. F., 1993.

Se presentaron dos períodos de recarga hídrica: (marzo-mayo ($20.02 \times 10^6 \text{ m}^3$) y septiembre-diciembre ($22.35 \times 10^6 \text{ m}^3$)) y dos de descarga hídrica: (Enero-Febrero ($2.72 \times 10^6 \text{ m}^3$) y Junio-Agosto ($15.76 \times 10^6 \text{ m}^3$)). Ver Figura 2. Existe gran similitud entre los ambos períodos de recarga, lo que no ocurre con los periodos de descarga, donde la entrega del segundo semestre supera ampliamente la del primero (4.76 veces). La descarga ($18.38 \times 10^6 \text{ m}^3$) de la cuenca en las épocas de sequía es superada ampliamente (1.30 veces) por la recarga en la temporada de invierno ($42.37 \times 10^6 \text{ m}^3$) indicando, aparentemente, que no se llega a un punto de agotamiento absoluto del recurso hídrico, al quedar un remanente de $23.99 \times 10^6 \text{ m}^3$.

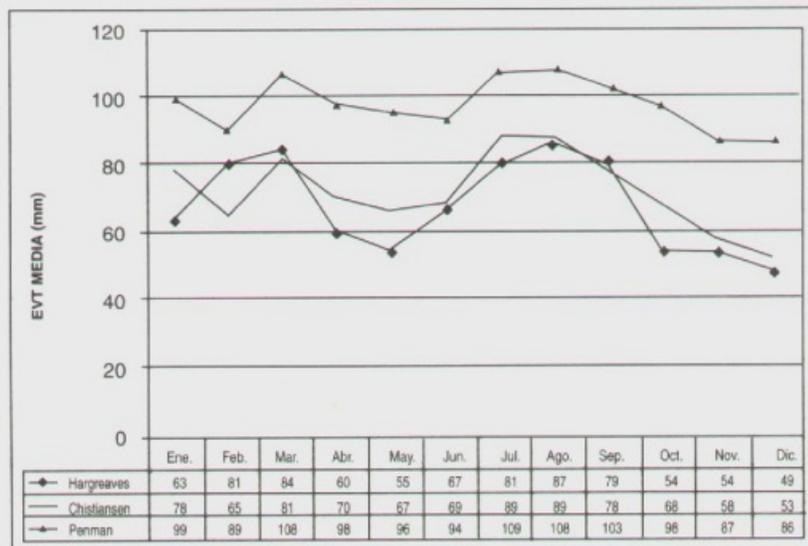


Figura 1. Evapotranspiración media - Cuenca del río Pichindé.

Tabla 3. Balance de producción hídrica de las cuencas de los ríos Pichindé y Cali (1970-1996)

Mes	Ene.	Feb.	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Pichindé													
P	154	161	218	300	272	166	93	109	176	276	257	170	2351
EVT (1)	63	81	84	60	55	67	81	87	79	54	54	49	813
Q	115	107	122	153	183	142	95	83	92	161	146	126	1526
ΔA	-24	-27	12	87	35	-44	-84	-61	4	61	57	-5	11
P	154	161	218	300	272	166	93	109	176	276	257	170	2351
EVT (2)	78	65	81	70	67	69	89	89	78	68	58	53	864
Q	115	107	122	153	183	142	95	83	92	161	146	126	1526
ΔA	-40	-11	15	77	23	-46	-91	-63	6	47	53	-8	-39
P	154	161	218	300	272	166	93	109	176	276	257	170	2351
EVT (3)	99	89	108	98	96	94	109	108	103	98	87	86	1175
Q	115	107	122	153	183	142	95	83	92	161	146	126	1526
ΔA	-61	-35	-12	49	-7	-70	-111	-82	-20	17	24	-42	-350
Cali													
P	133	132	182	251	240	149	84	102	157	244	222	147	2042
EVT (1)	64	79	84	62	58	70	87	93	83	58	56	49	842
Q	74	71	79	102	125	93	70	50	55	89	108	89	1005
ΔA	-5	-17	19	87	57	-14	-73	-40	19	97	58	8	195

- (1) Método Hargreaves
- (2) Método de Christiansen
- (3) Método de Penman

P: precipitación media (mm)
 EVT: evapotranspiración potencial media (mm)
 Q : caudal medio (mm)
 ΔA : cambio en el almacenamiento (mm)

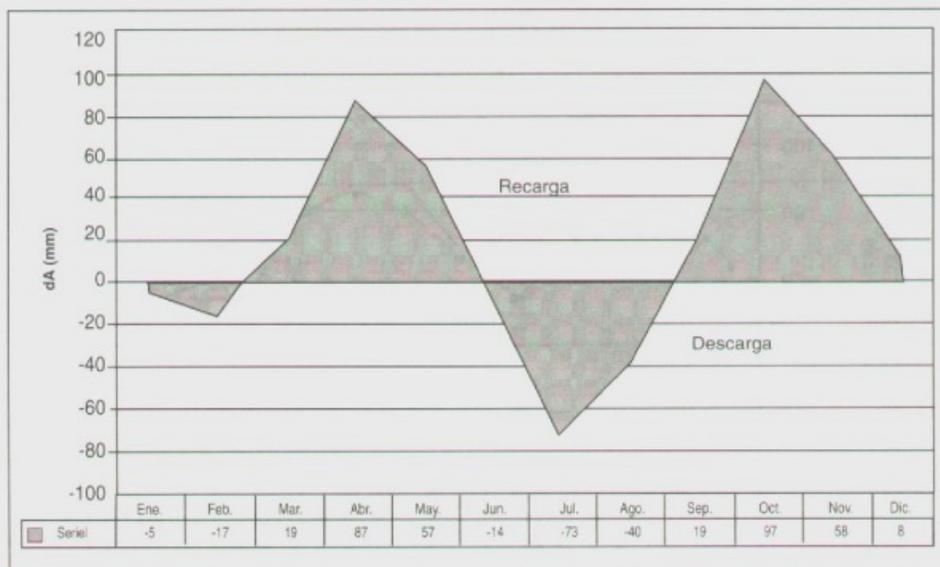


Figura 2. Régimen de almacenamiento - Cuenca del río Cali.

Conclusiones

Considerando el área de captación de la cuenca, la longitud de sus tributarios, la densidad y el grado de bifurcación de su red de drenaje, así como su distribución altitudinal, es de esperarse un aporte alto y moderadamente sostenido, al escurrimiento. Debido a la torrencialidad de la zona y a las pendientes medias de la superficie y del cauce, se manifiesta una tendencia a la concentración de grandes volúmenes de escurrimiento en un tiempo corto, ante una precipitación intensa, evidenciando una gran susceptibilidad de la cuenca a la erosión hídrica, con todas sus implicaciones bióticas, económicas y sociales.

- Pese a la alta producción hídrica de la cuenca (caudal específico medio anual de 31.81 l/s-Ha), hay grandes pérdidas de agua por evapotranspiración (41.23% de la precipitación total anual), como consecuencia de su orientación respecto a la incidencia de los rayos solares y a la dirección del desplazamiento de las corrientes de aire. Su cálculo mediante el método de Hargreaves ofrece las ventajas de tener en cuenta el tipo de vegetación y la fácil sistematización. La menor evapotranspiración de la cuenca del río Pichindé (3.44% menos) y su mayor precipitación (15.13% más), con respecto a la cuenca del río Cali, explican, en parte, su mayor caudal específico medio anual (48.57 l/s-Ha). Por este motivo, es determinante la conservación de su ecosistema.
- Debido al régimen de almacenamiento y a las características fisiográficas, se deduce que la cuenca cuenta con una moderada capacidad de regulación no obstante el manejo conservacionista dado a sus recursos naturales, especialmente en las partes alta y media (cuenca del río Pichindé). El bajo aporte superficial al caudal en períodos secos, está compensado por el suministro de la reserva almacenada durante los períodos de invierno.
- Las oscilaciones a nivel mensual del régimen de precipitación media (entre 84 y 251mm) indu-

cen a fluctuaciones en el régimen del caudal medio del río Cali (entre 2.28 y 5.72m³/s). El bajo aporte superficial al caudal en períodos secos, está compensado por el suministro de la reserva almacenada durante los períodos de invierno. El conocimiento de esta dinámica hidrológica permitirá planificar anualmente un monitoreo preventivo en zonas expuestas a desastres naturales ocasionados por el invierno, tales como: deslizamientos e inundaciones, en el área rural y urbana. Así mismo, puede programarse, con suficiente anticipación, la atención a sectores de la ciudad que tradicionalmente, cada verano, sufren racionamientos en el servicio de agua potable.

Recomendaciones

- Es necesario darle un manejo conservacionista a los recursos naturales de la zona, incluyendo reforestación de áreas intervenidas, orientación y asesoría a la población de la zona en sus prácticas agrícolas y ganaderas, y supervisión en el diseño, construcción y utilización de obras civiles. La reserva natural debe continuar preservándose de la intervención antrópica, por ser un ecosistema extremadamente vulnerable que ejerce una función reguladora de gran relevancia. En orden de prioridades, está la cuenca del río Pichindé ya que aporta la mayor producción hídrica, en comparación con la del río Cali.
- Dadas las oscilaciones de la disponibilidad de agua aprovechable en el río Cali, es conveniente regular su caudal mediante un embalse que permita, durante el verano, aprovechar los excedentes del invierno. Mientras tanto, debe restringirse la oferta de agua a partir de la corriente del río Cali, con fines agrícolas, industriales y domiciliarios. Adicionalmente, es necesario ajustar el balance hídrico, indagando sobre las captaciones de agua que se realizan en las partes alta y media, con el objeto de garantizar la disponibilidad del recurso para el acueducto en los períodos secos.

Bibliografía

1. CARVAJAL, Yesid. Análisis estadístico de precipitación y caudal en la cuenca del río Cali. Tesis de grado (Magister de Suelos y Aguas). Universidad Nacional de Colombia. Palmira, 1995.
2. CASTRO, Miguel y GUZMAN, Oscar. Evaluación de la evapotranspiración potencial en Colombia. Santafé de Bogotá: Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras - HIMAT, 1985.
3. GIRALDO, Luis Freddy. Identificación de pérdidas de caudal en la subcuenta hidrográfica del río Cali. Informe Técnico (Resumen). Santiago de Cali: Corporación Autónoma Regional del Cauca - C.V.C., 1993.
4. KLOHN, Wulf y STANESCU, Silvio. Magnitudes fisiográficas e índices morfométricos relacionados con la hidrología. Santafé de Bogotá: Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología, SCMH, 1970.
5. SEARCY, James y HARDISON, Clayton. Curva de dobles masas. Santafé de Bogotá: Servicio Colombiano de Meteorología e Hidrología SCMH, 1970.