

# Composición química de las precipitaciones, deposición de sales y evaluación de la recarga en la región oriental de Cuba

R. Rodríguez<sup>(1)</sup>, C. Bejarano<sup>(1)</sup>, B. Riverón<sup>(2)</sup> y J.A. Carmenate<sup>(2)</sup>

(1) Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Escuela de Caminos Canales y Puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña. c/. Gran Capitán, s/n, Ed. D2, 08034 Barcelona (España).  
E-mail: roberto.rodriguez-pacheco@upc.es

(2) Departamento de Geología. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Las Coloradas, s/n. Moa, Holguín (Cuba).

## RESUMEN

En el trabajo se analizan los datos climáticos de 77 estaciones pluviométricas para un período igual o superior a 30 años y el análisis de más de 140 muestras de agua de lluvia en 11 estaciones. El objetivo es estimar el aporte de sales al terreno y la recarga de las aguas subterráneas. Las precipitaciones en la región oriental alcanzan un valor que oscila entre 600 y 3400 mm/año. Los resultados de la distribución espacial de las lluvias permiten diferenciar la existencia de dos zonas con comportamiento pluviométrico diferenciado. La zona norte representa el área de mayor precipitación y la sur lo contrario. Los meses más lluviosos son mayo y octubre mientras que los de menor precipitación son enero y febrero. En la zona norte se distinguen dos estaciones húmedas y dos secas al año. El volumen de precipitación es controlado por la topografía del terreno y la dirección predominante del viento. La composición química del agua de lluvia se analiza en más de 140 muestras, en las que se determinó el pH, la conductividad eléctrica, el oxígeno disuelto, y la concentración de los elementos mayoritarios. Las lluvias son caracterizadas por valores de pH entre 4,4 y 5,7. Según los componentes mayoritarios el agua de lluvia es predominantemente clorurada sódica. El valor más elevado de sólidos disueltos se encuentra en muestras tomadas en las zonas industriales. Los datos muestran la influencia de los aerosoles marinos y en un grado inferior el aporte antropogénico, principalmente en las estaciones cercanas a las zonas industriales y las ciudades. Considerando el volumen y la composición química del agua de lluvia se estima un aporte de sales al terreno entre 5 y 14 g/m<sup>2</sup>/año. La recarga de las aguas subterráneas presenta un amplio rango entre 150 y 600 mm/año.

Palabras clave: composición química, Cuba, deposición de sales, precipitaciones, recarga, relaciones iónicas

## ***Chemical composition of precipitation and salt deposition and recharge evaluation in the eastern region of Cuba***

### ABSTRACT

*In this work the climatic data of 77 rain gauge stations for a period of 30 years were processed and more than 140 rainwater samples in 11 points were analysed. The precipitations reach a value between 600 and 3400 mm/year. In the results we can see the existence of two zones in the eastern region of Cuba. The north zone represents the area of higher rainfall and the south the lower. The aim is to determine the mass of salt depositions and groundwater recharge. The rainiest months are May and October whereas the rain is lesser in January and February. In the North zone two dry and two humid seasons a year can be distinguished. The volume of precipitation is controlled by both topography and influence of wind direction. The chemical composition of the rainwater is analysed using more than 140 samples, completing the analyses with control of pH, electrical conductivity and dissolved oxygen, and the major components. Rain water is characterized by pH values between 4,4 and 5,7. According to major constituents the rain is predominantly of the sodium chloride type. It shows the greatest value of dissolved solids in the southern region. The collected data shows the noticeable influence of marine aerosols and a lesser extent the anthropogenic contribution in the stations near industrial and urbanized zones. Considering the volume and chemical composition of rainwater the total salt depositions can be estimated between 5 and 14 g/m<sup>2</sup>/year. The recharge of groundwaters is between 150 and 600 mm/year.*

*Key words: Cuba, chemical composition, deposition of salts, ionic ratios, rainfall, recharge*

## Introducción

El estudio del volumen, composición química del agua de lluvia y su distribución espacio-temporal

constituye una de las líneas de investigación en los estudios del ciclo hidrológico y los estudio de impacto ambiental (ej. inundaciones, lluvias ácidas, corrosión, etc.). Su importancia está marcada por el hecho

de que son las precipitaciones atmosféricas la principal fuente de alimentación de las corrientes de agua superficial, la recarga de las aguas subterráneas y de aporte de sales solubles al suelo. El conocimiento de la concentración y composición de sales en las aguas de lluvia y su distribución espacio-temporal es esencial para explicar la concentración de los iones mayoritarios en las aguas subterráneas contemporáneas y poder estimar los volúmenes de recarga de los diferentes acuíferos.

El estudio de las precipitaciones en la Isla de Cuba ha centrado la atención de un gran número de investigadores. Davitaya y Trusov (1965), Trusov (1967), Kissin *et al.* (1968), Burlutski (1973), Gagua *et al.* (1976), Trusov, (1967), Trusov *et al.* (1979), Alfonso *et al.*, 1982, Arellano *et al.* (1992), Lecha *et al.* (1994) Téllez (1995), Rodríguez y Téllez (1995), López *et al.* (2000) y Batista *et al.* (2002) han estudiado la distribución geográfica. Como principal conclusión de sus trabajos se extrae la elaboración de bases de datos y mapas de distribución espacial de las precipitaciones en las diferentes regiones del territorio nacional. El trabajo más significativo es el de Gagua *et al.*, (1976), donde se presenta el mapa de isoyetas para toda la Isla de Cuba y constituye la base de la mayoría de los trabajos desarrollados en el estudio de las precipitaciones.

La influencia del factor topográfico sobre el volumen de las precipitaciones ha sido analizada por Díaz *et al.*, (1983), y González y Lora (1987) en la región oriental. Davitaya y Trusov (1965) realizaron el análisis en los cuatro sistemas montañosos de la isla. Como resultado final de estos trabajos se comprueba que el factor topográfico combinado con la dirección de los vientos alisios, condiciona la distribución de las precipitaciones.

El efecto de las perturbaciones ciclónicas sobre las precipitaciones ha sido estudiado por Kochiashvili y Batista (1972), y Egorov y Luege (1967). Estos trabajos han permitido la elaboración de mapas para ciclones en concreto y la estimación de diferentes parámetros de intensidad de las precipitaciones.

La composición química y sus propiedades físicas han sido estudiadas a diferentes intervalos de tiempo. Entre los principales trabajos destaca el de Gutiérrez y Travieso (1978), que realiza un análisis de las precipitaciones en diferentes puntos del país. En su trabajo se analizan 104 muestras de aguas correspondientes al período 1971-1976, aunque no en todos los casos las muestras eran completas. En el trabajo de Rodríguez y Sosa, (1993) se evalúa la composición química de las precipitaciones asociadas a ondas tropicales en cuatro estaciones: una ubicada al sur de la

región oriental, en la ciudad de Santiago de Cuba y tres en la región occidental. Rodríguez *et al.* (1989) ha estudiado la composición del agua de lluvia asociada a los frentes fríos y la concentración media del polvo en suspensión de la atmósfera. La principal conclusión es que el pH es ligeramente ácido (4,9) y que la concentración de los iones asociados a la acidez de la lluvia, como son el sulfato y el nitrato, son elevados, resultando superiores a los de las precipitaciones medias.

La evaluación del aporte de sales atmosféricas procedentes del polvo atmosférico y de las sales disueltas en las precipitaciones es aún más limitada. Gutiérrez y Travieso (1978) realizaron el estudio para la provincia de La Habana. Corvo *et al.* (1996) determinaron la deposición de cloruro y sulfato en tres estaciones de Cuba ubicadas en la región occidental en la zona más estrecha de la Isla (de la costa norte a la sur hay unos 35 km) al norte de Ciudad de La Habana (2 estaciones) y al sur de la provincia La Habana (una estación), con objeto de evaluar la corrosión atmosférica. Como resultado fundamental se obtuvo que la corrosión en las áreas costeras del Caribe es muy alta y está controlada por la deposición de cloruro; además se señala que los valores de corrosión sobrepasan los límites establecidos en la norma ISO 9223 de la Unión Europea, por lo que se recomienda una nueva escala de valores para evaluar la corrosión en la región del Caribe.

Fagundo *et al.* (1996) estudiaron la hidroquímica de las precipitaciones en diferentes regiones kársticas con el objetivo de evaluar las condiciones hidrogeoquímicas de esos macizos; entre ellos destaca el estudio de la Meseta Guaso, en la provincia de Guantánamo. Como resultado de estos trabajos se comprobó que la composición del agua de lluvia es clorurada sódica y presenta una baja mineralización; además evaluó la composición de las aguas superficiales y subterráneas y estimó la recarga en 250 mm/año.

El efecto del viento sobre las precipitaciones y el aporte de sales disueltas o contaminantes han sido tratados en limitados trabajos. Álvarez (1983) concluye que el arrastre de las sales y elementos contaminantes se desarrolla en la dirección real del viento y no en la dirección del viento medio, mientras que Díaz *et al.* (1983) comprueban que la dirección del viento condiciona el desarrollo y distribución de las precipitaciones en Cuba. Cuesta *et al.* (1998) evalúan la deposición de nitrógeno en Cuba. Para el estudio emplean los datos del período 1986-1991 recogidos en cinco estaciones distribuidas a lo largo de toda la isla del siguiente modo: una ubicada en la región

oriental, ciudad de Santiago de Cuba, dos en la región central y dos en la occidental. Como resultado del trabajo de Cuesta *et al.* (1998) se obtiene un aporte de los compuestos de nitrógeno entre 0,7 y 3,3 g/m<sup>2</sup>/año.

El efecto de las precipitaciones sobre la recarga de los acuíferos es uno de los problemas menos estudiados y se limita a acuíferos concretos. Los trabajos de Terrero (1986), Rodríguez y Candela (1998) y Rodríguez (2002), determinan la recarga en rocas ultrabásicas y acuíferos aluviales ubicados al norte de la región oriental, provincia de Holguín. Estos trabajos evalúan la recarga media del acuífero considerando el método del cloruro y se estima un valor de recarga entre 400 y 500 mm para la región de Moa y entre 300 y 400 mm para la región de Mayarí y Nicaro.

El análisis estadístico y la estimación de los diferentes parámetros de las precipitaciones han centrado los objetivos de un gran número de trabajos (Días y Góngora, 1974; Trusov *et al.*, 1979; Riazanov, 1975; Barceló, 1982; Fernández y Maxinova, 1990, Rodríguez y Sosa, 1993). Como conclusión se puede señalar que las precipitaciones muestran una gran diversidad en el ajuste de la distribución de frecuencias, siendo diferente para las regiones analizadas (oriental, occidental y central de la isla).

En este trabajo se realiza un análisis de la distribución de las precipitaciones en la región oriental de la isla, con énfasis en el estudio de sus propiedades físico-químicas, con el objetivo de estimar el aporte de sales en diferentes áreas de la región oriental, estimación de la recarga de las aguas subterráneas, considerando el método de balance del ión cloruro.

### Área de estudio

El Archipiélago Cubano, constituido por la isla de Cuba y 4100 islotes, está situado en el Mar Caribe, entre los 19,8° N a 23,4° N Latitud Norte y entre los 74° O a 84,3° O Longitud Oeste. Está a 140 km de las Bahamas, 180 km de la Florida, 210 de México y 146 de Jamaica (Fig. 1a). Los principales sistemas montañosos cubanos son las cordilleras de Guaniguanico, el Grupo Guamuhaya, la Sierra Maestra y el grupo Sagua-Moa-Baracoa. Este trabajo se centra en los dos últimos macizos y sus áreas colindantes, ubicados en la región oriental (Figs. 1a y 1b).

El sistema montañoso de la Sierra Maestra se extiende a lo largo de 240 km de la costa sur de la región oriental, con un ancho máximo de 40 km. Es el macizo más elevado de Cuba, con 1974 m en su punto culminante, El Pico Turquino. En su zona central, en las localidades conocidas como La Plata y

Chivérico, se agrupan las mayores alturas, entre 1250-1900 m sobre el nivel medio del mar. Este macizo se extiende en forma de arco suave, cóncavo al sur, con una orientación general E-O. Las características fisiogeográficas no son homogéneas. El relieve es montañoso, diseccionado, con la pendiente sur abrupta y la norte relativamente suave (Fig. 1b). El sustrato rocoso de este sistema montañoso está formado por rocas volcánicas, volcánico-sedimentarias, terrígeno-carbonatadas en el que predominan las tobas, calizas, areniscas y brechas formadas en cuencas marinas (Días *et al.*, 1983).

El macizo Sagua-Moa-Baracoa comprende una gran número de unidades diferenciadas: la Sierra Cristal, la Meseta del Guaso, la Sierra del Purial, la Sierra o Cuchillas del Toa y Moa (Fig. 1b). Su anchura máxima es de 60 km y su largo es de unos 150 km, con una altura media estimada de 900 m (Díaz *et al.*, 1983). La Sierra Cristal presenta su máxima elevación en el Pico Cristal, con más de 1000 m de altitud. En la Sierra o Macizo Sagua-Moa-Baracoa la máxima elevación es el Pico Toldo, con una cota absoluta de 1175 m sobre el nivel medio del mar (Rodríguez, 2002b). El sustrato rocoso de esta zona está formado por peridotitas, calizas, margas, areniscas y en menor presencia rocas volcánicas y esquistos micáceos.

En la región de Las Tunas, Bayamo, la zona central de la región oriental calle del Río Cauto y gran parte de Guantánamo predominan las rocas carbonatadas y terrígeno-carbonatadas formadas en cuencas marinas (Días *et al.*, 1983).

### Material y métodos

Para la realización del análisis de la distribución de las precipitaciones en el área de trabajo se ha procesado la información histórica y diferentes publicaciones sobre el volumen de precipitaciones, analizadas en la Introducción. Para el análisis del factor topográfico sobre las precipitaciones se analizaron los datos de 77 estaciones pluviométricas disponibles en el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. Estos datos abarcan un período igual o superior a 30 años. Para determinar el gradiente de la precipitación con la altitud se utilizaron estaciones pluviométricas ubicadas a diferentes alturas topográficas y se aplicó el método de los mínimos cuadrados de forma similar al desarrollado por Davitaya y Trusov (1965).

La composición química del agua de lluvia se analiza a partir de diferentes campañas de muestreo realizadas entre enero del año 1994 y diciembre del año 1995. El dispositivo experimental utilizado en la toma de muestras se representa en la Fig. 2. La colocación

del mismo se realizó siempre durante la precipitación para evitar el efecto de la deposición seca. Esto es posible en la región oriental pues la media de los días con precipitaciones superiores a 1 mm son más de 100 al año e incluso en la región de Moa Baracoa exceden los 200 días al año (González y Lora, 1987).

En total se tomaron y analizaron 149 muestras de agua de lluvia. El análisis completo de las aguas, según metodologías ampliamente conocidas (Burman *et al.*, 1996), incluyó la determinación del pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto, en campo y laboratorio. El análisis en el laboratorio incluye los

siguientes elementos: CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, CO<sub>3</sub>H, SO<sub>4</sub>, Cl, Ca, Mg, Na y K. Para la realización del estudio se seleccionaron 149 muestras, con un error analítico inferior al 20%, determinado según  $error(\%) = 200 \cdot (\Sigma cat - \Sigma ani) / (\Sigma cat + \Sigma ani)$  (ver Custodio y Llamas, 1983), en donde:  $\Sigma cat$  es la suma de los meq/L de cationes y  $\Sigma ani$  es la suma de los meq/L de aniones.

Además de los resultados de las campañas realizadas, se incluyen en el análisis los datos de composición de agua de lluvia reportados en diferentes trabajos de investigación descritos en la Introducción del artículo.

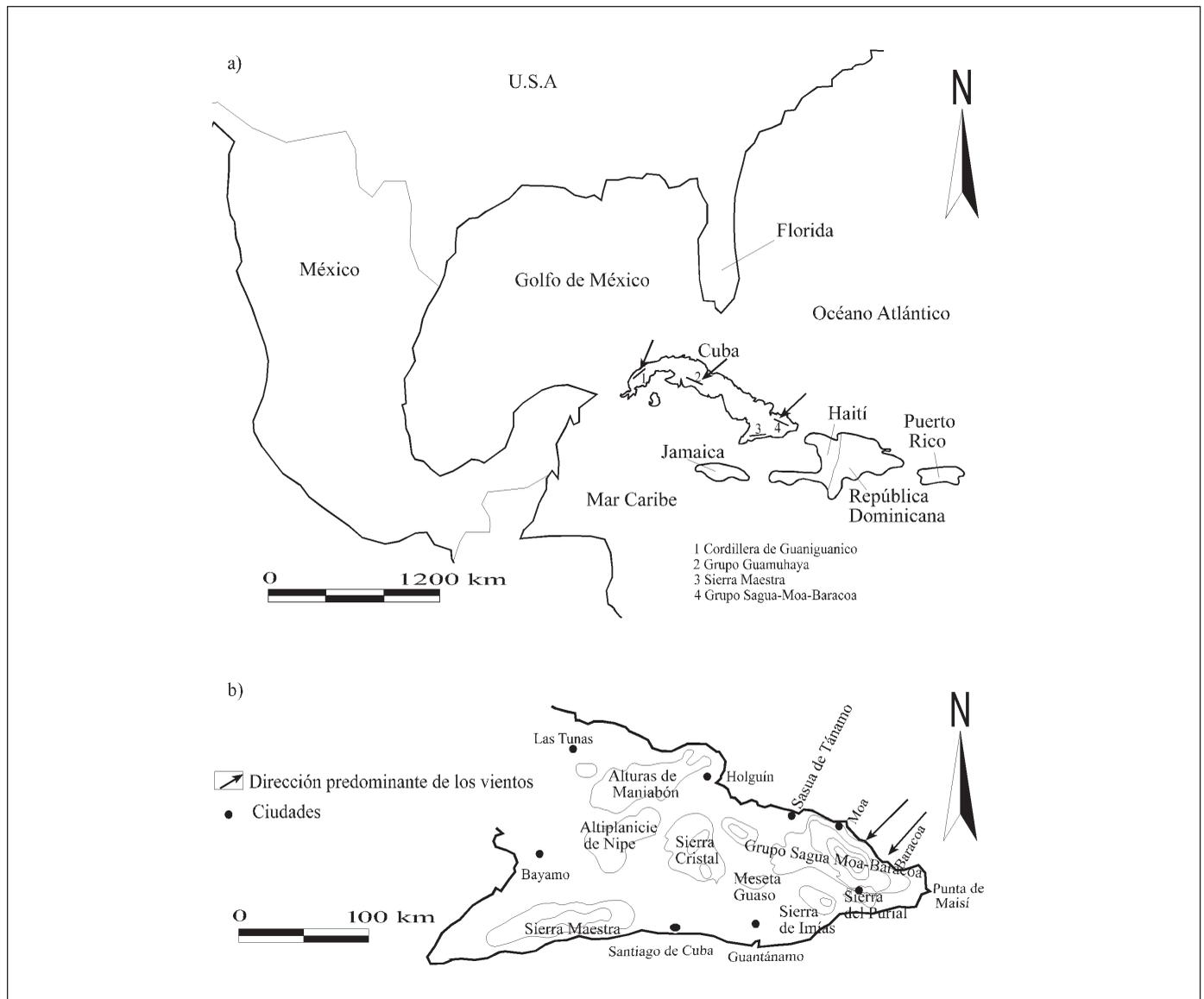


Fig. 1. a) Ubicación geográfica de la isla de Cuba y los principales sistemas montañosos. b) Mapa esquemático que muestra los principales sistemas montañosos de la región oriental y principales ciudades  
 Fig. 1. a) Cuba location and its main mountain systems. b) Schematic map of the main mountain systems of the eastern region and main towns

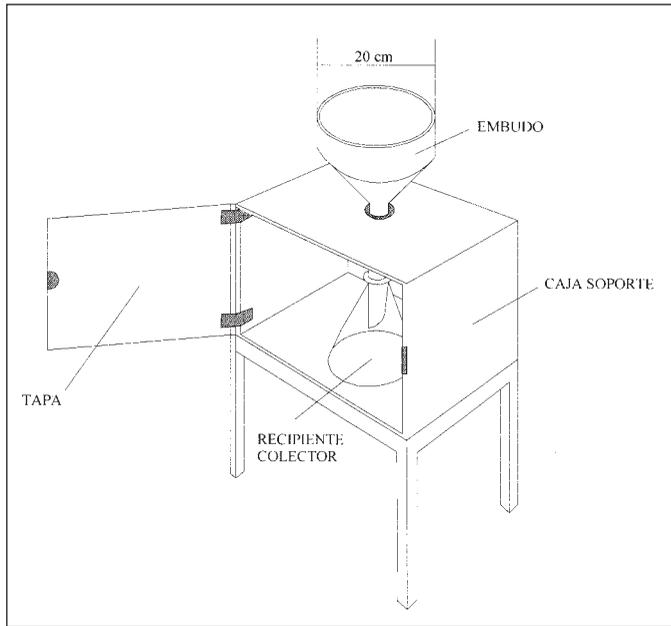


Fig. 2. Dispositivo experimental empleado en la recolección de las muestras de agua de lluvia  
 Fig. 2. Experimental system used for the storage of rainwater

## Resultados

### Distribución de las precipitaciones

Para el análisis de la distribución de las precipitaciones se contó con los datos correspondientes a 77 pluviómetros distribuidos de forma irregular en la superficie del área de estudio. La densidad de estaciones pluviométricas correspondiente a la región oriental se analiza considerando la división político-administrativa de cinco provincias. La superficie cubierta por cada pluviómetro es de 77,3 km<sup>2</sup> en la provincia de Guantánamo, 94,6 km<sup>2</sup> en la de Santiago de Cuba, 95,1 km<sup>2</sup> en la de Granma (Bayamo), 109,6 km<sup>2</sup> en la de Holguín y 212,1 km<sup>2</sup> en la de Las Tunas. La provincia de Las Tunas presenta una densidad pluviométrica menor que la densidad de la red pluviométrica para toda Cuba (160,4 km<sup>2</sup> por pluviómetro). La Fig. 3 muestra el mapa de isoyetas de la región oriental, del que se puede concluir que la lámina de precipitaciones alcanza valores medios comprendidos entre los 600 y 3400 mm/año. Conforme a los resultados obtenidos se puede establecer dos zonas diferenciadas, norte y sur. La zona norte representa el área de mayor pluviometría y en la sur se registran las mínimas. Las precipitaciones en la costa sur varían entre 600 y 2400 mm anuales con un promedio de 1200 mm/año. La media de la zona sur es inferior a la media nacional,

que es de 1500 mm/año (Rodríguez, 1998). En la región central, entre Holguín y Bayazo, la lámina media anual es muy uniforme, con un valor medio de 1100 mm (Fig. 3c); también es inferior a la media nacional. Los valores más elevados se corresponden con el sistema montañoso del Macizo Nipe-Sagua-Moa-Baracoa, con valores medios en la región de Baracoa de 2800 mm/año y en las Cuchillas de Moa de 3400 mm/año (Fig. 1a y 1b). Es de destacar que en esta región hay años en los que se han registrado precipitaciones de 4000 y 5000 mm (González y Lora 1987, Rodríguez, 2002).

De acuerdo al volumen de precipitaciones mensuales los meses más lluviosos son mayo y octubre, mientras que los de menor lluvia son enero y febrero (Gagua *et al.*, 1976). El total de las precipitaciones aumenta de la costa hacia el interior de la Isla, tanto en el sur como en el norte (Fig. 3). En relación con el perfil A-A', en la costa norte se aprecia un incremento de las precipitaciones con un marcado gradiente en una distancia de 16 km, mientras que si se observa el mismo perfil desde la costa sur hasta el interior de la isla se aprecia un aumento más suave en una distancia de más de 40 km (Fig. 3b).

En la zona norte, se distinguen dos estaciones secas y dos húmedas en el año (Fig. 4), con un déficit de humedad acusado en el mes de agosto (Rodríguez, 2002b).

### Influencia del factor topográfico

Geográficamente, la isla de Cuba se sitúa en el campo de acción de los vientos alisios, consecuencia de su fisiografía elongada Este-Oeste, al igual que sus principales morfoestructuras, determinan una gran influencia del relieve sobre las precipitaciones (Fig. 1b y 3). El volumen de las precipitaciones está controlado por la orografía del terreno y la influencia de los vientos alisios, aunque como se observa en la Fig. 3b a la zona de mayor altura topográfica (Sierra Maestra) no le corresponde el mayor volumen de precipitación anual.

En la Tabla 1 se muestran los gradientes de precipitación calculados para los dos sistemas montañosos principales, Sagua-Moa-Baracoa y la Sierra Maestra. Estos gradientes se calcularon para los períodos de lluvia y de sequía. El gradiente de las precipitaciones más destacado se sitúa entre 0 y 500 m en la costa norte (Fig. 3b), apreciándose que a partir de una altura entre 500 y 600 metros se produce una inversión en el aumento de las precipitaciones con la altura en los dos sistemas montañosos analizados.

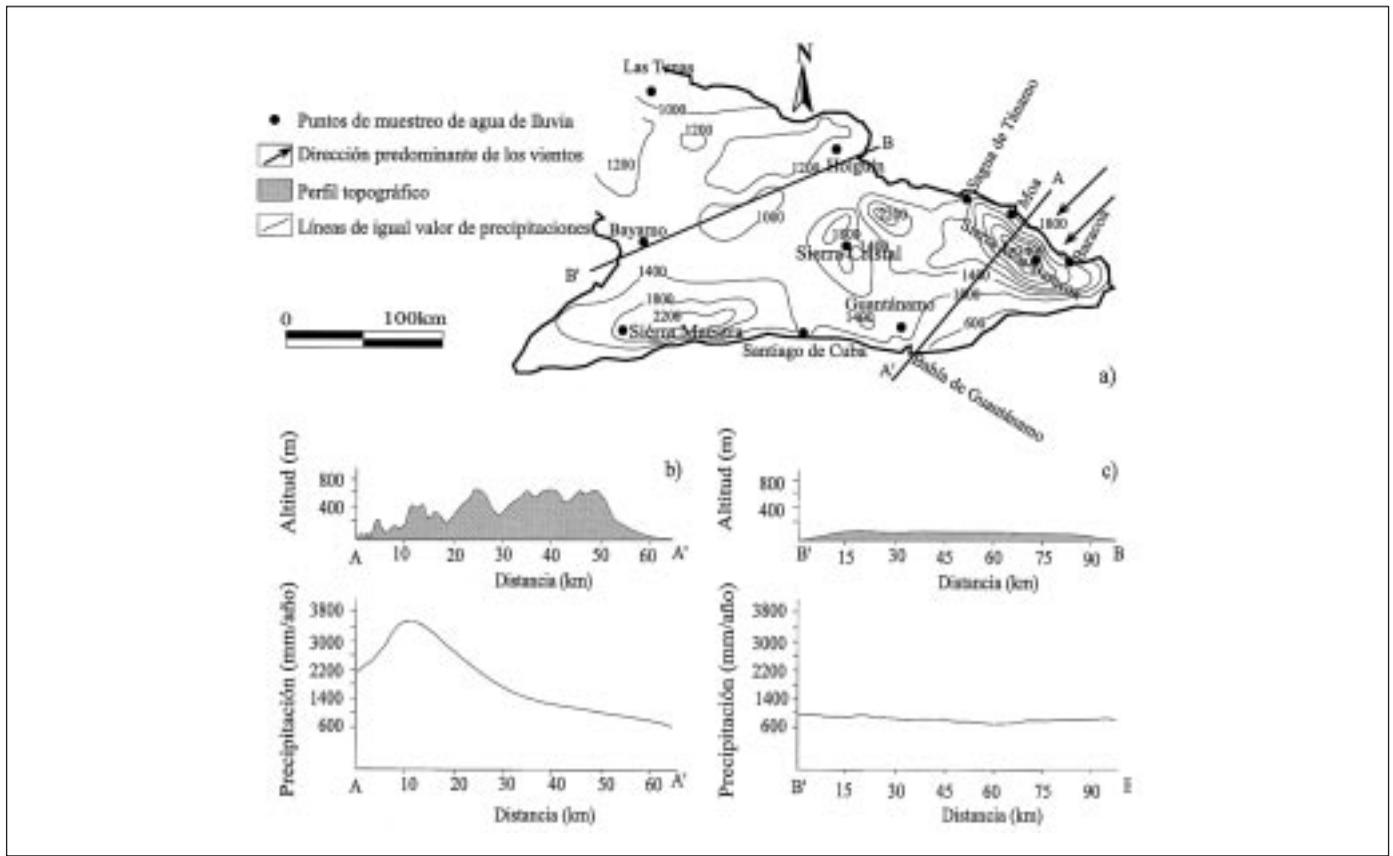


Fig. 3. Distribución de las precipitaciones en la región oriental. a) Mapa de isoyetas (modificado de Gagua et al., 1976). b) perfil topográfico A-A'. c) perfil topográfico B-B'. En la parte baja de a y b se muestra la distribución de la lámina de agua de acuerdo a los perfiles topográficos A-A' y B-B'

Fig. 3. Distribution of precipitations in the Eastern region. a) Rainfall contour map (modified of Gagua et al., 1976). b) Topographic profile A-A'. c) Topographic profile B-B'. In the bottom of a and b, distribution of rainfall according to the topographic profile A-A' and B-B'

De acuerdo con las condiciones pluviométricas pueden señalarse tres tipos de paisajes: I) paisaje seco, con menos de 800 mm de precipitación anuales, situado en la costa sur, que se corresponde con zonas llanas ubicadas al sur de la Sierra Maestra y alturas medias ubicadas en la provincia de Guantánamo; II) paisaje húmedo, donde la precipitación media anual no excede los 2000 mm, que incluye las estribaciones de la Sierra Maestra y la de Imías, la Meseta del Guaso, las provincias de Bayamo, Las Tunas y parte de Holguín, y III) paisaje super-húmedo que se corresponde con las partes superiores de los macizos principales y gran parte de la vertiente norte, donde la precipitación supera los 2000 mm/año (Fig. 3a).

### Características físicas y químicas

Las propiedades físico-químicas de las precipitaciones se caracterizan por presentar una gran incertidumbre asociada. Eso puede observarse al comparar

los amplios rangos de variación entre los valores máximos y mínimos medidos en este trabajo (Tabla 2). Las lluvias se caracterizan por un pH ácido, entre 4,4 y 5,7. El valor medio de la conductividad eléctrica varía entre 10 y 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El contenido de oxígeno disuelto oscila entre 2,8 y 5,4 mg/L. El dióxido de carbono disuelto varía entre 1,0 y 3,2 mg/L. El contenido medio de sales disueltas (TSD) en el agua de lluvia oscila entre 4,9 y 12,9 mg/L. Presenta sus mayores valores de TSD en el sur (Tabla 2).

El catión predominante ponderadamente es el sodio, seguido por el calcio y el magnesio. Este mismo orden se obtiene si se analiza la concentración en meq/L (Tabla 2). En el caso de los aniones, ponderadamente se aprecia una alternancia entre el cloro y el bicarbonato; el bicarbonato es dominante en 5 estaciones y el cloro en 6. En este orden decreciente se presentan el sulfato y el nitrato. Si la concentración se expresa en meq/L, el anión predominante es el cloro, seguido del bicarbonato y el sulfato.

De acuerdo a los componentes mayoritarios, en

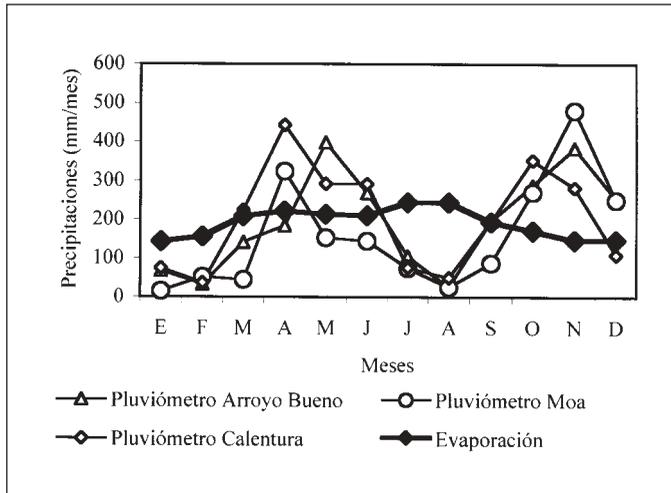


Fig. 4. Distribución anual de las precipitaciones y la evaporación en tres estaciones al norte de Moa  
 Fig. 4. Annual distribution of the rainfall and evaporation in three stations located in the north of Moa

meq/L, la precipitación es clorurada sódica, de lo que apunta la marcada influencia de los aerosoles marinos, y en menor medida los aportes antropogénicos en las estaciones cercanas a las áreas industriales y zonas urbanas. La zona de mayor concentración de sales es la zona sur, concretamente la ciudad de Santiago de Cuba, que es la segunda ciudad industrial del país y una de las más pobladas.

Si se analiza detalladamente la Tabla 2, se puede apreciar los diferentes rangos de las propiedades físico-químicas de las aguas meteóricas. Esta variación está condicionada por la ubicación de las estaciones de muestreo en diferentes condiciones climáticas y geográficas, además de la variabilidad del tipo de precipitaciones que se producen en la región.

**Relaciones iónicas**

El uso de las relaciones iónicas en la caracterización

de las aguas naturales constituye una herramienta de gran utilidad. Las relaciones iónicas reflejan las diferentes propiedades de origen de las sales presentes en la precipitación y las variaciones de estas producidas por la interacción con el medio. En la Tabla 3 se puede apreciar el gran rango de variaciones que presentan éstas en las precipitaciones de la región oriental. A continuación explicaremos algunas que consideramos pueden ser significativas para el área de estudio.

En el caso de la relación  $rMg/rCa$ , su valor varía entre 0,2 y 0,8. Se puede apreciar que en todos los casos su valor es inferior al agua de mar (5,3). Esta gran diferencia puede estar marcada por el aporte de calcio a la atmósfera. El exceso de calcio en el agua de lluvia se debe posiblemente al polvo terrestre finamente fraccionado y transportado por el viento a las capas altas de la atmósfera. Este polvo procede de los materiales geológicos presentes en la zona. El 60% de las rocas que afloran en superficie son carbonatadas o terrígeno-carbonatadas, formadas en cuencas marinas.

Cuando se analiza la relación  $rSO_4/rCl$  se puede apreciar que su valor es superior al del agua de mar en Moa (0,18) y Santiago de Cuba (0,96). En el resto de las estaciones se aprecia un valor similar a la del agua de mar o inferior a ésta (Tabla 3). Su incremento se debe a la existencia de aporte antropogénico en las zonas de Moa y Santiago de Cuba, pues en estas zonas se concentran importantes industrias y en el caso de Santiago de Cuba este aporte es aún mayor, debido a la existencia de un gran núcleo urbano de más de medio millón de habitantes. Además, hay que señalar que en la Sierra Maestra, próxima a Santiago de Cuba, se encuentran importantes yacimientos de sulfuros que se explotan por el método de minería a cielo abierto y pueden ser una fuente de emisión de sulfatos a la atmósfera, como resultado del aporte de polvo por la erosión eólica.

La evaluación de la relación  $rCa/rCl$  presenta valores entre 0,1 y 0,45, casi un orden de magnitud supe-

Altura (m s.n.m.)	Sierra Maestra		Anual	Mayari-Sagua-Moa-Baracoa		Anual
	Período húmedo	Período seco		Período seco	Período húmedo	
0-250	76,01	129,31	198,72	-19,43	263,82	194,62
250-500	114,54	202,45	316,25	-39,52	390,11	295,51
500-700	42,32	91,05	152,92	-36,54	128,31	114,02
700-1000	-35,53	-22,65	-8,81	-42,02	-159,93	-79,63
1000-1120	-70,12	-79,54	-94,83			

Tabla 1. Gradientes verticales de las precipitaciones en dos áreas de la región oriental (mm/100 m de altitud). El signo negativo indica una inversión del gradiente

Table 1. Average values of vertical gradient (mm/100 m of altitude) of rainwater in different areas of the eastern region of Cuba

Estación	Santiago de Cuba				Guantánamo				Bayamo				Sierra Moa-Baracoa			
Distancia a la costa (km)	5				12.5				10				12.5			
Entorno	Urbano				Rural				Rural				Rural			
Muestras	11				6				6				5			
	(mg/L)															
	Med	Max	Min	Des	Med	Max	Min	Des	Med	Max	Min	Des	Med	Max	Min	Des
pH (unid.)	4,3	4,8	4,0	0,2	5,7	6,1	5,1	0,4	6,0	6,9	4,9	0,8	4,9	5,6	4,3	0,5
CE (µS/cm)	49,1	44,5	39,7	36,2	27,7	34,8	24,9	4,0	33,2	40,5	28,7	4,9	42,5	51,0	35,0	6,8
CO <sub>2</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	3,1	2,4	0,3	1,2	1,6	1,0	0,2
O <sub>2</sub>	2,8	3,8	2,1	0,6	3,5	4,5	2,9	0,6	4,2	5,8	2,1	1,2	4,4	4,5	4,2	0,1
NO <sub>3</sub>	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
CO <sub>3</sub> H-	2,9	4,1	1,6	0,6	2,5	2,9	2,1	0,3	3,1	3,9	2,3	0,6	1,5	1,9	1,2	0,2
SO <sub>4</sub>	2,7	4,0	1,6	0,4	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
Cl-	3,0	3,4	2,6	0,2	2,9	3,0	2,7	0,1	3,2	4,2	2,1	0,8	1,8	2,0	1,6	0,1
Ca <sup>++</sup>	1,0	2,0	0,3	0,3	0,8	1,0	0,5	0,2	0,3	0,6	0,2	0,1	0,3	0,4	0,1	0,1
Mg <sup>++</sup>	0,4	0,9	0,1	0,2	0,4	0,6	0,2	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,2	0,5	0,1	0,2
Na <sup>+</sup>	1,7	2,7	1,3	0,2	1,5	1,6	1,3	0,1	1,2	1,4	1,1	0,1	1,2	1,5	0,9	0,2
K <sup>-</sup>	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,0
TSD	11,9	14,4	9,3	2,0	8,3	8,7	7,7	0,4	8,2	9,9	7,0	1,1	5,1	5,8	4,6	0,5

Estación	Sierra Cristal				Sierra Maestra				Las Tunas				Sagua de Tánamo			
Distancia a la costa (km)	50				12.5				15				5			
Entorno	Rural				Rural				Rural				Rural			
Muestras	6				6				7				2			
	(mg/L)															
	Med	Max	Min	Des	Med	Max	Min	Des	Med	Max	Min	Des	Med	Max	Min	Des
pH (unid.)	4,9	5,6	4,5	0,4	5,7	6,2	5,1	0,4	6,0	6,4	5,0	0,5	4,9	5,0	4,8	0,1
CE (µS/cm)	41,2	43,5	39,1	1,8	38,0	43,0	32,6	3,8	12,6	17,2	9,3	3,0	45,0	46,0	44,0	1,4
CO <sub>2</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	2,1	1,3	0,3	3,1	3,5	2,1	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0
O <sub>2</sub>	4,8	5,9	3,2	1,0	3,5	5,0	2,4	0,9	4,3	6,1	1,5	1,5	4,3	4,4	4,2	0,2
NO <sub>3</sub>	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CO <sub>3</sub> H-	2,2	2,8	2,0	0,3	2,3	2,8	1,6	0,5	1,5	1,9	1,2	0,3	2,2	2,4	2,1	0,2
SO <sub>4</sub>	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,0
Cl-	2,3	2,4	2,2	0,1	2,3	2,9	1,7	0,4	1,8	2,3	1,3	0,3	1,7	1,8	1,6	0,1
Ca <sup>++</sup>	0,7	1,2	0,2	0,4	0,8	0,9	0,5	0,2	0,5	0,8	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,0
Mg <sup>++</sup>	0,2	0,4	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2	0,4	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3
Na <sup>+</sup>	1,1	1,3	1,1	0,1	2,2	2,7	2,0	0,3	1,2	1,4	1,1	0,1	1,3	1,3	1,2	0,1
K <sup>-</sup>	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0
TSD	6,7	7,8	5,7	0,7	7,9	8,5	6,9	0,7	5,5	7,0	4,5	0,8	5,9	6,2	5,5	0,8

Estación	Yateras				Baracoa				Moa							
Distancia a la costa (km)	35				1				1							
Entorno	Rural				Rural				Urbano							
Muestras	5				2				44							
	(mg/L)															
	Med	Max	Min	Des	Med	Max	Min	Des	Med	Max	Min	Des				
pH (unid.)	5,7	5,9	5,2	0,3	5,9	6,2	5,5	0,5	4,9	6,0	4,1	0,6				
CE (µS/cm)	32,0	41,2	22,7	6,6	41,0	43,1	38,9	3,0	10,7	18,4	5,8	2,9				
CO <sub>2</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	3,1	2,3	0,6	2,1	6,3	0,2	1,2				
O <sub>2</sub>	5,1	6,2	4,1	0,9	4,3	5,3	3,2	0,9	5,3	6,9	1,2	1,3				
NO <sub>3</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,3	2,9	0,0	0,6				
CO <sub>3</sub> H-	2,1	3,2	0,9	1,1	1,2	1,5	1,0	0,2	1,4	2,9	0,1	0,9				
SO <sub>4</sub>	0,1	0,2	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6	2,4	0,0	0,5				
Cl-	1,5	2,1	1,1	0,4	1,9	2,4	1,3	0,4	1,8	5,6	1,1	0,8				
Ca <sup>++</sup>	0,7	1,1	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,0	0,5	1,7	0,1	0,3				
Mg <sup>++</sup>	0,2	0,3	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,0	0,2	0,6	0,0	0,1				
Na <sup>+</sup>	1,2	1,5	1,0	0,2	1,3	1,4	1,1	0,1	0,7	2,8	0,2	0,5				
K <sup>-</sup>	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,4	0,0	0,1				
TSD	5,8	8,5	3,5	2,4	4,9	6,0	3,9	0,8	5,5	11,5	2,5	2,1				

Tabla 2. Valores medios de las características físico-químicas del agua de lluvia en diferentes puntos de la región oriental de Cuba. Med es la media, Max es el valor máximo y Min es el valor mínimo

Table 2. Average values of the physical and chemical characteristics of rainwater in different points of the eastern region of Cuba, Med is average, Max is the maximum value and Min is the minimum value

Nombre	Moa	Baracoa	Yateras	Sagua de Tánamo	Las Tunas	Sierra Maestra	Sierra Cristal	Sierra Moa-Baracoa	Bayamo	Guantánamo	Santiago de Cuba	Océano Atlántico
Entorno	Urbano	Rural	Rural	Rural	Rural	Rural	Rural	Rural	Rural	Rural	Urbano	Marino
rSO <sub>4</sub> /rNa	0,166	0,079	0,085	0,160	0,164	0,051	0,104	0,042	0,081	0,068	1,549	0,12
rCl/rNa	0,902	1,468	1,263	1,376	1,484	1,088	2,009	1,492	2,569	1,973	1,703	1,09
rMg/rCa	0,309	0,680	0,300	0,792	0,314	0,224	0,313	0,615	0,486	0,526	0,394	5,30
rK/rNa	0,037	0,040	0,025	0,040	0,049	0,019	0,035	0,076	0,049	0,047	0,086	0,02
rCl/rHCO <sub>3</sub>	1,690	1,504	0,710	0,771	1,191	1,017	1,045	1,158	1,019	1,315	1,028	215,42
rSO <sub>4</sub> /rCl	0,184	0,054	0,067	0,116	0,110	0,047	0,052	0,028	0,032	0,034	0,909	0,11
rK/rCl	0,041	0,027	0,020	0,029	0,033	0,017	0,017	0,051	0,019	0,024	0,050	0,02
rCa/rCl	0,451	0,135	0,470	0,140	0,282	0,323	0,290	0,148	0,111	0,267	0,332	0,04
rMg/rCl	0,139	0,092	0,141	0,110	0,088	0,072	0,091	0,091	0,054	0,140	0,131	0,22

Tabla 3. Valores medios de las relaciones iónicas del agua de lluvia en diferentes puntos de la región oriental de Cuba. r= valor en meq/L  
 Table 3. Average values of rainwater ionic ratios in different points of the eastern region of Cuba. r= value in meq/L

rior a la relación de estos elementos en el agua de mar (0,04). Si se considera que todo el cloro es procedente del agua de mar este valor confirma un enriquecimiento en calcio de las aguas de lluvia, como muestra el valor obtenido de la relación rMg/rCa.

Los valores que se obtienen de calcular la relación rMg/rCl muestran un valor inferior a la del agua de mar, en las once estaciones de muestreo analizadas, lo que indica que para el período analizado no se aprecia un aporte de magnesio de origen antrópico u otra fuente, al agua de lluvia.

### Exceso de sulfato

El exceso de sulfato se calcula a partir de la concentración de sulfato y sodio en el agua de la lluvia y en el agua de mar y verificando la hipótesis de que todo el sodio presente en el agua meteórica es de origen marino, debido a que no existen rocas evaporíticas en la zona oriental y no se conoce la existencia de fuentes de origen antrópico en las zonas donde se ha realizado el muestreo, que pueda tener un aporte significativo a la atmósfera. Para el cálculo se emplea la siguiente ecuación (Rodhe, 1982):

$$SO_{4exceso}^{2-} = (SO_{4lluvia}^{2-}) - (Na_{lluvia}^{+}) \left( \frac{SO_{4mar}^{2-}}{Na_{mar}^{+}} \right)$$

Como valor de referencia para realizar el cálculo del sulfato en exceso se consideró la concentración media del Océano Atlántico en sulfato (2642 mg/L) y sodio (10551 mg/L) (Rodríguez, 2002). Los resultados muestran que el sulfato en exceso presente en las

precipitaciones tiene su origen en la actividad humana (Tabla 4) y se localiza en las dos zonas industriales más importantes presentes en el área de estudio, Moa y Santiago de Cuba. El exceso de sulfato en Santiago de Cuba es un orden de magnitud superior que en Moa. El aporte de sulfato marino, considerando las áreas no afectadas por actividad humana es relativamente pobre, e incluso, de acuerdo a los datos que se muestran en la Tabla 4, se aprecia una disminución con relación al agua de mar, como lo indica el signo negativo en 9 de las estaciones analizadas (Tabla 4).

### Aporte de sales al terreno por las precipitaciones

El conocimiento del total de sales aportadas al terreno por la lluvia y la deposición del polvo atmosférico presenta una gran interés desde el punto de vista práctico en la hidrogeología y el medio ambiente: I) son muy importantes para la agricultura, pues miden el aporte de nutrientes que reciben las plantas a través de la lluvia, II) se utilizan en la evaluación de sales disueltas que pueden llegar a los acuíferos, III) en la evaluación de la recarga de acuíferos y IV) en estudios de impacto ambiental (lluvias ácidas, corrosión a la rocas ornamentales y las estructuras metálicas) (Topol, 1986, Bravo *et al.*, 2002). El aporte de sales atmosféricas al terreno se determina a partir de la suma de la concentración salina del agua de lluvia en intervalos de tiempos conocidos ( $\Delta t$ ), para lo que se estima la aportación total de sales ( $A_{st}$ ) sobre una superficie de terreno determinada, para un período de tiempo suficientemente representativo. El cálculo se realiza de acuerdo a la siguiente ecuación

Nombre	Moa	Baracoa	Poblado Yateras	Sagua de Tánamo	Las Tunas	Sierra Maestra	Sierra Cristal	Sierra Moa-Baracoa	Bayamo	Guantánamo	Santiago de Cuba
mg/L											
SO <sub>4</sub> <sup>fluvia</sup>	0,56	0,10	0,10	0,20	0,20	0,11	0,12	0,05	0,10	0,10	2,71
Na <sup>fluvia</sup>	1,17	1,26	1,18	1,25	1,22	2,16	1,15	1,18	1,23	1,48	1,75
SO <sub>4</sub> <sup>exceso</sup>	0,27	-0,21	-0,19	-0,11	-0,10	-0,43	-0,17	-0,24	-0,21	-0,27	2,27

Tabla 4. Valores medios del exceso o defecto de sulfato en el agua de lluvia en la región oriental de Cuba  
 Table 4. Average values of the excess of sulphate in rainwater in different points of the eastern region of Cuba

(Meszaros, 1981):  $A_{st}=C_i P_i$  donde:  $P_i$  es la precipitación recogida en un intervalo de tiempo  $\Delta t$  y  $C_i$  es la concentración total de sales o de un ión determinado en la precipitación acumulada.

De acuerdo al valor medio de la composición química del agua de lluvia y el volumen de las precipitaciones, se calculó el aporte medio de sales por elemento y el total para cada estación de muestreo, donde se aprecia que la masa total de bicarbonatos aportada al terreno representa el mayor valor (2,9 g/m<sup>2</sup>/año) seguida del cloruro (2,8 g/m<sup>2</sup>/año), el sodio (1,9 g/m<sup>2</sup>/año) y el calcio (0,6 g/m<sup>2</sup>/año). En el resto de los elementos el volumen anual es muy inferior a 0,3 g/m<sup>2</sup>/año (Tabla 5).

Considerando la composición química media de las aguas de lluvia y el total de sólidos disueltos, se puede establecer que el aporte total de sales se sitúa entre 5 y 14 g/m<sup>2</sup>/año para la región oriental. Las zonas con los mayores valores de aporte anual de sales por la lluvia son Baracoa, Sierra Moa-Baracoa,

Santiago de Cuba y Moa. En todas ellas se superan los 10 g/m<sup>2</sup>/año (Tabla 5).

La variabilidad de la masa de sales aportadas al terreno esta condicionada por la variabilidad climática de la isla de Cuba, causada por tres tipos de precipitaciones: I) "nortes" o chubascos en la estación invernal, II) tormentas de verano y III) perturbaciones ciclónicas. A ello se suman factores como la intensidad y dirección del viento, la insolación, y otros. Además, hay que señalar que estos resultados presentan una incertidumbre asociada al utilizar el valor medio de las precipitaciones y de la composición química del agua de lluvia.

**Análisis de la deposición total de cloruro**

El análisis de la deposición de cloruro asociado a las precipitaciones atmosféricas es de extraordinaria importancia en los estudios hidrogeológicos para

Nombre	Moa	Baracoa	Yateras	Sagua de Tánamo	Las Tunas	Sierra Maestra	Sierra Cristal	Sierra Moa-Baracoa	Bayamo	Guantánamo	Santiago de Cuba	Media
N	44	2	5	2	7	6	6	5	6	6	11	
P (mm)	2000	2800	1000	1500	1100	1200	1500	2800	1100	800	1000	
g/m <sup>2</sup> /año												
NO <sub>3</sub>	0,80	1,41	0,20	0,22	0,30	0,51	0,50	1,67	0,71	0,21	0,45	0,60
CO <sub>3</sub> H	2,84	3,44	2,10	3,35	1,67	2,77	3,32	5,51	3,77	1,78	3,99	2,88
SO <sub>4</sub>	1,12	0,28	0,10	0,30	0,22	0,13	0,18	0,17	0,11	0,08	2,71	0,45
Cl	3,54	5,18	1,49	2,58	1,99	2,82	1,82	5,58	3,26	2,34	2,81	2,78
Ca <sup>++</sup>	0,90	0,70	0,70	0,36	0,56	0,91	1,01	0,88	0,39	0,62	0,99	0,67
Mg <sup>++</sup>	0,32	0,48	0,21	0,29	0,18	0,20	0,32	0,54	0,19	0,33	0,39	0,29
Na <sup>+</sup>	,34	3,53	1,18	1,88	1,34	2,59	1,73	4,01	1,35	1,18	1,75	1,91
K <sup>+</sup>	0,16	0,14	0,03	0,08	0,07	0,05	0,06	0,31	0,07	0,06	0,15	0,10
A <sub>st</sub>	11,30	13,89	5,83	8,84	6,06	9,53	8,46	13,64	9,20	6,41	12,84	9,13

Tabla 5. Aporte medio anual de los elementos mayoritarios y aporte total considerando el contenido medio de sales disueltas en el agua de lluvia para diferentes áreas, en g/m<sup>2</sup>/año (P es precipitación media anual en milímetros; N: número de muestras analizadas; A<sub>st</sub> es el aporte total de sales al año)

Table 5. Average salt deposition of major elements and total deposition taking into account the average dissolved salt content in rainwater for the areas analysed in g/m<sup>2</sup>/year. P is average of rainfall; N is the number of analysed samples; A<sub>st</sub> is the total yearly salt deposition

evaluar la recarga de los acuíferos, ya que el cloruro presenta ausencia de intercambio con el terreno, alta solubilidad y estabilidad química, factores que lo convierten en un trazador casi ideal; además su cuantificación o medida es relativamente fácil, con el uso de diferentes técnicas analíticas ampliamente utilizadas y disponibles en el mercado. Los datos incluidos en este apartado corresponden a diferentes campañas de muestreo, normalmente realizados con objetivos diferenciados, como se discutió en la Introducción del trabajo. En la Fig. 5a y Tabla 5 se presentan las diferentes estaciones utilizadas en el análisis de la distribución de la deposición del cloruro. Se aprecia en la Fig. 5a y 5b que las mayores concentraciones de cloruro se encuentran en la zona costera, disminuyendo esta en la medida que se aleja de la costa, tanto en la costa sur como en la norte. En la Figura 5b se representan los valores de la deposición de cloruro en relación con la distancia a la costa. En todos los casos se observa como el gradiente es decreciente hacia el interior de la isla y que se ajusta a una evolución exponencial muy marcada en las zonas costeras. El gradiente tan elevado en las zonas costeras se debe a la orografía del terreno, que está condicionada por los dos sistemas montañosos, la Sierra Maestra al sur y el macizo Mayarí-Sagua de Tánamo-Moa-Baracoa al norte, que actúan como barrera orográfica.

Si se analiza un sector detallado de la costa norte, correspondiente a la zona del sistema montañoso Moa-Baracoa, donde se dispone de una amplia información hidrogeológica y de la composición del agua de lluvia en cuatro estaciones dispuestas perpendicularmente a la línea de costa, se puede apreciar la existencia de un gradiente importante en la concentración del ión cloruro en el agua de lluvia desde la costa hacia el interior (Fig. 5c). Este perfil representa una longitud de 16 km, y el gradiente confirma el observado en la Figuras 5a y 5b, donde la disminución del aporte de cloruro a medida que se avanza de la costa hacia el interior de la región oriental se hace evidente.

### **Estimación de la recarga a las aguas subterráneas**

El conocimiento de la recarga de las aguas subterráneas es de extraordinaria importancia en la gestión y control de los recursos hídricos. Su conocimiento es siempre un valor estimado para lo que se emplean diferentes métodos entre los que destacan los métodos químicos ambientales (MQA). Los MQA aplicados a la estimación de la recarga a partir de la infiltración de las precipitaciones tienen su base en el balance de solutos conservativos, generalmente cloruro, comparando la aportación de la lluvia con el contenido en el agua subterránea y el agua de esco-

rentía superficial y subsuperficial. Para la estimación de la recarga en el área de estudio se han empleado datos de la deposición total de cloruro correspondiente a diferentes campañas de muestreo, tomadas en varios pluviómetros repartidos en la zona oriental, correspondientes a datos propios y de diferentes fuentes bibliográficas. Los datos empleados en este estudio responden a períodos inferiores a cinco años generalmente, aunque hay que señalar que existen estaciones en las que se ha realizado un muestreo no continuo en diferentes períodos que abarcan un intervalo de veinte años. La estación más estudiada es la ubicada en la ciudad de Santiago de Cuba.

La recarga o infiltración del agua de lluvia sobre el terreno se determina mediante (Custodio y Llamas, 1983):  $RC_R = PC_P - EC_E$  (mm/año y mg/L), donde:  $R$  es la recarga,  $C_R$  es la concentración de ión cloro en la recarga,  $P$  es la precipitación,  $C_p$  es la concentración del ión cloro en la lluvia,  $E$  es la escorrentía directa y subsuperficial,  $C_E$  es la concentración del ión cloro en la escorrentía directa y subsuperficial.

En la Tabla 6 se representan los diferentes parámetros empleados para estimar los valores de la recarga en diferentes puntos de los acuíferos de la región oriental. Estos valores responden a datos de este trabajo y diferentes fuentes bibliográficas que se especifican en la Tabla 6. Los valores de  $R$ ,  $P$  y  $E$  son los valores acumulados en el período estudiado y  $C_R$ ,  $C_p$  y  $C_E$  las concentraciones medias del ión cloruro en cada tipo de agua. En este caso se supone que la escorrentía superficial no produce eliminación de sales, que no hay aporte artificial de cloruro, que hay un equilibrio entre la retención en la vegetación y el aporte de esta al morir. Todos los casos que se citan responden a acuíferos freáticos donde no se desarrollan actividades agrícolas significativas. Considerando esto se obtienen diferentes volúmenes de recarga en la región oriental que se muestran en la Tabla 6 y Figura 6. Considerando todos los casos analizados se puede apreciar que el rango de la recarga en la región oriental es muy amplio y oscila entre los 100 y 600 mm/año. Los valores más bajos se corresponden con la zona sur de Guantánamo, donde el volumen de precipitación es inferior a los 800 mm/año, mientras que los más elevados se localizan en la zona norte principalmente en el sistema montañoso Mayarí-Sagua-Moa-Baracoa (Fig. 4). En todos los casos estos valores están condicionados por el volumen de las precipitaciones, el relieve, tipo de acuífero y la posición geográfica. Es de señalar que la existencia de un gran valor de las precipitaciones y diferentes niveles de terrazas facilitan la recarga en la zona norte, dando lugar al desarrollo de una potente corteza laterítica que en muchos casos alcanza los 50 m de potencia.

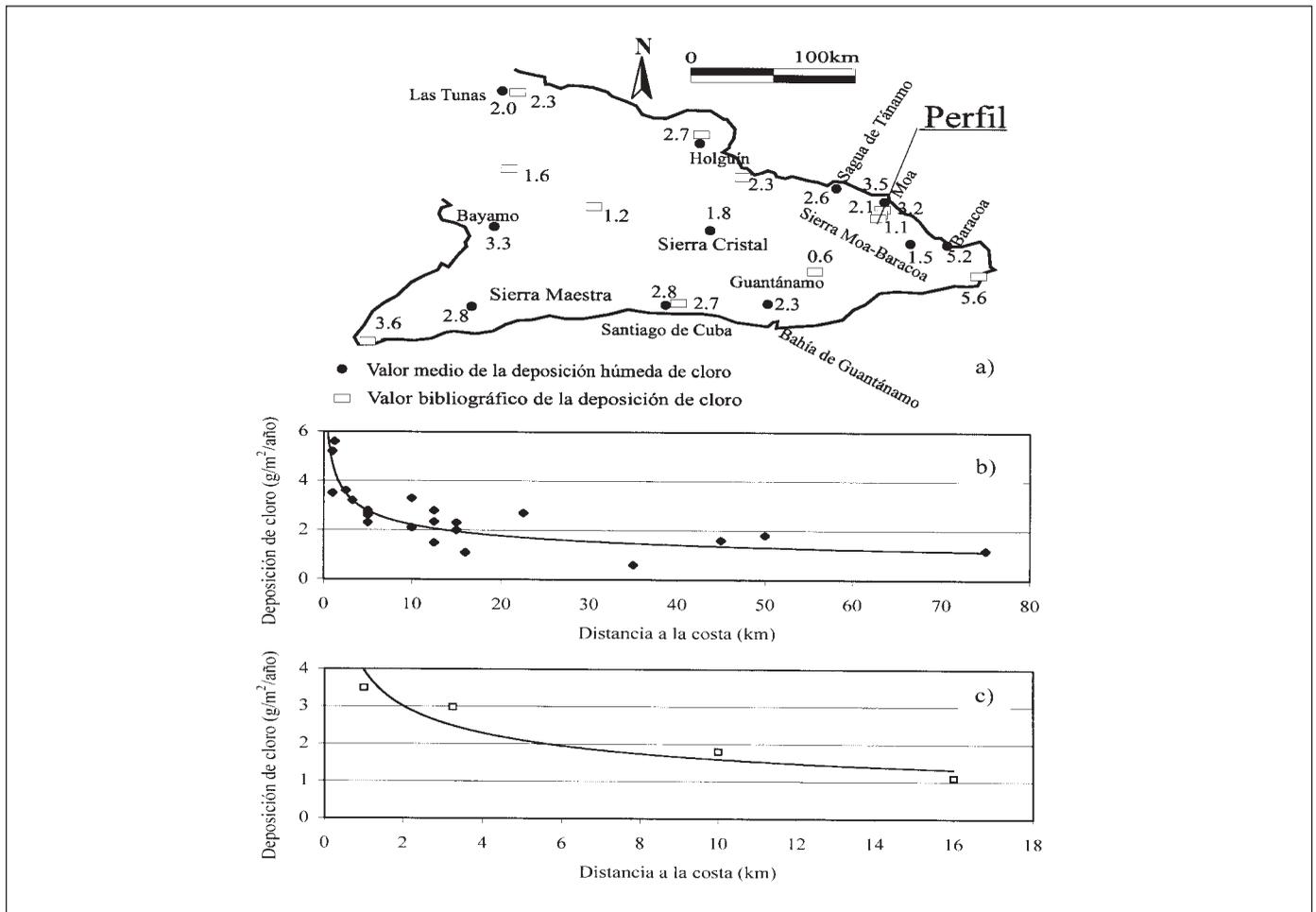


Fig. 5. Localización geográfica de las estaciones donde se ha medido la deposición total de cloruro: a) masa de cloruro depositada en g/m<sup>2</sup>/año en diferentes estaciones de muestreo; b) distribución de la deposición de cloruro con relación a la distancia a la costa; c) deposición de cloruro por la lluvia versus distancia a la costa norte, perfil Fig. 6a

Fig.5. a) Geographical location of station samples and total chloride deposition (g/m<sup>2</sup>/year); b) distribution of the chlorine deposition in relation to the distance to the coast; c) chloride deposition in the rain versus distance to the north coast, profile Fig. 6a)

## Discusión

Lo valores de pH entre 4,42 y 5,96 son coherentes con los obtenidos por Gutiérrez y Travieso (1978) para cuatro estaciones a nivel nacional, una de ellas ubicada en la ciudad de Santiago de Cuba. Rodríguez y Sosa (1993) registran valores de pH en el agua de lluvia asociados a las ondas tropicales en Cuba que oscilan entre 4,6 y 6,5. Sin embargo, los valores entre 5,6 y 5,9 obtenidos en cinco estaciones de las once analizadas son ligeramente superiores a los reportados en la bibliografía (Gambell y Fisher, 1976; Galloway et al., 1989; Mcdowell et al., 1990; Bravo et al., 2000; Parungo et al., 1990). El hecho de tener un pH relativamente elevado se debe al aporte de polvo a la atmósfera procedente de los materiales geológicos terrígenos carbonatados existentes en el área de

estudio. Este aporte de polvo genera un exceso de calcio y bicarbonato suficiente para neutralizar la acidez que pueden aportar otros elementos.

Los valores medios de la mineralización se sitúan entre 5 y 13 mg/L, valores dentro de rango reportado en diferentes trabajos (Svitov et al., 1988; Rodríguez y Sosa, 1993). Estos autores reportan para Cuba una media entre 10 y 25 mg/L.

Los datos de composición química obtenidos en la región oriental y en las diferentes estaciones del área del Caribe, relacionadas en la Tabla 7, muestran una marcada influencia del aerosol marino, pero su análisis demuestra que existen diferentes aportes antropogénicos de calcio, sulfato y potasio. Estos resultados son similares a los obtenidos por otros autores en Cuba (Gutiérrez y Travieso, 1978; Rodríguez y Sosa, 1993).

En la Tabla 7 se realiza una comparación entre la composición química media de dos estaciones de la región oriental ubicadas en el norte y en el sur del área de estudio y tres puntos diferentes de regiones costeras en el Caribe y el centro del Golfo de México. En la Tabla 7 se puede apreciar que existe una concentración iónica similar para los diferentes elementos analizados. Aunque la concentración de nitrato, sodio y cloruro es mayor en otras regiones que en la región oriental de Cuba.

Los valores de la recarga obtenidos con los datos de este trabajo y los existentes en la literatura muestran rangos muy parecidos para un mismo acuífero (Tabla 6).

### Conclusiones

El volumen anual de precipitaciones en la costa norte

de la región oriental es muy superior a la sur. En la zona de Moa y Baracoa las precipitaciones son tres o cuatro veces mayores que en el sur de Guantánamo.

En cuanto a la composición química, las aguas son cloruradas sódicas, mostrando su origen marino. El pH es ácido con un rango medio entre 4.4 y 5.7. Existen componentes en exceso como el sulfato y el calcio. El exceso de calcio en el agua de lluvia se debe posiblemente al polvo terrestre finamente dividido y transportado por el viento a las capas altas de la atmósfera. El polvo procede de los materiales geológicos presentes en la zona, donde el 60% son rocas carbonatadas o terrígeno-carbonatadas. En el caso del sulfato es debido al aporte antropogénico, pues sólo se observa un exceso en las zonas industriales y urbanas de Moa y Santiago de Cuba. Al parecer, el aporte de aerosoles ácidos sólo se produce en la estación de Moa y la de Santiago de Cuba, donde la concentración de sulfato es superior a la del calcio.

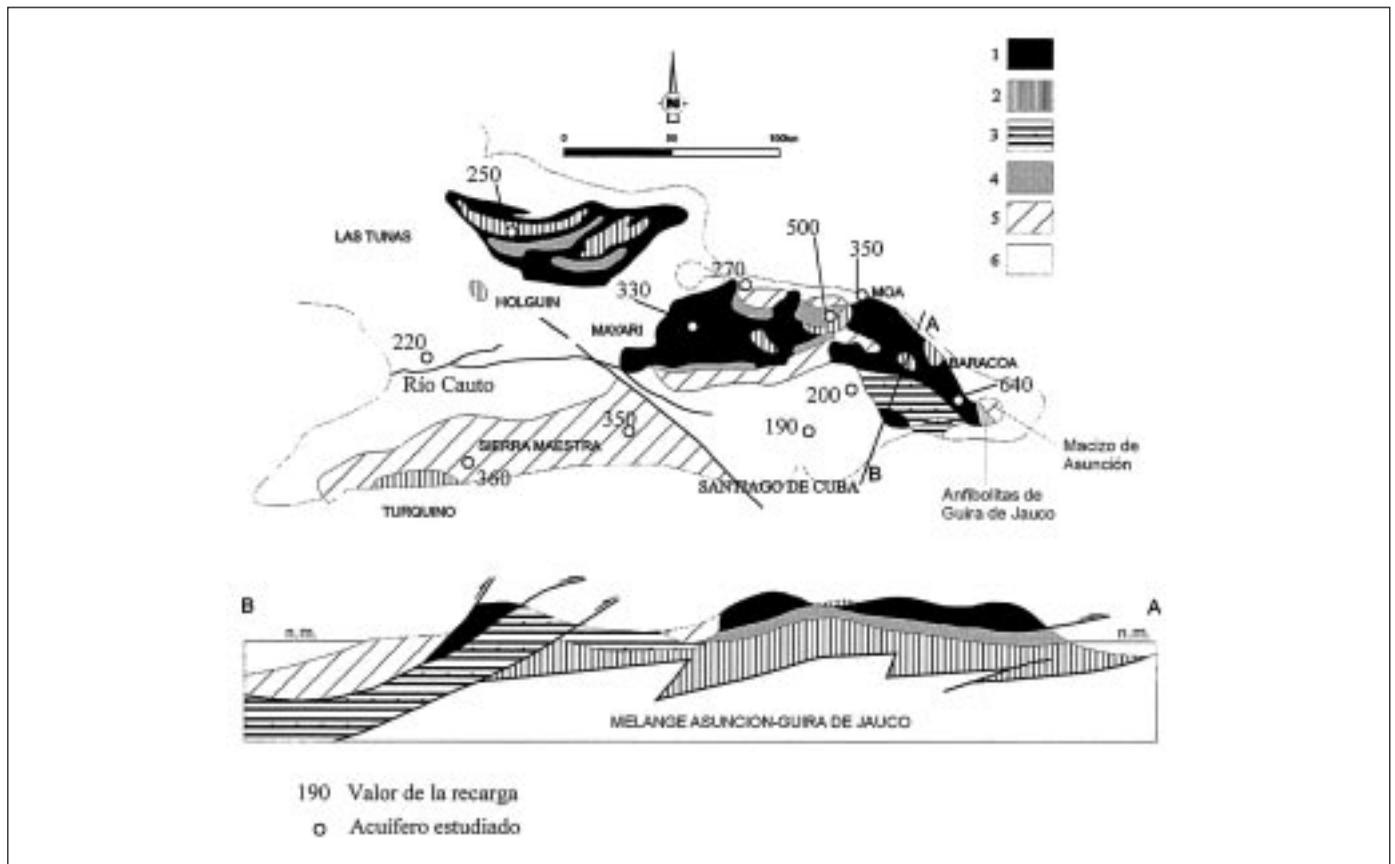


Fig. 6. Esquema de distribución y posición estructural de las principales unidades geológicas de la región oriental (Iturralde-Vinent, 1994) y valor de la recarga en diferentes acuíferos. 1. Ofiolitas Jurásico-Cretácicas, 2. Rocas volcánicas del Cretácico, 3. Rocas volcánicas metamórficas del Cretácico, 4. Olistostromas de edad Maestriense-Paleoceno, 5. Rocas volcánicas y volcánicas sedimentarias del Terciario, y 6. Rocas sedimentarias (carbonatadas, terrígeno-carbonatadas y terrígenas)

Fig. 6. Structural position of main geological unit of the eastern region and recharge in different aquifers. 1. ophiolites, 2. Cretaceous volcanic rocks, 3. Cretaceous meta-volcanic rocks, 4. Olistostromes, 5. Tertiary volcanic and sedimentary-volcanic rocks, and 6. Sedimentary rocks (limestones, mixed and detritic rocks)

Rocas acuíferas	P(mm)		Cl(p)		E(mm)		Cl(E)		Cl(i)		R(mm)		Referencias
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	
Ultrabasitas Moa	2300	2100	1,2	1,1	370	350	3	2,5	3,1	2,9	532	495	Rodríguez, (2002)
Ultrabasitas Moa	2300	2100	1,3	1,1	370	350	3	2,5	3,1	2,9	606	495	Este trabajo
Ultrabasitas Baracoa	3400	3000	1,4	1,3	408	365	3,5	2,8	5,2	4,8	641	600	Buguel'skiy y Formell, (1973a)
Aluvial Río Moa	1600	1200	1,5	1,4	192	120	5,2	4,1	4,2	3,9	334	305	Rodríguez, (2002)
Aluvial Río Moa	1600	1200	1,8	1,1	192	120	5,2	4,1	4,2	3,9	448	212	Este trabajo
Ultrabasitas Nicaro	1500	1300	2,3	1,8	180	145	4,5	3,6	7,8	6,1	338	298	Rodríguez y Candela, (1995)
Aluvial Río Levisa	1500	1250	2,1	1,8	180	138	6,1	5,1	7,5	6,5	274	238	Rodríguez y Candela, (1996)
Aluvial Río Levisa	1500	1250	2	1,7	180	138	6,1	5,1	7,5	6,5	254	219	Este trabajo
Aluvial Río Cauto	1500	1350	1,6	1,2	180	125	5,8	4,6	6,4	5,9	212	177	De Miguel, (1986)
Rocas volcánicas	1500	1200	1,8	1,7	180	150	4,9	4,1	5,0	4,7	364	303	Terrero, (1986)
Rocas volcánicas	2200	1900	1,5	1,4	264	215	4,6	4,2	8,0	7,2	261	244	Buguel'skiy y Formell, (1973b)
Rocas carbonatadas	1400	1200	1,8	1,6	120	105	5,1	4,8	10,0	8,9	191	159	Fagundo, (1996)
Rocas carbonatadas	1400	1200	1,6	1,4	120	105	5,1	4,8	10,0	8,9	163	132	Este trabajo

Tabla 6. Estimación de la recarga (R) en diferentes acuíferos. Max es el valor máximo y Min es el valor mínimo  
 Table 6. Estimation of groundwater recharge (R). Max is the maximum value and Min is the minimum value

	<sup>1</sup> Bermudas	<sup>2</sup> El Verde Puerto Rico	<sup>3</sup> Puerto Morales México	<sup>4</sup> Golfo de México	Moa	Santiago de Cuba
pH	4,88	5,13	5,35	5,50	4,86	4,25
			(µeq/L)			
NO <sub>3</sub>	4,4	4,3	11,4	27,0	0,6	0,8
CO <sub>3</sub> H	28,1	17,0	25,0	56,0	9,2	43,6
SO <sub>4</sub>	138,0	82,0	150,0	144,0	49,9	48,0
Cl	10,0	8,5	17,0	33,0	22,5	15,9
Ca <sup>++</sup>	27,0	1,5	28,0	31,0	7,0	6,3
Mg <sup>++</sup>	116,0	66,0	128,0	138,0	55,3	28,2
Na <sup>-</sup>	3,4	1,8	5,0	3,0	2,1	2,4

<sup>1</sup>Galloway *et al.*, (1989), <sup>2</sup>Mcdowell *et al.*, (1990), <sup>3</sup>Bravo *et al.*, (2000), <sup>4</sup>Parungo *et al.*, (1990)

Tabla 7. Comparación de la concentración iónica (meq/L) en dos estaciones de la región oriental y en diferentes estaciones en el área del Caribe y Centro América  
 Table 7. Comparison of measured average ion concentrations (mEq/L) in two stations of the eastern region and in other reference sites in the Caribbean and Central América area

La masa total de sales depositadas en la región oriental oscila entre 4 y 14 g/m<sup>2</sup>/año. Las estaciones con influencia de la actividad antrópica presentan un aporte en exceso de sulfato al terreno muy superior a la media.

La estimación de la recarga considerando el ión cloruro constituye una buena herramienta para estimar la infiltración en la zona estudiada, ya que se obtienen valores muy similares a los estimados en diferentes estudios hidrogeológicos como se muestra en la Tabla 6.

La recarga en la región oriental presenta un rango muy amplio entre 150 y 600 mm/año y está condicionada por el volumen de las precipitaciones, las condiciones topográficas y el tipo de acuífero.

### Agradecimientos

Los autores agradecen las oportunas críticas realizadas por el Dr. Constantino de Miguel, investigador del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de la

Provincia de Holguín y Profesor del Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa y a Iban Masachs, investigador del departamento de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Cataluña, que permitieron la realización de este trabajo con una mayor calidad. Es de señalar el soporte financiero realizado por la Fundación Séneca (Murcia) al primer autor del Trabajo.

## Referencias

- Alfonso, A.P., González, E. y Pérez, R. 1981. La precipitación en la Isla de la Juventud. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, La Habana, Cuba, 4: 149-151.
- Álvarez, R. 1983. Nuevo método de empleo de los datos de viento, para su aplicación a los problemas de la contaminación del aire. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, La Habana, Cuba, 1: 139-141.
- Arellano, M., Molerio, L.F. y Suri, A. 1992. Efecto de altitud del  $^{18}\text{O}$  en zonas de articulación de llanura criptocárstica con carso de Montaña. *Primer taller internacional sobre cuencas experimentales en el Karst*. (Editores Arellano, M., Antigüedad, I., Morell, I. y Eraso, A.) Matanzas, Cuba, 29-42.
- Barceló, C. 1982. Comportamiento de la lluvia en cinco puntos de Cuba. *Revista Voluntad Hidráulica*, La Habana, Cuba, XIX(59-60): 27-33.
- Batista, L.M., Matos, F., y Gutiérrez, R. 2002. Comportamiento de las precipitaciones en Cayo Coco, Jardines del Rey, Cuba. *El Agua y el Clima*. Publicación de la Asociación Española de Climatología (AEC), Serie A(3): 135-142.
- Bravo, H.A., Saavedra, M.I.R., Sánchez, P.A., Torres, R.J. y Granada, L.M.M. 2000. Chemical composition of precipitation in a Mexican Maya Region, *Atmospheric Environment*, 34, 1197-1204.
- Buguel'skiy, Y.Y. y Formell, F. 1967. *Geoquímica e hidrogeoquímica de la corteza de intemperismo ferroniquelífera de Cuba*. Serie Geológica, La Habana, Cuba, 3: 1-33.
- Buguel'skiy, Y.Y. y Formell, F. 1973a. *Influencia del factor hidrogeoquímico en la formación y distribución de las cortezas de intemperismo de Cuba*. Serie Geológica, La Habana, Cuba, 13: 1-15.
- Buguel'skiy, Y.Y. y Formell, F. 1973b. *La hidrogeoquímica y cuestiones de la génesis de las cortezas de intemperismo niquelíferas de Cuba*. Serie Geológica, La Habana, Cuba, 12: 1-15.
- Burlutski, R.F. 1973. *Los macropocesos formadores de las precipitaciones en Cuba*. Trabajo Instituto Geofísica, Inédito, 101 p.
- Buurman, P., van Lagen, B. y Velthorst, E.J. 1996. *Manual for soil and water analysis*. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands:1-291.
- Cerón, R.M.B., Padilla, H.G., Belmont, R.D., Torres, M.C.B., García, R.M. y Báez, A.P. 2002. Rainwater chemical composition at the end of the mid-summer drought in the Caribbean shore of the Yucatan Peninsula. *Atmospheric Environment*, 36(14): 2367-2374.
- Corvo, F., Haces, C., Betancourt, N., Maldonado, L., Veleza, L., Echeverría, M., de Rincón, O.T. y Rincón, A. 1997. Atmospheric corrosivity in the Caribbean Area. *Corrosion Science*, 39(5): 823-833.
- Cuesta, O.A. Ortiz, P.L. y González M.L. 1998. Deposition and atmospheric nitrogen concentrations trends in Cuba. *Water, Air, and Soil Pollution*, 106(1-2): 163-169.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. 1983. *Hidrología subterránea*. Capítulos 4 y 10. Editorial Omega. 2ª edición. Barcelona. Vol (I):1-1157. (Sección 4 y 10).
- Davitaya, F.F. y Trusov, I.I. 1965. *Los recursos climáticos de Cuba: su utilización en la economía nacional*. Academia de Ciencias de Cuba. La Habana: 1-41.
- De Miguel, C. 1996. Método para pronóstico de factibilidad de salinización de los suelos por riego sobre formaciones arcillosas de origen marino. *Investigaciones hidrogeológicas en Cuba*. Eds. Arellano, D.M., Gómez-Martín, M.A. y Antigüedad, I. Grupo de Recursos Hídricos y Geología Ambiental, Univ. Granada Publicaciones, Granada, España: 243-251.
- Díaz, A. y Góngora, J.A. 1974. Evaluación de procesos hidrogeológicos: la sequía. *Revista Voluntad Hidráulica*, La Habana, Cuba, XI(29): 1-11.
- Díaz, L.R., Díaz, J.L. y Hernández, E. 1983. Influencia de la orografía sobre la distribución de las precipitaciones en Cuba. *Revista Voluntad Hidráulica*, La Habana, Cuba, XX(1): 42-46.
- Egorov, S.V. y Luegue, J.R. 1967. *Hidrogeología de Cuba*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos e Instituto Cubano de Recursos Minerales. La Habana, Cuba, 1-84.
- Fagundo, J.R., Valdés, J.J. y Rodríguez, J.E. 1996. *Hidroquímica del karst*. Grupo de Recursos Hídricos y Geología Ambiental, Univ. Granada Publicaciones, Granada, España: 1-212.
- Fernández, N. y Maximova, O. 1990. Algunas experiencias durante la determinación de los parámetros de las precipitaciones anuales. *Revista Voluntad Hidráulica*, La Habana, Cuba, XII(83): 41-47.
- Gagua, G., Zarembo, S. y Izquierdo, A., 1976. Sobre el nuevo mapa isoyético de Cuba. *Voluntad Hidráulica*, La Habana, Cuba, 37: 35-41.
- Galloway, J.N., Keene, W.C., Artz, R.S. Miller, J.M., Church, T.M. y Knap, A.H. 1989. Processes controlling the concentration of  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ , H, HCOO and  $\text{CH}_3\text{COO}$  in precipitation on Bermuda. *Tellus*, B41: 427-443.
- Gambell, A.W. y Fisher, D.W. 1976. Occurrence of sulphate and nitrate in rainfall. *Journal Geophysical Research*, 69: 4203-4211.
- González, E.A. y Lora, B. Régimen de lluvia de la pluvisilva submontana en Cuba. *Revista Voluntad Hidráulica*, La Habana, Cuba, XXIV(74): 64-68.
- Gutiérrez, J. y Travieso, H. 1978. Características físicas y químicas de las aguas de precipitación cubanas. *Voluntad Hidráulica*, La Habana, Cuba, 47-48: 18-22.
- Iturralde-Vinent, M.A. 1994. Cuban geology: a new plate-tectonic synthesis. *Journal of Petroleum Geology*, 17(1): 39-70.
- Kissin, I., Semeonov, A. e Izquierdo, A. 1968. *Ciclicidad de las precipitaciones y del escurrimiento y su sincronismo*

- en el territorio de Cuba. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos Publicación Especial, La Habana, Cuba, 6: 1-91.
- Kochiasvilli, B.M. 1972. Características de cálculo de lluvias torrenciales para la provincia de La Habana. *Voluntad Hidráulica*, La Habana, Cuba, 22: 16-24.
- Koochiashvilli, B. y Batista, J.L. 1972. Precipitaciones del ciclón Laura en Isla de Pinos. *Revista Voluntad Hidráulica*, La Habana, Cuba, X(24): 16-23.
- Lecha, L., Fernández, A. y Bueno, J. 1994. Las precipitaciones diarias en la región central de Cuba. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, La Habana, Cuba, 23-24: 79-82.
- López, G., Herrera, J. y Bernal, P. 2000. Estimación de los coeficientes de evaporación para la región oriental de Cuba. *Revista Voluntad Hidráulica*, La Habana, Cuba, XXI (92-93): 36-40.
- Mcdowell, W.H., Sánchez, C.G., Asbury, C.E. y Ramos-Peréz, R. 1990. Influence of sea salt aerosols and long range transport on precipitation chemistry at El Verde, Puerto Rico. *Atmospheric Environment*, A24(11): 2813-2821.
- Meszaros, E. 1981. *Atmospheric chemistry: fundamental aspects*. Editorial Akadémiai Kiadó, Budapest, 1-201.
- Paraguay, F., Nagamoto, C., Hoyt, S. y Bravo, H.A. 1990. The investigation of air quality and acid rain over the Gula of Mexico. *Atmospheric Environment*, A24(1): 109-123.
- Riazanov, V.S. 1975. Curvas de acercamiento de las precipitaciones de mayor intensidad en el período seco. *Revista Voluntad Hidráulica*, XII(35): 7-11.
- Rodhe, H. 1982. Regional and global budget in atmospheric trace constituent. In: *Tropospheric Chemistry and Air Pollution*. Technical Note No. 176, World Meteorological Organization, Geneva: 1-14.
- Rodríguez, R. 1998. Características de las aguas minerales y medicinales de Cuba. *Acta Geológica Hispánica*, 33(1-4): 373-393.
- Rodríguez R. 2002a. *Estudio experimental de flujo y transporte de cromo, níquel y manganeso en residuos de la zona minera de Moa (Cuba): influencia del comportamiento hidromecánico*. PhD Thesis, University Polytechnic of Catalonia (UPC), Barcelona, España:1-465. Publicada en <http://www.tdcat.cesca.es/TDCat-0731102-084652/>
- Rodríguez R. 2002b. <http://www.tdcat.cesca.es/TDCat-0731102-084652/>. roberto.rodriguez-pacheco@upc.es.
- Rodríguez, A. y Sosa, M. 1993. Caracterización química de la lluvia asociada a las ondas tropicales. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, La Habana, Cuba, (21-22): 145-161.
- Rodríguez, R. y Candela, L. 1998. El impacto de la actividad minera y la contaminación de las aguas subterráneas. Moa, Holguín, Cuba. *La Contaminación de las Aguas. Un Problema Pendiente*. (Eds. Samper, J., Sahuquillo, A., Capilla, J.E. y Gómez, J.) Instituto Tecnológico GeoMinero de España, Madrid: 305-311.
- Rodríguez, A., González, M.L. y Sánchez, P. 1989. Composición química de las precipitaciones en algunos frentes fríos de la temporada 1984-1985. *Revista Cubana de Meteorología*, Ciudad de La Habana, Cuba, 2(1): 65-68.
- Rodríguez, R. y Téllez, W. 1995. Las precipitaciones en el noreste holguinero y valoración del impacto ambiental. *Congreso Ecología. Camagüey. Cuba. Libro resumen*: 1-6.
- Svistov, P.F., López, C.M., Azcuy, G., Cuesta, O. y Sánchez, P. 1988. *Observaciones sobre la contaminación del aire en Cuba. Aspectos meteorológicos de la contaminación atmosférica*. Editor Berlyand, M.E., Sanpetersburgo, Rusia, 1-250.
- Téllez, W. 1995. *Análisis de la pluviometría en el noreste holguinero y algunas consideraciones sobre el impacto ambiental en Moa*. Fondo Geológico, Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa, Holguín, Cuba, 1-49.
- Terrero, A.C. 1986. Caracterización de las condiciones hidrogeológicas de la provincia de Holguín. *Minería y Geología*, Ciudad de La Habana, Cuba 2: 19-29.
- Topol, L.E. 1986. Differences in ionic composition and behaviour in winter rain and snow. *Atmosphere Environment* 20(2): 347-355.
- Trusov, I.I. 1968. *Las precipitaciones en la Isla de Cuba*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, La Habana, Cuba, 1-61.
- Trusov, I.I., Izquierdo, A. y Díaz, L.R. 1978. Fluctuaciones de las precipitaciones durante muchos años en Cuba. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, La Habana, Cuba, 1: 99-102.

Recibido: junio 2004

Aceptado: agosto 2004