

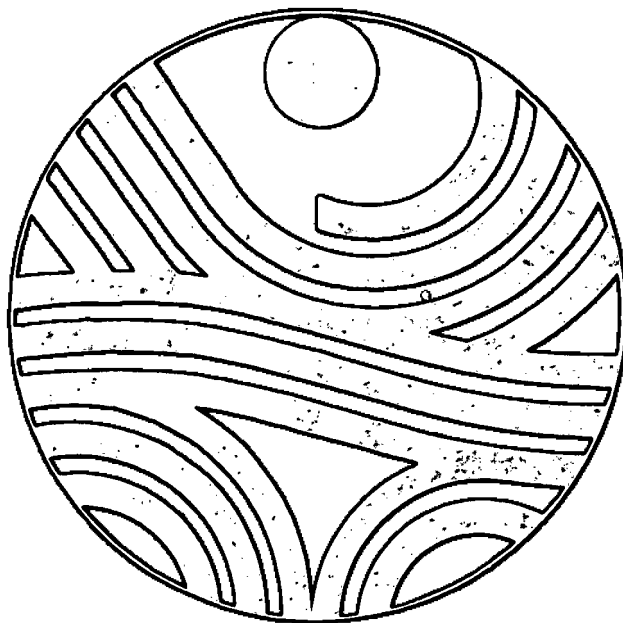
UNESCO - ORCYT
Programa Hidrológico Internacional

UNIVERSIDAD FEDERAL DE RIO DE JANEIRO
Departamento de Meteorología

BALANCE HIDRICO AEROLOGICO
DE AMERICA DEL SUR

por

José Marques
Elza Correia Sucharov
Dulce Cardoso Washington



Río de Janeiro, enero de 1990

UNESCO - ORCYT
Programa Hidrológico Internacional

UNIVERSIDAD FEDERAL DE RIO DE JANEIRO
Departamento de Meteorología

BALANCE HIDRICO AEROLOGICO
DE AMERICA DEL SUR

por
José Marques
Elza Correia Sucharov
Dulce Cardoso Washington

Río de Janeiro, enero de 1990

Las ideas expresadas por los autores de los artículos firmados pertenecen a los mismos y no reflejan necesariamente las de la Unesco. Las designaciones empleadas, las expresiones y la presentación adoptada para todos los materiales de esta publicación, no deben ser interpretadas por parte de algún país o territorio como una toma de partido en relación con su régimen político o con el trazado de sus fronteras.

Publicado e impreso en 1990 por la Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la Unesco para América Latina y el Caribe - ORCYT - Montevideo - Uruguay

© Unesco 1990

BALANCE HIDRICO AEROLOGICO DE AMERICA DEL SUR

INDICE

	Pág.
1. PRESENTACION Y AGRADECIMIENTOS.....	1
2. BALANCE HIDRICO AEROLOGICO	1
3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	4
4. ANTECEDENTES.....	4
5. INFORMACIONES UTILIZADAS.....	5
5.1 Observaciones meteorológicas de la capa de aire superior.....	5
5.2 Datos de precipitación	5
6. METODOLOGIA.....	6
6.1 Metodología para obtención del agua precipitable, W_p	7
6.2 Metodología para obtención del flujo de vapor de agua.....	7
6.3 Metodología para obtención de la divergencia del campo de flujo de vapor de agua.....	8
7. RESULTADOS OBTENIDOS.....	10
7.1 Almacenamiento medio de vapor de agua en la atmósfera (agua precipitable, W_p)	10
7.2 Flujo de vapor de agua atmosférico.....	10
7.3 Divergencia del campo de flujo de vapor de agua atmosférico.....	10
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE ACCIONES FUTURAS SOBRE EL BALANCE HIDRICO AEROLOGICO DE LA REGION	11
9. LITERATURA CITADA O CONSULTADA.....	12

FIGURAS

	Pág.
1. Países de América del Sur	13
2. Estaciones aerológicas de América del Sur utilizadas en el período 1971-1973.....	14
3. Modelo utilizado para la caracterización de los componentes aéreos del ciclo aerológico.....	15
4. Aspectos físicos de América del Sur.....	16

CUADROS

1. América del Sur: relación de estaciones de radiosonda utilizadas.....	17
--	----

MAPAS

1. Almacenamiento de vapor de agua en la atmósfera: Agua precipitable media para el mes de enero - 1971/1973.....	18
2. Almacenamiento de vapor de agua en la atmósfera: Agua precipitable media para el mes de julio - 1971/1973	19
3. Flujo de vapor de agua atmosférico - media para el mes de enero - 1971/1973.....	20
4. Flujo de vapor de agua atmosférico - media para el mes de julio - 1971/1973	21
5. Divergencia media del campo del flujo de vapor de agua atmosférico para el mes de enero - 1971/1973.....	22
6. Divergencia media del campo del flujo de vapor de agua atmosférico para el mes de julio - 1971/1973.....	23

1. PRESENTACION Y AGRADECIMIENTOS

En la Fase III del Programa Hidrológico Internacional de la Unesco (1984-1989) el Tema I se refiere a los "Estudios de los elementos del ciclo hidrológico y la determinación de los balances hídricos", en el cual pueden destacarse dos proyectos:

- 1.1 Utilización de datos relativos al transporte atmosférico de humedad sobre los continentes y grandes cuencas fluviales para la estimación de los balances hídricos y otros fines.
- 1.2 Aplicación y perfeccionamiento de la metodología de estudio sobre balances hídricos de grandes cuencas fluviales y cuerpos de agua de países y continentes.

Como contribución a estos proyectos, la Unesco, a través de su Oficina Regional de Ciencia y Tecnología para América Latina y el Caribe (ORCYT), patrocinó, a partir de comienzos de la década del 80, el estudio del balance hídrico aerológico de América del Sur y sus componentes, ejecutado por un equipo del Departamento de Meteorología de la Universidad Federal de Río de Janeiro.

El presente informe presenta los resultados de los estudios realizados por el equipo coordinado por el señor José Marques y constituido por las señoras Elza Correia Sucharov y Dulce Cardoso Washington. El Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico del Brasil (CNPq) apoyó el estudio, que pudo llevarse a cabo gracias a la cooperación recibida de los Servicios Meteorológicos de Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Guayana Francesa, Guyana, Paraguay, Perú, Suriname, Uruguay y Venezuela (Figura 1).

Este informe constituye, por lo tanto, la contribución de América del Sur a los proyectos 1.1 y 1.2 de la III Fase del Programa Internacional de la Unesco.

Muchas personas contribuyeron directa o indirectamente a la realización de este trabajo. Entre todas ellas, los autores desean destacar el apoyo decisivo recibido de las siguientes autoridades y personas:

- Directores de los Servicios de Meteorología e Hidrología u organismos competentes de América del Sur que proporcionaron las informaciones meteorológicas.
- Señores Nelson da Franca Ribeiro dos Anjos (Unesco/París) y Carlos Fernández-Jáuregui y Christiaan Gischler (Unesco/ORCYT), quienes posibilitaron nuestra participación en el Programa Hidrológico Internacional.

2. BALANCE HIDRICO AEROLOGICO

El ciclo hidrológico es una secuencia cerrada de fenómenos naturales en los cuales la superficie terrestre libera constantemente agua hacia la atmósfera en estado de vapor que, a su vez, es devuelta a la superficie en estado líquido, sólido o en ambos.

La parte aérea del ciclo hidrológico se mantiene a costa de las energías que intervienen en los siguientes fenómenos naturales:

- transferencia de agua de la superficie terrestre hacia la atmósfera, por evaporación y/o transpiración;
- condensación parcial del vapor de agua contenido en la atmósfera, constituyendo las nubes, nieblas y neblinas, pudiendo también contener los hidrometeoros agua en la fase sólida (cristales de hielo);
- transporte de agua en cualquiera de sus estados, debido a la circulación atmosférica;
- precipitación y/o acumulación del agua atmosférica sobre la superficie terrestre.

La fuente que mantiene la parte aérea del ciclo hidrológico proviene de procesos termodinámicos e hidrodinámicos en los cuales la radiación solar es transformada en energía térmica, provocando la evaporación del agua y su transferencia hacia la atmósfera, la cual, a su vez y en función de condiciones favorables, se condensa en gotas microscópicas que originan las nubes y nieblas. Al alcanzar estas microgotas dimensiones que ya no

pueden fluctuar, caen por acción de la gravedad, constituyendo así las precipitaciones de las más variadas características e intensidades, o bien pueden evaporarse en parte, permaneciendo en la atmósfera.

Son causas o factores fundamentales del ciclo hidrológico:

- la energía radiante, constituida por las radiaciones solares y terrestres;
- la energía potencial, debido al campo de la gravedad terrestre;
- la energía asociada a los cambios de estado (fase), con variación de la energía interna.

Estos estados de energía tienen lugar en el sistema suelo-atmósfera e inducen la continua circulación del elemento agua en el planeta.

La cuantificación de los términos de transferencia, condensación, almacenaje y transporte del agua que ocurren en la atmósfera constituye el balance hídrico aerológico.

En los últimos tiempos el balance hídrico ha merecido el interés de los meteorólogos en conexión con los problemas originados por las alteraciones de la naturaleza artificial de la atmósfera como la eliminación de la cobertura vegetal y el aumento del dióxido de carbono en la capa gaseosa de la tierra, por ejemplo.

Las fluctuaciones en algunos aspectos específicos del balance hídrico pueden ser el reflejo de los cambios del clima. Por otro lado, determinados componentes del balance hídrico reflejan una influencia del ambiente climático.

El ciclo hidrológico es el resultado de procesos termodinámicos e hidrodinámicos en los que intervienen varios tipos de energía.

La precipitación (condensación del vapor de agua atmosférico y su caída en la atmósfera) y la evaporación son dos procesos íntimamente relacionados al balance energético. Para tener una idea de volumen, la evapotranspiración media mensual de la cuenca amazónica es de 105mm, con una superficie de 6 millones de km², que equivale a cerca de 243.000 m³/s.

Resulta así evidente en qué medida están relacionados el balance energético, los modelos climáticos y el balance hídrico.

La cuantificación de los componentes del balance hídrico en una región del globo está basada en lo que ocurre en la superficie terrestre empleando la ecuación fundamental de la Hidrología Clásica:

$$\text{Precipitación} - \text{Evaporación} = \text{Caudal}$$

Ahora bien, el ciclo hidrológico presenta dos caminos distintos o ramas: uno aéreo en el cual predomina el transporte del agua en la fase de vapor y uno terrestre en el cual predomina la fase líquida. En la interfase de separación de las dos ramas ocurren fenómenos complejos y los mecanismos físicos allí involucrados no son simples pues ni la atmósfera ni la superficie pueden ser consideradas como medios homogéneos.

De esta forma es necesario tener en consideración las características locales y regionales de los fenómenos hidrológicos.

Entre las limitaciones que tiene la aplicación de la ecuación clásica de la hidrología está el hecho de que no informa sobre el origen del agua para la región. Es una ecuación fundamental de balance que no contiene ningún término que traduzca la evolución del ciclo. Es una ecuación de condición que no contiene ninguna relación de causa y efecto y no es, por lo tanto, una ecuación de la dinámica del ciclo hidrológico (PEIXOTO, 1968).

Los estudios de la Circulación General de la Atmósfera llevaron a una nueva metodología de investigación hidrológica, basada en el análisis de los campos de las diversas macro-magnitudes que caracterizan el estado de la

atmósfera y la dinámica del agua en la fase de vapor. Por ejemplo, la divergencia del campo de flujo del transporte aéreo de vapor de agua se constituyó en un método independiente para estimar, a nivel climatológico, el caudal en grandes cuencas, aún mismo cuando no se conocían los valores locales de la precipitación y de la evapotranspiración. Hasta hace poco se creía que la fuente de agua para el proceso de la precipitación era debido a la evaporación local, es decir, que el fenómeno evaporación-precipitación era un proceso "in situ". Los estudios recientes que aplican la metodología aquí abordada demostraron que el transporte de vapor de agua atmosférico se constituyó en el más importante compartimento de vapor de agua para la secuencia del ciclo hidrológico.

En 1950 BENTON et al. evidenciaron el papel del vapor de agua atmosférico en el ciclo hidrológico y establecieron las relaciones entre el ciclo y las masas de aire que se desplazan sobre la cuenca del Misisipi. A partir de datos aerológicos los autores determinaron el flujo total de vapor de agua de origen marítimo y continental sobre la cuenca y elaboraron un balance hídrico completo de la misma. Mostraron que aunque solamente un pequeño porcentaje de la humedad oceánica entregada sobre el continente es precipitada, la mayor parte de la lluvia caída se originó en la masa de aire de origen oceánico. Estos resultados contradicen los puntos de vista anteriores, que minimizaban el rol desempeñado por el flujo de vapor de agua atmosférico en la formación de las lluvias y mantenía el concepto de la fuente terrestre como fuente principal de la precipitación.

BENTON y ESTOQUE (1954) estudiando la transferencia de vapor de agua sobre el continente norteamericano encontraron una semejanza entre la distribución espacial de las lluvias y los modelos de flujo. Estimaron la evaporación y la escorrentía encontrando valores bien próximos a los hallados por otros autores empleando otras metodologías.

Otro componente importante del balance hídrico aerológico es el agua precipitable (W_p) existente en una columna de la atmósfera y que representa, por definición, la masa total de agua que sería obtenida de todo el vapor de agua de la columna, de área unitaria, y que se condensara en un plano horizontal. Con relación a este almacenaje, BENWELL (1965) cita que el término W_p no debe ser interpretado como la cantidad de agua que puede, de hecho, ser precipitada mediante un proceso físico cualquiera. Para los fines prácticos, la W_p puede ser considerada como suficientemente representativa del vapor de agua disponible para el proceso de precipitación.

En relación al continente sudamericano MARQUES (1976, 1978) aplicó la metodología para la cuenca amazónica evidenciando el rol de los océanos y de la selva amazónica en el desarrollo y mantenimiento de los sistemas generadores de la precipitación del área. Entre otros, concluyó que el océano Atlántico contribuyó con 46% al vapor de agua responsable de la precipitación y que la selva aportó los 54% restantes por la evaporación local.

En el marco del Programa General del Decenio Hidrológico Internacional de Unesco, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) publicó una amplia y detallada reseña sobre los estudios del flujo de vapor de agua y de su divergencia, considerándolos como representativos del conocimiento adquirido hasta entonces (PALMEN, 1967).

Recientemente, la misma OMM publicó algunos de los progresos más actuales sobre el tema, analizando las nuevas investigaciones y experiencias.

Desde el punto de vista de la dinámica del clima, el vapor de agua atmosférico influye de manera muy relevante en la absorción selectiva de la radiación solar del balance energético en el sistema globo-atmósfera.

3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Se pretende, a partir del concepto de la rama aérea del ciclo hidrológico, estudiar el comportamiento del vapor de agua sobre el continente sudamericano procurando:

- mostrar que los procesos hídricos que tienen lugar en América del Sur son el resultado de interacciones de la configuración del continente, por un lado, y por otro que los movimientos de la atmósfera en escala macro y meso, son los resultados del balance energético;
- presentar un estudio de la ocurrencia y transferencia horizontal del vapor de agua sobre el continente;
- identificar las áreas de divergencias positivas y negativas del campo de flujo de vapor de agua, las cuales están relacionadas con áreas de alta precipitación y evapotranspiración, respectivamente;
- identificar la distribución del almacenaje de vapor de agua sobre el continente.

4. ANTECEDENTES

En la Guía Metodológica para elaboración del balance hídrico de América del Sur, preparada por un grupo de trabajo patrocinado por Unesco/ORCYT entre 1977 y 1981, en uno de los capítulos trata sobre el Balance Hídrico Aerológico.

El balance hídrico aerológico de América del Sur fue iniciado por el equipo del Departamento de Meteorología de la Universidad Federal de Río de Janeiro a comienzos de la década del 80. El señor José Marques, coordinador del equipo, fue el responsable del capítulo sobre balance hídrico aerológico de la Guía Metodológica de Unesco.

Durante la II Reunión de los Comités Nacionales de América del Sur para el Programa Hidrológico Internacional (Brasilia, 1982), la elaboración del balance hídrico aerológico fue considerada prioritaria.

En 1984, durante el Primer Seminario Internacional de Hidrología y Climatología de la Amazonia realizado en Manaus, en el ámbito del Tratado de Cooperación Amazónica, se aprobó la Recomendación N° 2 a los países amazónicos, en el sentido de "que se dedique atención especial a la expansión y modernización de las redes de observación meteorológica (de superficie y de altitud) y a la hidrología de la región amazónica".

Durante el Primer Taller sobre el Balance Hídrico de América del Sur (La Paz, 1987) los participantes aprobaron dos recomendaciones específicas sobre el balance hídrico aerológico de América del Sur:

"A los países sudamericanos y Guayana Francesa

- d) facilitar los datos de las estaciones de radiosonda para el período 1971-1973 al grupo de trabajo de la Universidad Federal de Río de Janeiro en cooperación con otras universidades de la región interesadas en el tema, para que pueda concluirse el balance hídrico aerológico de América del Sur."

"A la Unesco

- e) facilitar apoyo técnico y financiero al equipo de investigadores de la Universidad Federal de Río de Janeiro para que pueda concluir en diciembre de 1989 el balance hídrico aerológico de América del Sur."

Los datos existentes en los países fueron proporcionados al equipo de la Universidad Federal de Río de Janeiro, y Unesco facilitó el apoyo necesario para que el trabajo pudiera concluirse en el plazo previsto.

En 1988 y 1989 con los datos de las estaciones seleccionadas se realizó el análisis necesario para la preparación de los mapas correspondientes y finalmente, tal como estaba previsto, se concluyó el trabajo a fines de 1989.

5. INFORMACIONES UTILIZADAS

5.1 Observaciones meteorológicas de la capa de aire superior

Los datos necesarios para el cálculo de flujos y de vapor de agua y del agua precipitable fueron determinados a partir de observaciones meteorológicas diarias del aire superior (radiosondas) realizadas por los servicios de meteorología e hidrología pertenecientes a los países del continente, abarcando el período 1971-1973.

Inicialmente se disponía de un archivo en estado crudo, que cubría el período 1968-1976 grabado en dos cintas magnéticas de 2400 pies cada una. Lamentablemente la calidad de la información allí archivada era inferior a lo deseable, ya que faltaban muchos datos o no presentaban la necesaria confiabilidad.

Se concluyó que la tarea inicial del proyecto sería la concentración de esfuerzos que permitiesen la obtención de un archivo confiable de datos de radiosondas. Aún con la obtención de los datos posteriores de los servicios de meteorología e hidrología, obtenidos gracias a la intermediación de Unesco/ORCYT, sólo fue posible generar un archivo que satisfaga los requerimientos del proyecto cubriendo el período 1971-1973.

La lista de las estaciones utilizadas aparece en el Cuadro 1 y su localización se puede ver en la Figura 2.

Se analizaron los datos de 52 estaciones, siendo 11 de Argentina, 2 de Bolivia, 16 de Brasil, 2 de Chile, 3 de Colombia, 2 de Ecuador, 3 de la Guayana Francesa, 1 de Paraguay, 7 de Perú y 5 de Suriname. Al final se seleccionaron apenas las 30 estaciones indicadas en el Cuadro 1.

En resumen, las actividades realizadas para la obtención de los datos necesarios fueron las siguientes:

- manejo de listados computarizados, un equipo B-6800, y análisis preliminar de la situación del material listado;
- relevamiento, en los Sumarios Climatológicos de Altitud existentes en los archivos del Instituto Nacional de Meteorología (INEMET) del Brasil, en busca de datos originales con el fin de rellenar lagunas de información y/o corregir errores en las cintas grabadas;
- investigaciones en las cartas sinópticas diarias de superficie y de altitud, buscando informaciones faltantes o correctas;
- grabación en cinta magnética de los datos corregidos, o la complementación de los datos ausentes.

Se grabaron los siguientes datos para cada mes del período 1971-1973:

- medias mensuales, por nivel isobárico patrón (1000, 850, 700 y 500 hPa), de los valores de la temperatura del aire (T), de la humedad relativa (UR), de la presión de vapor (e), de la humedad específica (q) y de la dirección (dd) y velocidad del viento (ff);
- valores diarios, por nivel isobárico patrón, de los componentes (u y v) del viento y de los productos (qxu y qyv) así como de sus variaciones en el tiempo de los componentes $q' \times u'$ y $q' \times v'$;
- componentes zonal y meridional de los flujos diarios de vapor de agua, para las subcamadas 1000/850, 850/700 y 700/500 hPa y para la camada total 1000/500 hPa, así como para las variaciones temporales de estas componentes.

5.2 Datos de precipitación

Lamentablemente la calidad de las informaciones pluviométricas era de nivel aún inferior a la de las radiosondas, ya que además de los problemas citados en el punto anterior, era menor la representatividad espacial de la información pluviométrica. Uno de los objetivos era calcular la evapotranspiración real así como algunos factores de correlación espacial entre los valores de la divergencia del flujo de vapor de agua y la precipitación y evapotranspiración. Se llegó a la conclusión de que la masa de datos disponible era insuficiente para esta tarea.

6. METODOLOGIA

La ecuación que representa el balance hídrico de la fase atmosférica, en cada punto del globo, está dada por:

$$\frac{\partial W_p}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{Q} = \overline{E - P}$$

donde

W_p — representa la cantidad de vapor de agua existente en una columna de la atmósfera, de base unitaria, que se extiende desde la superficie hasta el nivel de los 500 hPa. Es estimada en g/cm² o mm. Corresponde a la altura que alcanzará el agua en esa columna si todo el vapor de agua se condensase y allí se depositase

$\frac{\partial W_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{g} \int q \, dp \right]$ — representa la variación local del almacenaje atmosférico de vapor de agua integrado entre los niveles p_0 y p_1 en la atmósfera

Q — representa la cantidad de agua en la fase vapor que a cada segundo atraviesa una "fresta" de una pared hipotética, de 1 cm de ancho y que se extiende desde la superficie hasta el nivel de los 500 hPa. E es estimada en g/cm.s

$\nabla \cdot \vec{Q} = \nabla \cdot \left[\frac{1}{g} \int \vec{q} v \, dp \right]$ — representa la divergencia horizontal del campo de flujo atmosférico de vapor de agua, integrado entre los niveles p_0 y p_1

g — aceleración de la gravedad

q — humedad específica media entre los niveles isobáricos p_0 y p_1

v — viento resultante horizontal entre los niveles isobáricos p_0 y p_1

$\overline{E - P}$ — representa la diferencia media entre la evaporación y la precipitación

6.1 Metodología para obtención del agua precipitable (W_p)

Para el cálculo de la W_p se utilizó las informaciones de temperatura del aire, (T) y de la humedad relativa (UR), seleccionándose los niveles isobáricos patrón de 1000, 850, 750 y 500 hPa. La limitación del nivel superior en 500 hPa se debió al hecho de que para altitudes mayores la contribución del vapor de agua es mucho más pequeña.

- la camada total limitada por los niveles patrón (NIP) de $p = 1000$ y 500 hPa fue dividida en las subcamadas 1000/850, 850/700 y 700/500 hPa, conforme al esquema de la Fig. 4 de Unesco/ORCYT (1982), pág. 94;
- los valores de q correspondientes a cada superficie isobárica (P) fueron calculados a partir de los datos de la temperatura del aire (T) proporcionados por las radiosondas. Con el par de valores P y T se hallaron los valores tabulados en las Smithsonian Meteorological Tables, de la presión de vapor saturante, e_s , lo cual posibilitó el cálculo según la expresión:

$$q = \frac{0.622 \times UR \times e_s}{100 \times P}$$

- la humedad específica media, \bar{q} , para cada subcamada fue obtenida a partir de la media de los valores de q determinados para las superficies isobáricas limitantes de la subcamada;
- los valores de los espesores de las subcamadas, ΔP_i , entre dos superficies isobáricas patrón consecutivas fueron obtenidas por la diferencia entre los valores de la presión entre las dos superficies limitantes de la subcamada.

Así:

i	subcamada (hPa)	ΔP_i (hPa)
1	1000/850	150
2	850/700	150
3	700/500	200

- diariamente, para cada subcamada, se calculó que la contribución parcial del agua precipitable W_p' , utilizando los valores de q ; la W_p del día se expresa por la suma de las contribuciones parciales de la subcamada, es decir,

$$W_p \cong \sum W_p' \cong 10.2 \sum q \Delta p_i$$

donde $i = 1, 2$ ó 3 , designa a las subcamadas limitadas por las superficies de niveles isobáricos patrón.

6.2 Metodología para obtención del flujo de vapor de agua \dot{Q}

Se consideraron los mismos datos y niveles que para la obtención de la W_p , agregando los datos del viento (dirección y velocidad).

- las divisiones de la camada 1000/500 hPa en subcamadas así como el cálculo de la humedad específica fueron realizados en forma análoga a lo expuesto en 6.1;
- para cada día y cada NIP se calcularon los componentes u_i y v_i del viento (V); por convención los signos de u y v son positivos para el este y norte respectivamente. Tales signos se obtienen a partir del viento informado en el mensaje meteorológico, según el cuadro de convenciones de signos que aparece a continuación.

Dirección del viento V informada	Componente	
	u	v
360 < θ < 90	<0	<0
90	-V	0
90 < θ < 180	<0	>0
180	0	+V
180 < θ < 270	>0	<0
270	+v	0
270 < θ < 360	>0	<0
360	0	-V

— se obtuvo para cada día y cada NIP los productos $q_v \times u_i$ y $q_v \times v_i$ así como el flujo medio por subcamada. La suma de estos proporcionó el flujo total diario de la camada 1000/500 hPa, con los cuales se calcularon los promedios mensuales por subcamada y la camada total 1000/500 hPa.

6.3 Metodología para obtención de la divergencia del campo de flujo de vapor de agua, $\nabla \cdot \vec{Q}$

La divergencia del campo del flujo horizontal de vapor de agua se expresa en coordenadas esféricas por :

$$\nabla \cdot \vec{Q} \cong \frac{1}{r \cos \phi} \left[\frac{\partial Q_\lambda}{\partial \phi} + \frac{\partial}{\partial \lambda} (Q_\phi \cos \phi) \right]$$

donde

$$Q_\lambda = \frac{1}{g} \int q_u dP$$

$$Q_\phi = \frac{1}{g} \int q_v dP$$

siendo

Q_λ e Q_ϕ componentes zonal y meridional, respectivamente, del flujo del vapor de agua;

u y v componentes zonal y meridional, respectivamente, del viento horizontal

λ latitud

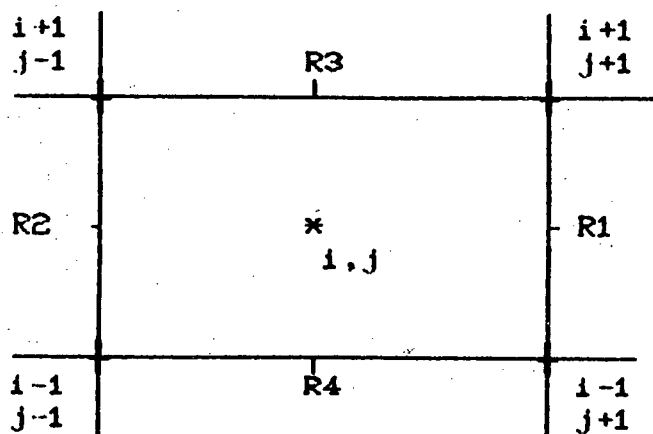
ϕ longitud

r radio medio de la Tierra, igual a 6370 km

Los valores medios mensuales de las componentes fueron representados en cartas sinópticas, se trazaron los campos zonal y meridional de dichas componentes y, a partir de ellos, se obtuvieron los valores en los puntos de intersección en una malla de 5 x 5 grados.

Aplicando el método de las diferencias finitas para la malla de 5 grados de lado, se obtiene para un punto en el centro de la malla:

$$\nabla \cdot \vec{Q} = \frac{1}{r \cos \phi} \frac{180}{\pi} \left[\frac{R1 - R2}{5} + \frac{R3 \cos \phi_{i+1} - R4 \cos \phi_{i-1}}{5} \right]$$



donde:

$$R1 = \frac{1}{2} [(Q_{\lambda})_{j+1}^{i+1} + (Q_{\lambda})_{j+1}^{i-1}]$$

$$R2 = \frac{1}{2} [(Q_{\lambda})_{j-1}^{i+1} + (Q_{\lambda})_{j-1}^{i-1}]$$

$$R3 = \frac{1}{2} [(Q_{\phi})_{j+1}^{i+1} + (Q_{\phi})_{j+1}^{i-1}]$$

$$R4 = \frac{1}{2} [(Q_{\phi})_{j-1}^{i+1} + (Q_{\phi})_{j-1}^{i-1}]$$

Se colocaron los valores de la divergencia en el centro de cada cuadrícula según definido arriba y se trazó el campo de la divergencia, obteniéndose las áreas negativas y positivas.

7. RESULTADOS OBTENIDOS

Se obtuvieron los valores, para cada mes, de \bar{Q} , $\nabla \cdot \bar{Q}$ y W_p . En el presente informe se presentan solamente los resultados para enero y julio, considerados aquí como representativos de las situaciones de verano e invierno de nuestro hemisferio. De manera general los aspectos fisiográficos (Figura 4) tienen un papel importante en el comportamiento de los flujos atmosféricos.

7.1 Almacenamiento medio de vapor de agua en la atmósfera (agua precipitable), W_p

Las cartas de almacenaje atmosférico de vapor de agua, Mapas 1 y 2, muestran una configuración, durante todo el año, con máxima concentración sobre la cuenca amazónica, decreciendo progresivamente hasta el sur del continente. Presenta solamente una diferencia cuantitativa en dicha cuenca cuando se comparan situaciones estacionales, con una disminución del verano al invierno, esta presenta una situación más seca. Tal variación estacional evidencia una nítida influencia de posicionamiento de la Zona de Convergencia Intertropical ITCZ, así como de posicionamiento del anticiclón semipermanente del Atlántico Sur, los cuales gobiernan, entre otros, los aspectos relacionados con la distribución y el almacenaje del agua en la atmósfera.

La cordillera de los Andes se muestra como un "divisor de aguas", más propiamente un "divisor de vapor de agua atmosférico".

7.2 Flujo de vapor de agua atmosférico \bar{Q}

En los Mapas 3 y 4 se presentan los campos vectoriales del flujo \bar{Q} , donde se observa que los flujos en las latitudes bajas son predominantemente del este, mientras que más al sur del continente se presentan en sentido opuesto. La región comprendida entre los 15° y 30° S se comporta como una "zona de transición" con relación a la dirección predominante del flujo.

Los mapas muestran un aporte de vapor de agua predominantemente oceánico a la altura de la cuenca amazónica, siendo más característica esta situación en el período de verano. En el invierno la Amazonia recibe una cantidad menor de vapor de agua, situación ésta también influenciada por el posicionamiento estacional de la ITCZ y del anticiclón semipermanente del Atlántico Sur. Debe considerarse que cualquiera sea la época del año, este influjo predominantemente marítimo se incorpora al flujo de la selva (evapotranspiración), ocasionando las precipitaciones abundantes en función de las condiciones propicias; debido al posicionamiento de los Andes, perpendicular a la dirección del flujo predominante, funcionando como un obstáculo natural, el remanente de esa humedad total irá a alimentar la atmósfera sobre el Chaco paraguayo y adyacentes.

También en este campo se siente, con fuerte caracterización, el papel de la cordillera, que se coloca como un obstáculo natural para el transporte en gran escala de la humedad entre el Atlántico y el Pacífico.

A lo largo del litoral norte del continente, por ejemplo, el insumo medio de vapor de agua vía la atmósfera es del orden de 3000 gramos de vapor por centímetro por segundo en cualquier punto de la faja. Esto representa para una faja limitada por el Ecuador y los 10°S un aporte de aproximadamente 330.000 m³/s de vapor de agua hacia la cuenca. Dicha cantidad va disminuyendo a medida que se entra hacia la cuenca amazónica.

A lo largo del litoral sur del continente, del lado del Pacífico a partir de Santiago, es nítida la influencia de los Andes en su interacción con el flujo de vapor que le es perpendicular proveniente del Pacífico y con valores relativamente elevados. La influencia es marcada en la generación de precipitación orográfica.

7.3 Divergencia del campo de flujo de vapor de agua atmosférico ($\nabla \cdot \bar{Q}$)

Quedó demostrado analíticamente en el punto 6, la divergencia obtenida a partir de la aplicación de la ecuación descrita en 6.3, representa el balance de vapor de agua atmosférico transportado hacia la región, pudiendo presentar situaciones algunas veces de áreas positivas y otras negativas.

Así, como

$$\nabla \cdot \vec{Q} = E - P, \text{ podemos tener,}$$

$$\nabla \cdot \vec{Q} < 0 \longrightarrow P > E \text{ ó,}$$

$$\nabla \cdot \vec{Q} > 0 \longrightarrow E > P$$

En el caso de $\nabla \cdot \vec{Q} < 0$, el significado físico es que la atmósfera sobre esta área se comporta como fuente de agua para la superficie local. Es el caso, por ejemplo, de la mayor parte de la cuenca amazónica. En el caso de $\nabla \cdot \vec{Q} > 0$ significa que la superficie local funciona como fuente de vapor de agua para la atmósfera adyacente. En este caso se tiene como ejemplo las regiones del nordeste de Brasil, y toda la faja que margina el lado oeste de los Andes desde el sur del Perú hasta el sur del continente, donde se verifica la evapotranspiración mayor que la precipitación, regiones éstas ampliamente conocidas por su aridez, Mapas 5 y 6.

Fuera de que el aspecto general de la distribución continental de las áreas positivas y negativas de $\nabla \cdot \vec{Q}$ se mantenga a lo largo del año, existe una variación en la magnitud de sus centros, relacionada con la situación estacional. Esto también vale para los demás elementos analizados en los puntos anteriores.

Se puede concluir que las áreas de $\nabla \cdot \vec{Q} < 0$ son coincidentes con las de mayor precipitación (cuenca amazónica, noroeste del continente, Chaco paraguayo, región sur del Brasil y región este de Argentina).

Las regiones de $\nabla \cdot \vec{Q} > 0$ son coincidentes con las de fuerte evaporación como es el caso del nordeste de Brasil y a lo largo de la cordillera de los Andes a partir del Perú.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE ACCIONES FUTURAS SOBRE EL BALANCE HIDRICO AEROLOGICO DE LA REGION

Del análisis de los resultados aquí presentados, se concluye que el comportamiento hidrológico del continente sudamericano es el resultado de los transportes del elemento agua en la atmósfera, por un lado, y de la interacción de estos con los aspectos fisiográficos: hay una nítida respuesta de los fenómenos a los modelos de la circulación general de la atmósfera.

Debe considerarse que las conclusiones aquí presentadas se basan en el análisis de configuraciones obtenidas a partir de una masa de datos aerológicos de apenas tres años consecutivos, originada de una red que presenta una densidad espacial deficiente y un monitoreo en escala temporal bastante irregular.

En el presente, cuando los computadores de gran porte comienzan a tener participación en el análisis climático hasta la escala global, empleando sofisticados modelos numéricos de análisis y previsión del comportamiento atmosférico, su uso pierde sentido, principalmente en los países en vías de desarrollo, donde estos computadores no son debidamente alimentados con una cantidad de datos compatible y confiable en número y calidad.

Se considera esencial buscar mejorar la calidad y cantidad de las estaciones meteorológicas de superficie y de altitud, complementadas por una igualmente eficiente red pluviométrica, y que las informaciones por ellas generadas sean adecuadamente almacenadas en sistemas de fácil acceso y de la más alta confiabilidad.

Finalmente, se recomienda que los estudios aquí iniciados tengan seguimiento incluyendo series más largas de datos aerológicos y pluviométricos. A tales efectos se recomienda la organización de un sistema tipo Banco de Datos a nivel sudamericano.

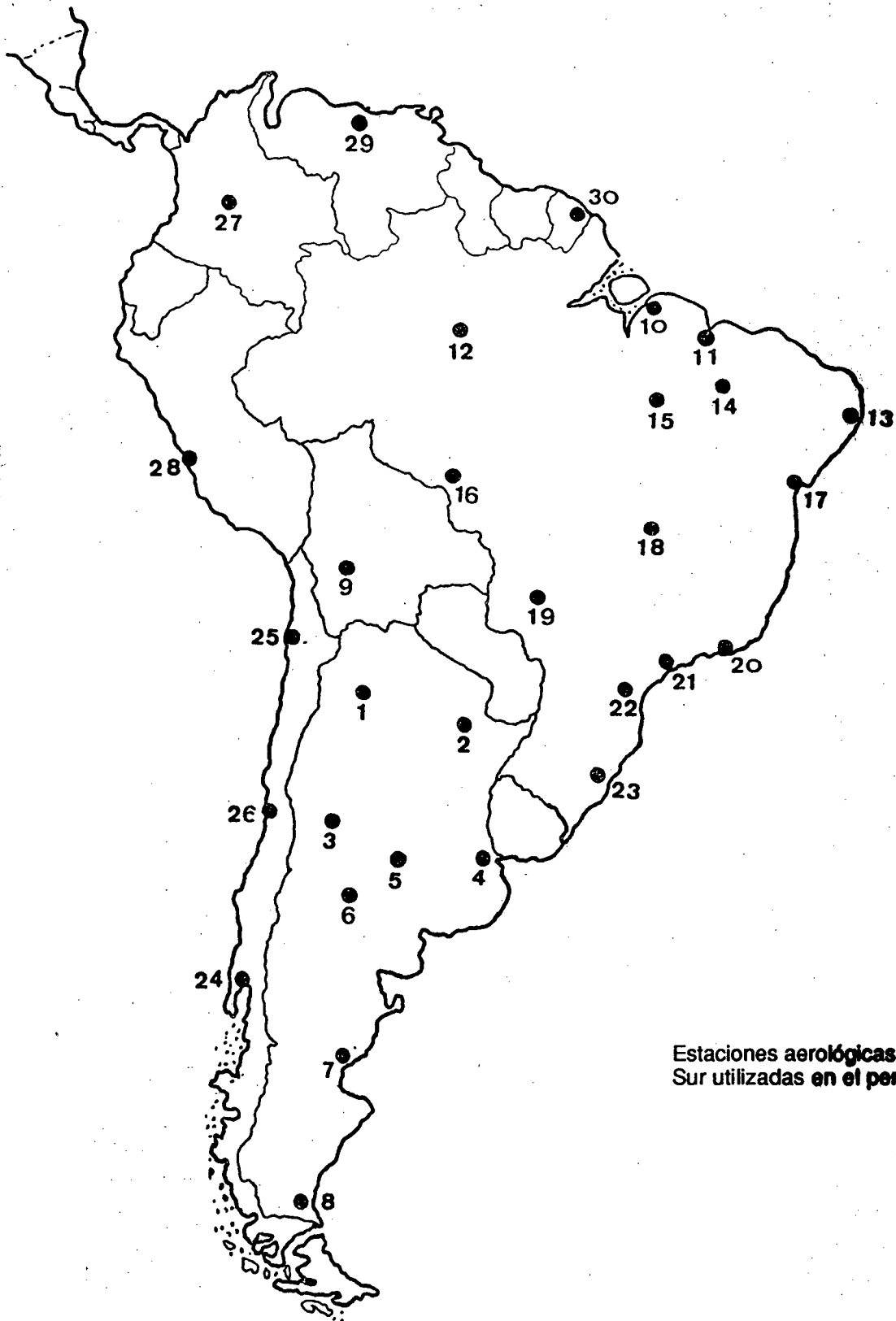
9. LITERATURA CITADA O CONSULTADA

- BENTON, C. S.; BLACKBURN, R. T.; SNEAD, V. O. - 1950. The role of atmosphere in the hydrological cycle. *Trans. Am. Geoph. Un.*, 31:61-73.
- _____ ; ESTOQUE, M. A. - 1954. Water vapor transfer over the North American Continent. *J. Meteor.*, 11:462-477.
- BENWELL, G. R. R. - 1965. The estimation and variability of the precipitable water. *Meteor. Mag.*, London, 94(1120): 319-327.
- MARQUES, J. - 1976. Contribuição ao estudo hidrológico da bacia Amazônica. *Contribuição Científica Nº 2 do Departamento de Meteorologia da UFRJ*, 118 p.
- MARQUES, J.; SANTOS, J. M.; SALATI, E. 19 - Precipitable water and water vapour flux between Belem and Manaus. *Acta Amazônica, Manaus*, 7(3): 355-362.
- MARQUES, J.; SANTOS, J. M.; SALATI, E. 19 - Considerações sobre os ventos na região amazônica. *Acta Amazônica, Manaus*, 8(1): 110-113.
- MARQUES, J.; SALATI, E.; VILA NOVA, N. A. - 1979. Cálculo da evapotranspiração real na bacia amazônica através da utilização do método aerológico. *Atas III Simposio Brasileiro de Hidrologia, Vol. I, 19-23/8/79, Brasília*, pp.193-197.
- MARQUES, J.; SANTOS, J. M.; SALATI, E. - 1979. O armazenamento atmosférico de vapor d'água sobre a região amazônica. *Acta Amazônica, Manaus*, 9(4): 715-721.
- MARQUES, J.; SANTOS, J. M.; SALATI, E. - 1979. O campo do fluxo de vapor d'água atmosférico sobre a região amazônica. *Acta Amazônica, Manaus*, 9(4): 701-713.
- MARQUES, J.; SANTOS, J. M.; SALATI, E. - 1980. A divergência do campo do fluxo de vapor d'água e as chuvas da região amazônica. *Acta Amazônica, Manaus*, 10(1): 133-140.
- MARQUES, J.; SUCHAROV, E. C.; WASHINGTON, D. C. - 1987. Determinação das componentes do balanço d'água sobre o Brasil. *Anales del II Congreso Interamericano de Meteorología y V Congreso Argentino de Meteorología, Buenos Aires, 30 Nov.-4 Dic. 1987*, pg. 6.5.1 a 6.5.4
- PALMEN, E. - 1967. Evaluation of atmospheric moisture transport for hydrological purposes. *World Meteorological Organization, Geneve, Reports on WMO/IHD Projects*, 63 p.
- PEIXOTO, J. P. - 1968. O ramo aéreo do ciclo hidrológico. *Fomento Lisboa*, 6(2): 111-119.
- SALATI, E.; MARQUES, J.; MOLION, L. B. - 1978. Origem e distribuição das chuvas na amazônia. *Interciência, Caracas*, 3(4): 200-205.
- SALATI, E.; MARQUES, J. - 1984. Climatology of the Amazon Basin. In: *The Amazon - Limnology and landscape ecology of a might tropical river and its basin*, pp. 86-126. W. Junk Publishers. Printed in The Netherlands.
- UNESCO/ORCYT - 1982. Guía metodológica para la elaboración del balance hídrico de América del Sur. *Estudios e informes en Hidrología, Montevideo*, 130 p.

FIGURA 1

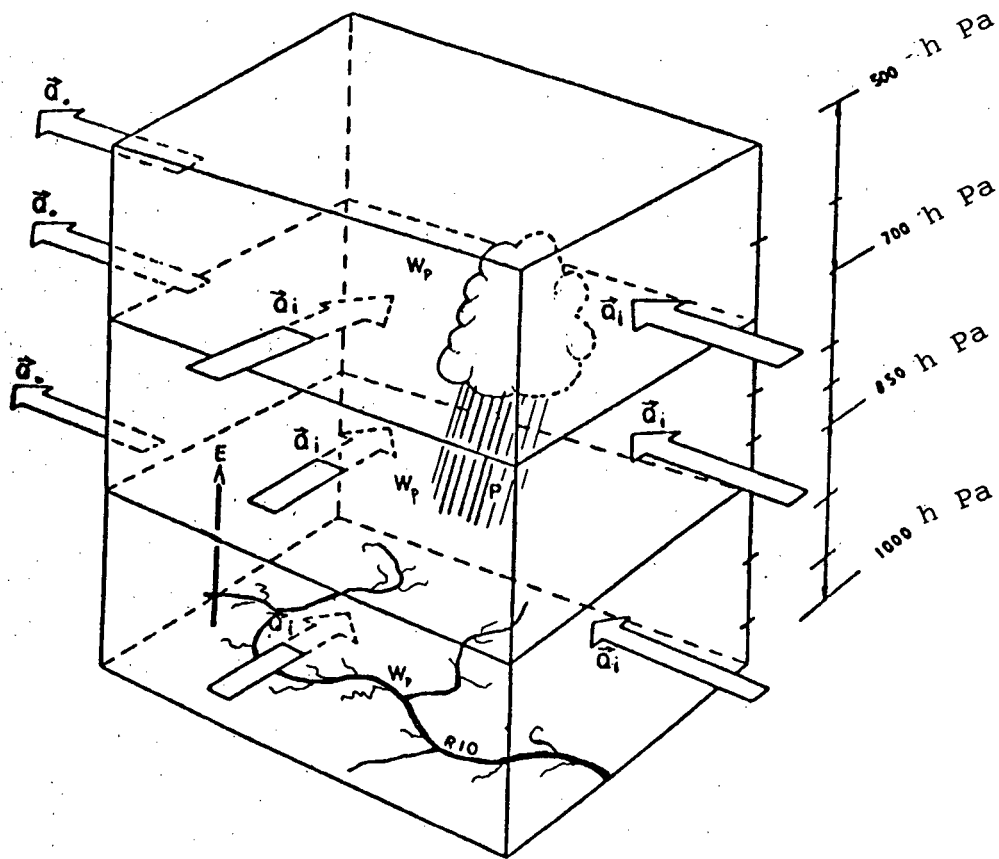


FIGURA 2



Estaciones aerológicas de América del Sur utilizadas en el período 1971-1973

FIGURA 3



Modelo utilizado para la caracterización de los componentes aéreos del ciclo aerológico

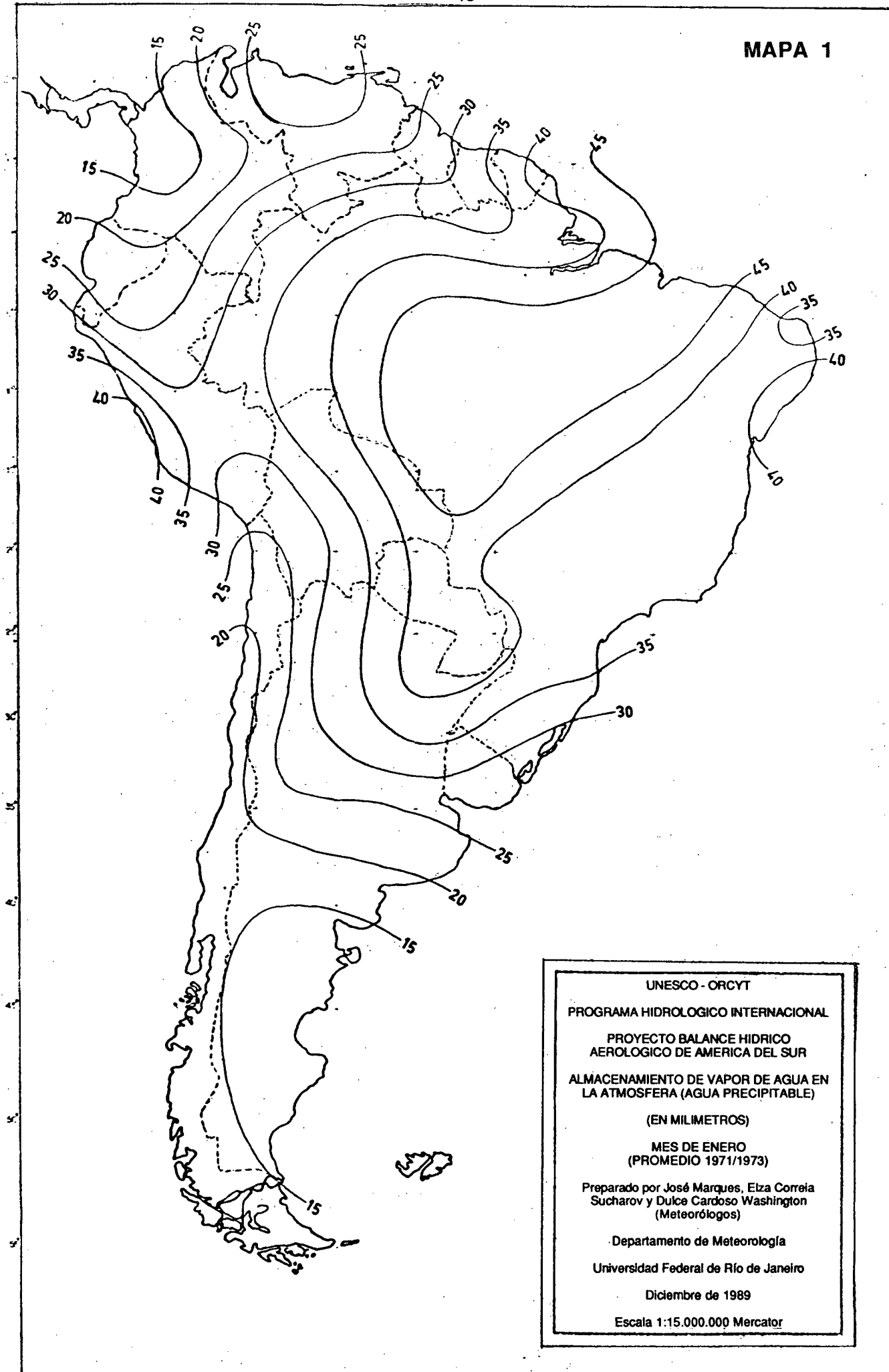
FIGURA 4



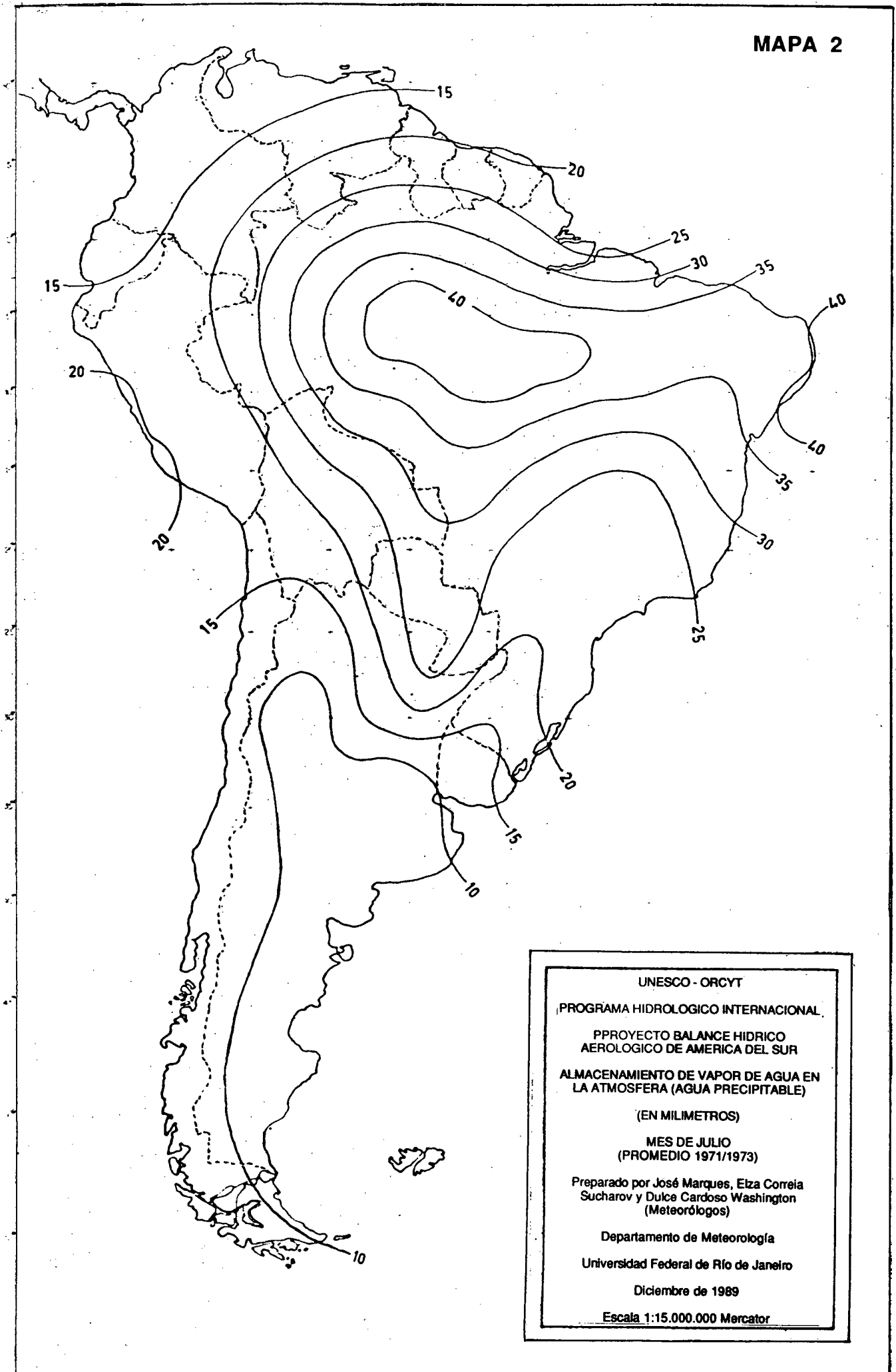
QUADRO 1 - Lista de estaciones de radiosondas utilizadas

Nº en el mapa	País	Nº de OMM	Nombre
1	Argentina	87047	Salta - Aero
2	Argentina	87155	Resistencia - Aero
3	Argentina	87418	Mendoza - Aero
4	Argentina	87576	Ezeiza - Aero
5	Argentina	87623	Santa Rosa - Aero
6	Argentina	87715	Neuquén - Aero
7	Argentina	87860	Com. Rivadavia - Aero
8	Argentina	87926	Río Gallego - Aero
9	Bolivia	85201	El Alto
10	Brasil	82193	Belém
11	Brasil	82280	São Luiz
12	Brasil	82332	Manaus
13	Brasil	82599	Natal
14	Brasil	82678	Petrolina
15	Brasil	82765	Carolina
16	Brasil	83208	Vilhena
17	Brasil	83229	Salvador
18	Brasil	83378	Brasilia
19	Brasil	83612	Campo Grande
20	Brasil	83746	Galeão
21	Brasil	83780	São Paulo
22	Brasil	83840	Curitiba
23	Brasil	83971	Porto Alegre
24	Chile	85799	Puerto Montt/El Tepual
25	Chile	85442	Antofagasta
26	Chile	85542	Quintero
27	Colombia	80222	Cartagena
28	Perú	84628	Lima/Aeropuerto Callao
29	Venezuela	80415	Caracas
30	Guayana Francesa	81405	Cayena

MAPA 1



MAPA 2



UNESCO - ORCYT

PROGRAMA HIDROLOGICO INTERNACIONAL

PROYECTO BALANCE HIDRICO
AEROLOGICO DE AMERICA DEL SURALMACENAMIENTO DE VAPOR DE AGUA EN
LA ATMOSFERA (AGUA PRECIPITABLE)

(EN MILIMETROS)

MES DE JULIO
(PROMEDIO 1971/1973)Preparado por José Marques, Elza Correia
Sucharov y Dulce Cardoso Washington
(Meteorólogos)

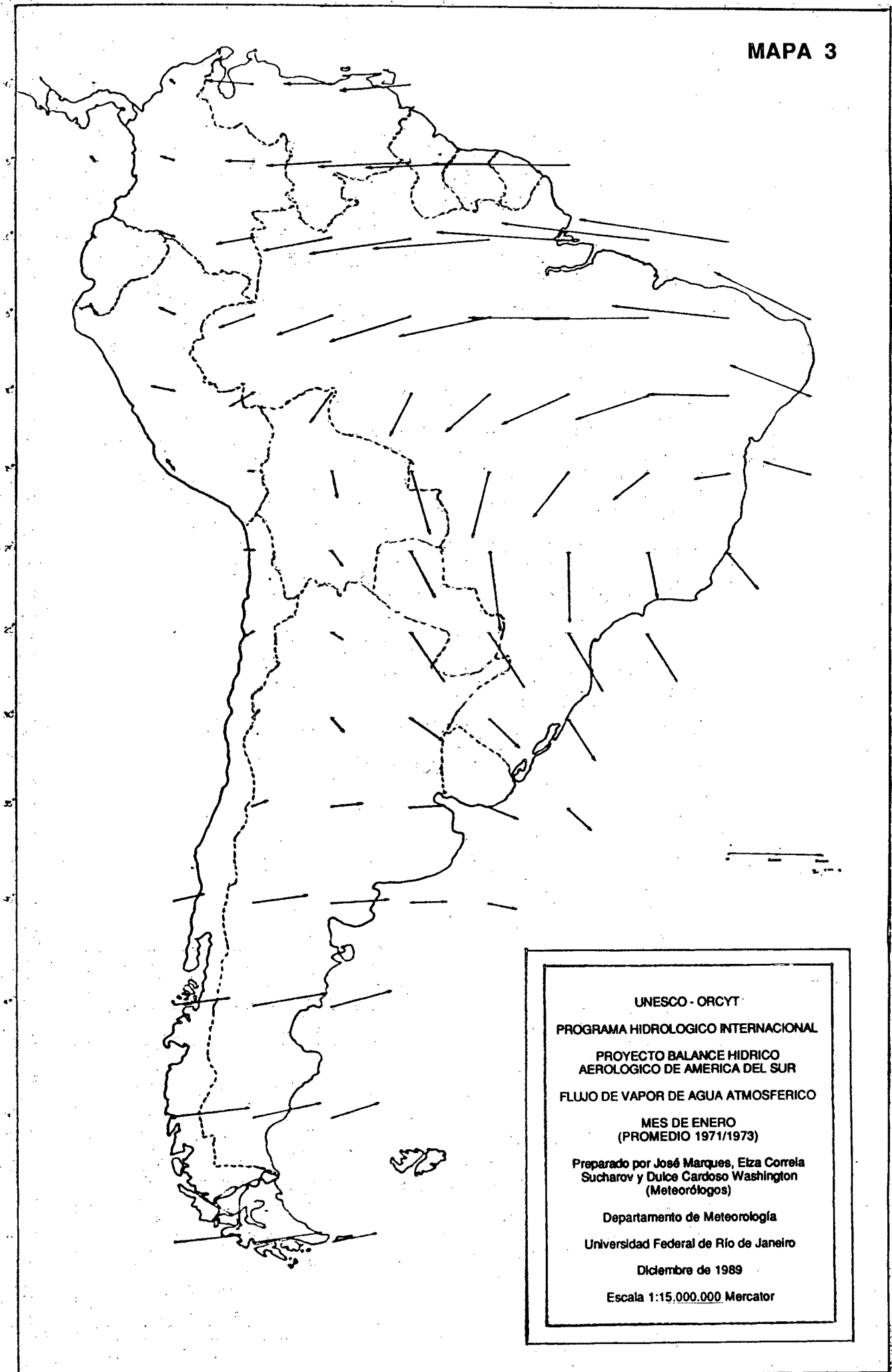
Departamento de Meteorología

Universidade Federal de Rio de Janeiro

Diciembre de 1989

Escala 1:15.000.000 Mercator

MAPA 3



UNESCO - ORCYT

PROGRAMA HIDROLOGICO INTERNACIONAL

PROYECTO BALANCE HIDRICO
AEROLOGICO DE AMERICA DEL SUR

FLUJO DE VAPOR DE AGUA ATMOSFERICO

MES DE ENERO
(PROMEDIO 1971/1973)

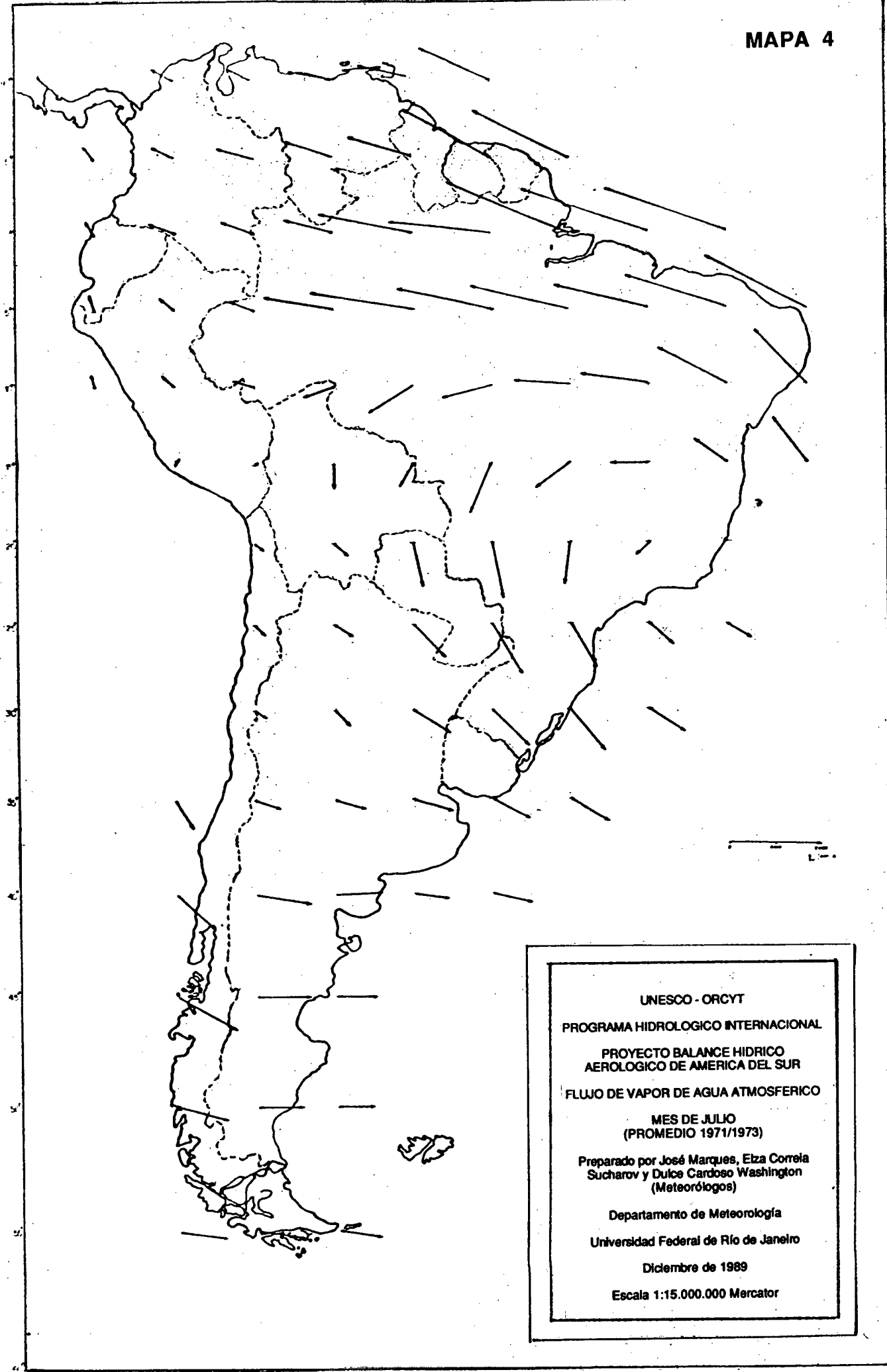
Preparado por José Marques, Etza Correia
Sucharov y Dulce Cardoso Washington
(Meteorólogos)

Departamento de Meteorología

Universidad Federal de Rio de Janeiro

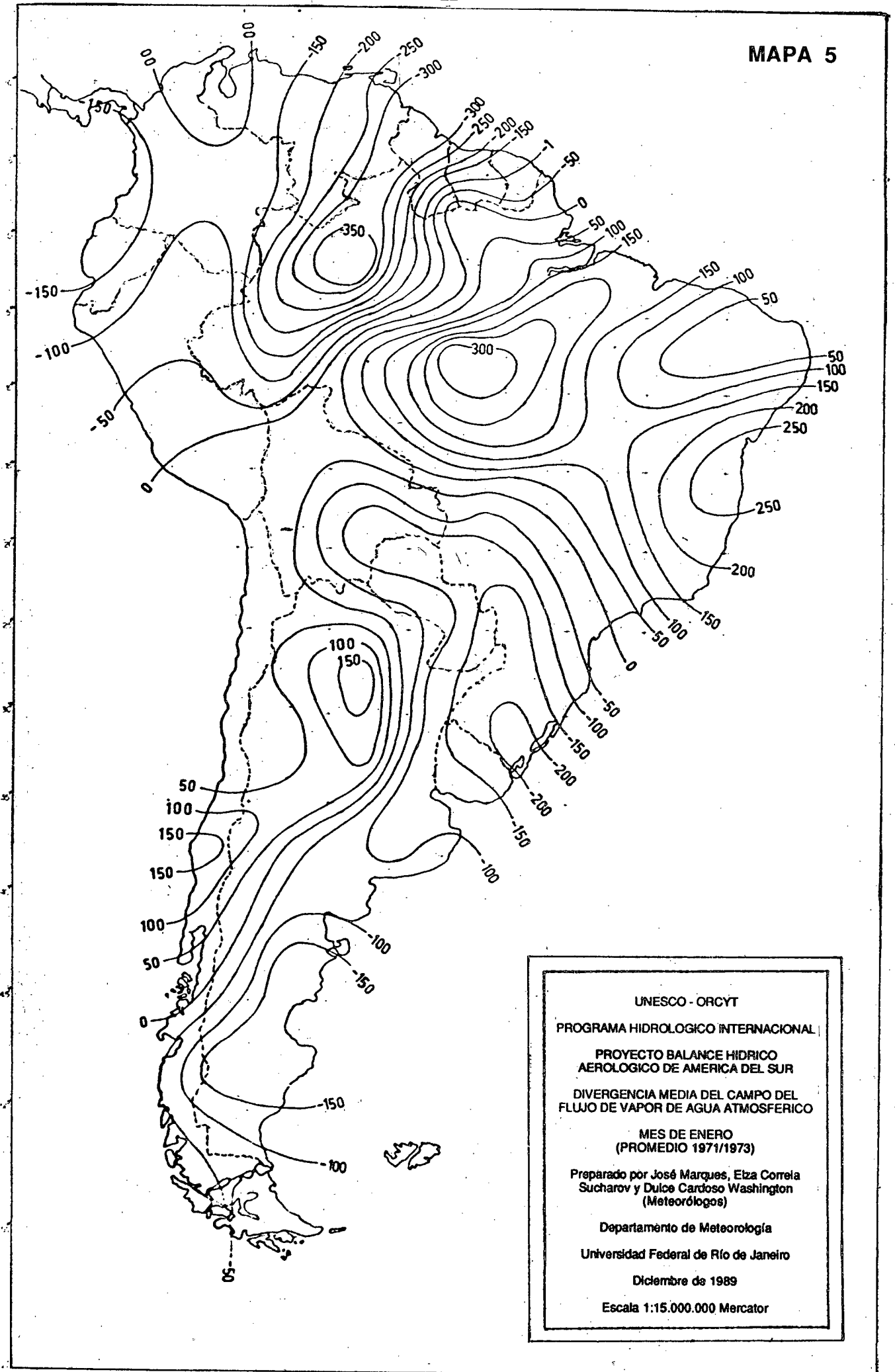
Diciembre de 1989

Escala 1:15.000.000 Mercator

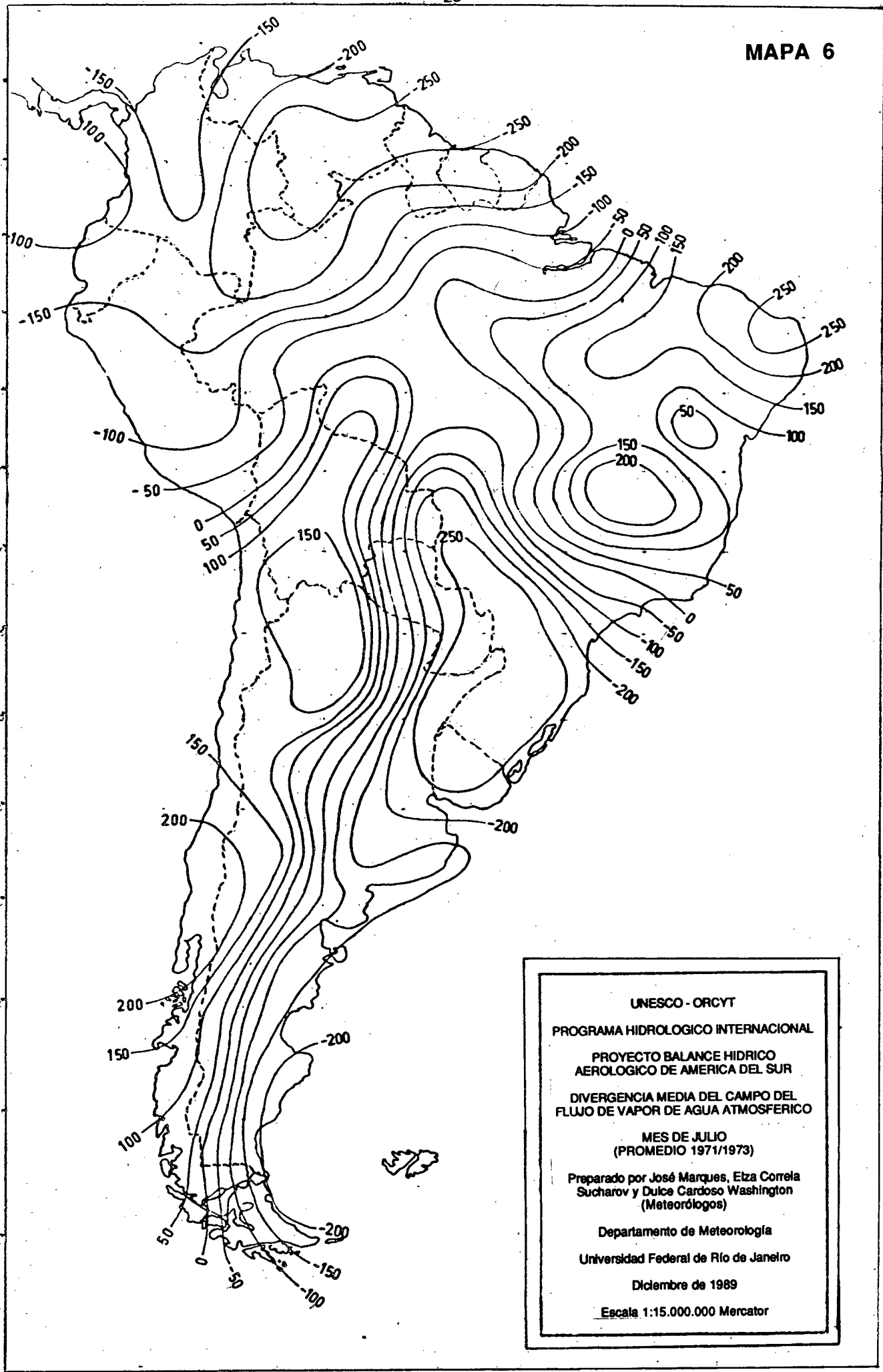


UNESCO - ORCYT
PROGRAMA HIDROLOGICO INTERNACIONAL
PROYECTO BALANCE HIDRICO
AEROLOGICO DE AMERICA DEL SUR
FLUJO DE VAPOR DE AGUA ATMOSFERICO
MES DE JULIO
(PROMEDIO 1971/1973)
Preparado por José Marques, Elza Correia
Sucharov y Dulce Cardoso Washington
(Meteorólogos)
Departamento de Meteorología
Universidad Federal de Río de Janeiro
Diciembre de 1989
Escala 1:15.000.000 Mercator

MAPA 5



MAPA 6



UNESCO - ORCYT
 PROGRAMA HIDROLOGICO INTERNACIONAL
 PROYECTO BALANCE HIDRICO
 AEROLOGICO DE AMERICA DEL SUR
 DIVERGENCIA MEDIA DEL CAMPO DEL
 FLUJO DE VAPOR DE AGUA ATMOSFERICO
 MES DE JULIO
 (PROMEDIO 1971/1973)
 Preparado por José Marques, Elza Correla
 Sucharov y Dulce Cardoso Washington
 (Meteorólogos)
 Departamento de Meteorología
 Universidad Federal de Río de Janeiro
 Diciembre de 1989
 Escala 1:15.000.000 Mercator

