



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

EFFECTO DE LA LLUVIA ÁCIDA SOBRE EL  
MATERIAL CONSTITUYENTE DE LOS  
MONUMENTOS MAYAS MEXICANOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERIA AMBIENTAL

P R E S E N T A

ROGELIO SOTO AYALA

DIRECTOR

DR. HUMBERTO BRAVO ÁLVAREZ



MÉXICO, D.F.

SEPTIEMBRE DE 1999

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

275830



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**TEMPLO DE LAS INSCRIPCIONES**

**PALENQUE, MÉXICO**

# EFFECTO DE LA LLUVIA ÁCIDA SOBRE EL MATERIAL CONSTITUYENTE DE LOS MONUMENTOS MAYAS MEXICANOS

## TABLA DE CONTENIDOS

	Página
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	
<b>RESUMEN</b> .....	i
<b>SUMMARY</b> .....	iii
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	V
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	Vii
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	ix
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	4
<b>2.1 Efecto de la lluvia ácida en la roca caliza</b> .....	5
<b>2.2 Química de la disolución</b> .....	10
<b>3. DESARROLLO EXPERIMENTAL</b> .....	14
<b>3.1 ROCA CALIZA UTILIZADA</b> .....	15
<b>3.1.1 Sitio de muestreo y condiciones climáticas promedio</b> .....	15
<b>3.1.2 Características petrográficas</b> .....	16
<b>3.1.3 Densidad, porosidad y absorción de agua</b> .....	17
<b>3.1.4 Dimensiones y masas</b> .....	17
<b>3.1.5 Análisis por difracción de rayos-x</b> .....	19
<b>3.2 AGUA DE LLUVIA</b> .....	19
<b>3.2.1 Sitio de muestreo</b> .....	19
<b>3.2.2 Recolección y preservación</b> .....	19

3.2.3 Determinación del pH y de la conductividad.....	20
3.2.3.1 Determinación del pH.....	20
3.2.3.2 Determinación de la conductividad.....	21
3.2.4 Determinación de aniones y de cationes .....	21
3.2.4.1 Determinación de aniones .....	22
3.2.4.1.1 Preparación del eluyente .....	22
3.2.4.1.2 Preparación de las soluciones patrón y estándar .....	22
3.2.4.1.3 Condiciones experimentales .....	24
3.2.4.1.4 Cromatogramas y curvas de calibración .....	24
3.2.4.2 Determinación de cationes .....	25
3.2.4.2.1 Preparación del eluyente .....	25
3.2.4.2.2 Preparación de las soluciones patrón y estándar.....	25
3.2.4.2.3 Condiciones experimentales .....	26
3.2.4.2.4 Cromatogramas y curvas de calibración .....	26
3.3 CÁMARA DE INTEMPERISMO ACELERADO .....	27
3.3.1 Diseño, construcción y prueba.....	27
3.4 GOTEO SOBRE LA ROCA CALIZA .....	32
3.4.1 Composición química del agua ácida .....	32
3.4.2 Preparación del agua ácida.....	33
3.4.3 Descripción del proceso .....	33
3.5 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONATO DE CALCIO EN LA ROCA CALIZA MEDIANTE CROMATOGRFÍA IÓNICA .....	36
3.6 DETERMINACIÓN DE LAS MASAS DE LAS MUESTRAS DE ROCA CALIZA Y ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS-X DESPUÉS DEL GOTEO .....	36

<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>37</b>
<b>4.1 Balance iónico en las muestras de agua de lluvia de Puerto Morelos .....</b>	<b>38</b>
<b>4.2 Conductividades teórica y experimental en las muestras de agua de lluvia de Puerto Morelos .....</b>	<b>38</b>
<b>4.3 Composición química del influente y del efluente en la cámara de intemperismo acelerado.....</b>	<b>41</b>
<b>4.4 Balance iónico en las muestras de agua obtenidas en la cámara de intemperismo acelerado .....</b>	<b>42</b>
<b>4.5 Conductividades teórica y experimental en las muestras de agua en la cámara de intemperismo acelerado .....</b>	<b>43</b>
<b>4.6 Recesión superficial en las muestras de roca caliza .....</b>	<b>44</b>
<b>4.7 Determinación del contenido de carbonato de calcio en la roca caliza .....</b>	<b>45</b>
<b>4.7.1 Mediante la pérdida en masa de la roca caliza .....</b>	<b>45</b>
<b>4.7.2 Mediante la concentración total de calcio en el efluente .....</b>	<b>46</b>
<b>4.8 Análisis por difracción de rayos-x de la roca caliza después del goteo .....</b>	<b>46</b>
<b>5. EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>51</b>
<b>7. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>53</b>
<b>8. ANEXOS .....</b>	<b>57</b>
<b>I. ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS-X EN LA ROCA CALIZA ANTES Y DESPUÉS DEL GOTEO CON LLUVIA ÁCIDA.....</b>	<b>58</b>
<b>II. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA DE LLUVIA DE PUERTO MORELOS (AÑOS: 1994 Y 1995) .....</b>	<b>64</b>
<b>III. CROMATOGRAMAS Y CURVAS DE CALIBRACIÓN DE LOS ESTÁNDARES DE ANIONES Y DE CATIONES .....</b>	<b>67</b>
<b>IV. CROMATOGRAMAS OBTENIDOS EN LA DISOLUCIÓN DE LA ROCA CALIZA CON ÁCIDO CLORHÍDRICO.....</b>	<b>82</b>
<b>V. BALANCE IÓNICO EN LAS MUESTRAS DE AGUA DE LLUVIA DE PUERTO MORELOS. AÑOS: 1994 Y 1995 .....</b>	<b>86</b>

<b>VI. CONDUCTIVIDADES TEÓRICA Y EXPERIMENTAL EN LAS MUESTRAS DE AGUA DE LLUVIA DE PUERTO MORELOS. AÑOS: 1994 Y 1995 .....</b>	<b>93</b>
<b>VII. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL INFLUENTE Y DEL EFLUENTE EN LA CÁMARA DE INTEMPERISMO ACELERADO .....</b>	<b>96</b>
<b>VIII. BALANCE IÓNICO EN LAS MUESTRAS DE AGUA OBTENIDAS EN LA CÁMARA DE INTEMPERISMO ACELERADO .....</b>	<b>113</b>
<b>IX. RECESIÓN SUPERFICIAL EN LAS MUESTRAS DE ROCA CALIZA .....</b>	<b>116</b>

## AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento más sincero a las instituciones y personas siguientes que hicieron posible la realización de la presente investigación:

- ◆ A los miembros del Jurado Doctoral: Dres.: Humberto Bravo Álvarez, Georgina Fernández Villagómez, Liliana Saldívar Osorio, Pedro Martínez Pereda, Javier Miranda Martín del Campo, Federico García Jimenez y Helio Flores Ramírez, por su asesoría, la revisión de este trabajo y sus valiosas sugerencias para el mejoramiento del mismo.
- ◆ En especial al Dr. Humberto Bravo Álvarez, Jefe de la Sección de Contaminación Ambiental, del Centro de Ciencias de la Atmósfera, por las facilidades otorgadas para llevar a cabo la parte experimental del proyecto en dichas instalaciones.
- ◆ A los colaboradores del Dr. Humberto Bravo Álvarez: Ma. Isabel Saavedra Rosado, Ricardo Torres Jardón, Pablo Sánchez Álvarez, Rodolfo Sosa Echeverría, L. Margarita Granada Macías y Leticia Valdez Barrón, quienes de una u otra manera me apoyaron técnica y administrativamente en la consecución de esta investigación.
- ◆ Al CONACYT por su apoyo a este estudio como parte del proyecto denominado: Impacto de la Precipitación Ácida en el Deterioro de Monumentos Mayas Mexicanos, con número de clave: P218CCO/891532.
- ◆ A la Dra. Ma. Teresa Franco, Directora General del INAH, por su apoyo y las facilidades concedidas para visitar los sitios arqueológicos de interés.
- ◆ A la División de Ciencias Básicas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, en especial al M.I. Bernardo Frontana de la Cruz, por contribuir en la realización de esta investigación, así como en la difusión de la misma a nivel internacional.
- ◆ A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA), por su apoyo económico para la realización de este trabajo doctoral.
- ◆ A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, por las facilidades técnicas y administrativas proporcionadas. En especial al Ing. Enrique Heras Herrera, Coordinador de la Sección de Ingeniería Ambiental, por su apoyo y asesoría en los trámites administrativos requeridos.
- ◆ Al Dr. Ismael Ferrusquía Villafranca, Investigador Titular C del Depto. de Paleontología, del Instituto de Geología de la UNAM, por su apoyo en la obtención de las fotomicrografías de la roca caliza, así como por su asesoría.
- ◆ A la Química Leticia Baños López, Técnico Titular B, adscrita al Laboratorio de Rayos-X, Instituto de Investigaciones en Materiales, por los análisis de difracción por rayos-x en la roca caliza, así como por su interpretación.



- ◆ Al Ing. Alfredo Rodríguez Manjarrez, responsable del taller mecánico del área Instrumentación Meteorológica, así como a sus colaboradores, por su apoyo en la construcción e instrumentación de la cámara de intemperismo acelerado.
- ◆ A la Bióloga Catalina Ferat Toscano, Técnico Académico Asociado C de Tiempo Completo, adscrita a la Sección de Ingeniería Ambiental, División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, por su apoyo en la determinación de bicarbonatos en las muestras de agua de lluvia.
- ◆ A Armando Zertuche Palos, por la donación de las llaves de uso hospitalario que se adaptaron a la cámara de intemperismo acelerado.

## DEDICATORIA

- ◆ A mi esposa e hijos: Graciela, Luis Daniel y Adrián, por su paciencia y por comprender que esta meta es una de las más importantes de nuestra vida.
- ◆ A mis padres: Elisa y Tomás, quienes con su ejemplo y amor me han impulsado a seguir adelante, a pesar de las adversidades.
- ◆ A mis hermanos: Gilberto, Elba, Ubaldo y Silvia, así como a sus hijos, para que alcancen todos los objetivos que se han forjado.
- ◆ A mis compañeros de la División de Ciencias Básicas, lugar donde he colaborado durante casi 20 años, por haber compartido conmigo parte de su valioso tiempo, en actividades académicas y recreativas que nunca olvidaré.

## RESUMEN

Este trabajo muestra los resultados obtenidos al exponer cuatro muestras de roca caliza, procedentes de Tulum, Quintana Roo, a una lluvia ácida preparada en el laboratorio.

La composición química del agua ácida se eligió con base en el análisis químico de 28 muestras de agua de lluvia procedentes de Puerto Morelos, Quintana Roo, en el año de 1995. El análisis consistió en la determinación de los iones cloruro, nitrato, sulfato, sodio, amonio, potasio, magnesio y calcio, mediante cromatografía iónica (HPLC). Asimismo, se determinaron el pH y la conductividad de cada una de las soluciones.

El pH del agua de lluvia preparada en el laboratorio se ajustó a valores cercanos a 4.6, que fue el valor más pequeño de pH que se determinó en una muestra de agua de lluvia en el año de 1994.

El experimento se llevó a cabo en una cámara de intemperismo acelerado, donde se simularon las condiciones climatológicas promedio existentes en Puerto Morelos: temperatura, 26°C, y humedad, 80%. Se describen los materiales que se utilizaron para la construcción de la cámara, así como su operación.

El análisis por difracción de rayos-x, antes del goteo con lluvia ácida, muestra que ésta consiste fundamentalmente de calcita, aragonita y montmorillonita, siendo mayoritarios los dos primeros compuestos (87±0.5)%. Después del experimento, el análisis por difracción de rayos-x no detecta la presencia de la arcilla, aunque sí la formación de un nuevo compuesto: sulfato de calcio hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.19\text{H}_2\text{O}$ ).

El análisis químico del efluente muestra que las concentraciones de los iones calcio y bicarbonato se incrementan notablemente en relación con sus concentraciones en el agua incidente. Por otra parte, el agua ácida sufre un proceso de neutralización hasta valores de pH cercanos a 7.0.

De acuerdo con los resultados cuantitativos obtenidos y con las especies iónicas identificadas en la solución, se propone un mecanismo de disolución de la roca caliza por la lluvia ácida.

La superficie de la roca caliza sobre la que se llevó a cabo el proceso de goteo con lluvia ácida fue de 25 cm<sup>2</sup>, aproximadamente, y el diámetro promedio de la gota, con su desviación estándar, fue de (0.50±0.018) cm.

Se determinó que la recesión superficial de las 4 muestras de roca caliza se encuentra entre 3.5 y 4.9 µm/año. Se establecen las diferencias en el diseño experimental que dan lugar a resultados variables de este parámetro entre ésta y otras investigaciones.

Finalmente se realizan los estudios de balance iónico y de conductividad, tanto en las muestras provenientes de Puerto Morelos, como del efluente, en la cámara de intemperismo acelerado. Los resultados obtenidos indican que los iones analizados, en las muestras de agua de lluvia, son los más representativos al valor del pH de las soluciones.

## SUMMARY

This work presents the results after four samples of limestone (calcium carbonate) were exposed to an acid rain prepared in the laboratory. The origin of such samples is Tulum, Quintana Roo, México.

The chemical composition of the acid rain was chosen on the basis of the chemical analysis of 28 samples of rainwater from Puerto Morelos, Quintana Roo in 1995. The analysis consisted on the determination of chloride, nitrate, sulphate, sodium, ammonium, potassium, magnesium and calcium ions by means of high performance liquid chromatography. Similarly, the pH and the conductivity of every one of the solutions, were determined.

The pH of the rainwater prepared in the laboratory was adjusted to values around 4.6, this was the lowest value for pH determined on a sample of rainwater in 1994.

The experiment was carried out in an experimental rainfall simulator chamber, where the average climatological conditions in Puerto Morelos were simulated: temperature 26°C and humidity 80%. The materials used in the construction of the chamber, as well as its operation, are also described.

The analysis by x-rays diffraction of the limestone, previous to the dropping with acid rain, shows that it consists fundamentally of calcite, aragonite and montmorillonite, being the two first compounds in the greater percent ( $87\pm 0.5\%$ ).

Once the experiment was carried out, the analysis by x-rays diffraction did not detect the presence of clay but it showed the presence of a new compound: sulfate of hydrated calcium ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.19\text{H}_2\text{O}$ ).

The chemical analysis of the runoff shows that the concentrations of the calcium and bicarbonate ions are greatly increased in relation to their concentrations in the incident rainfall. On the other hand, the acid water experiments a neutralization process up to pH values close to 7.0.

In accordance with the quantitative results and with the ionic species identified within the solution, a mechanism of dissolution of the limestone by means of acid rain, is proposed.

The surface of the limestone on which the process of acid rain dropping was carried out, was of 25 cm<sup>2</sup> approx. and the average diameter of the drop was ( $0.50\pm 0.018$ ) cm.

It was determined that the superficial recession of the four samples of limestone is between 3.5 and 4.9  $\mu\text{m}/\text{year}$ . The differences on the experimental design are established and they render variable results on this parameter in relation to this and other researches.

Finally, the studies on conductivity and ionic balance carried out on the samples from Puerto Morelos as well as on the runoff in the experimental rainfall simulator chamber, show that the ions which were analyzed, are the most representative of the solutions to the value of pH that they own.

## LISTA DE TABLAS

	Página
<b>TABLA 1</b> DENSIDAD, POROSIDAD Y ABSORCIÓN DE AGUA DE LA ROCA CALIZA .....	17
<b>TABLA 2</b> MASAS ORIGINALES Y DIMENSIONES DE LAS MUESTRAS DE ROCA CALIZA .....	18
<b>TABLA 3</b> MASAS DE LAS SALES UTILIZADAS EN LA PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES PATRÓN DE ANIONES .....	22
<b>TABLA 4</b> VOLUMEN UTILIZADO DE LAS SOLUCIONES DE 1000 ppm PARA PREPARAR LAS SOLUCIONES ESTÁNDAR DE ANIONES .....	23
<b>TABLA 5</b> COMPOSICIÓN DE LOS ESTÁNDARES DE ANIONES .....	24
<b>TABLA 6</b> MASAS DE LAS SALES UTILIZADAS EN LA PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES PATRÓN DE CATIONES .....	25
<b>TABLA 7</b> COMPOSICIÓN DE LOS ESTÁNDARES DE CATIONES .....	26
<b>TABLA 8</b> CONCENTRACIÓN TEÓRICA DEL AGUA DE LLUVIA UTILIZADA EN EL EXPERIMENTO .....	32
<b>TABLA 9</b> SALES UTILIZADAS EN LA PREPARACIÓN DEL AGUA ÁCIDA .....	33
<b>TABLA 10</b> VOLUMEN TOTAL EMPLEADO EN EL GOTEO, TIEMPO TOTAL DE GOTEO Y FLUJO VOLUMÉTRICO PARA CADA UNA DE LAS MUESTRAS EN LA CÁMARA DE INTEMPERISMO ACELERADO .....	41
<b>TABLA 11</b> RECESIÓN SUPERFICIAL EN LAS MUESTRAS DE ROCA CALIZA .....	44
<b>TABLA 12</b> CONTENIDO DE CARBONATO DE CALCIO EN LA ROCA CALIZA .....	45
<b>TABLA 13</b> PÉRDIDA EN MASA DE LAS MUESTRAS DE ROCA CALIZA MEDIANTE ANÁLISIS GRAVIMÉTRICO .....	45

<b>TABLA 14</b> PÉRDIDA DE CARBONATO DE CALCIO EN LAS MUESTRAS DE ROCA CALIZA MEDIANTE ANÁLISIS GRAVIMÉTRICO .....	46
<b>TABLA 15</b> PÉRDIDA DE CARBONATO DE CALCIO EN LAS MUESTRAS DE ROCA CALIZA MEDIANTE LA CUANTIFICACIÓN DEL CALCIO EN EL EFLUENTE .....	46



## LISTA DE FIGURAS

	Página
<b>FIGURA 1</b> UBICACIÓN DEL SITIO DE MUESTREO DE LA ROCA CALIZA Y DE LA LLUVIA ÁCIDA .....	15
<b>FIGURA 2</b> FOTOMICROGRAFÍA DE LA ROCA CALIZA DONDE SE MUESTRAN LOS COMPONENTES ALOQUÍMICOS .....	16
<b>FIGURA 3</b> ROCA CALIZA ANTES Y DESPUÉS DE SU CORTE Y PULIDO .....	18
<b>FIGURA 4</b> COLECTOR DEL AGUA DE LLUVIA EN PUERTO MORELOS.....	20
<b>FIGURA 5a</b> VISTA GENERAL DE LA CÁMARA DE INTEMPERISMO ACELERADO .....	29
<b>FIGURA 5b</b> ROCA CALIZA, TUBO DE DISTRIBUCIÓN Y SOSTENEDORES DE MUESTRA .....	30
<b>FIGURA 5c</b> BAROTERMOHIGRÓGRAFO Y RECIPIENTE CON AGUA DESIONIZADA .....	30
<b>FIGURA 5d</b> CAPTACIÓN DEL EFLUENTE PROCEDENTE DE LA CÁMARA DE INTEMPERISMO ACELERADO .....	31
<b>FIGURA 6</b> DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA CÁMARA DE INTEMPERISMO ACELERADO .....	34
<b>FIGURA 7</b> CONDUCTIVIDADES EXPERIMENTAL Y TEÓRICA DE LAS MUESTRAS DE AGUA DE LLUVIA DE PUERTO MORELOS. AÑO 1994 .....	39
<b>FIGURA 8</b> CONDUCTIVIDAD EXPERIMENTAL EN FUNCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TEÓRICA EN LAS MUESTRAS DE AGUA DE LLUVIA DE PUERTO MORELOS. AÑO 1994.....	39

<b>FIGURA 9</b> CONDUCTIVIDADES EXPERIMENTAL Y TEÓRICA DE LAS MUESTRAS DE AGUA DE LLUVIA DE PUERTO MORELOS. AÑO 1995 .....	40
<b>FIGURA 10</b> CONDUCTIVIDAD EXPERIMENTAL EN FUNCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TEÓRICA EN LAS MUESTRAS DE AGUA DE LLUVIA DE PUERTO MORELOS. AÑO 1995 .....	40
<b>FIGURA 11</b> CONDUCTIVIDADES EXPERIMENTAL Y TEÓRICA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE MUESTRA OBTENIDA EN LA CÁMARA DE INTEMPERISMO ACELERADO .....	43

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>A, PK HT</b>	= Altura del pico cromatográfico
<b>Ao</b>	= Área de la roca caliza sobre la que incidió la lluvia ácida
<b>C</b>	= Concentración
<b>C.E.</b>	= Conductividad experimental de las muestras de agua de lluvia
<b>CIA</b>	= Cámara de intemperismo acelerado
<b>C.R.</b>	= Conductividad real de las muestras de agua de lluvia
<b>C.S.</b>	= Conductividad experimental de la solución de KCl
<b>CT</b>	= Conductividad teórica de las muestras de agua de lluvia
<b>d</b>	= Distancia interplanar en un cristal
<b>dyf</b>	= Agua desionizada y filtrada
<b>EDTA</b>	= Ácido etilén diamino tetraacético
<b>EPA</b>	= Agencia de Protección Ambiental, E. U. A.
<b>G</b>	= Gasto volumétrico del agua incidente
<b>h,k,l</b>	= Índices de Miller
<b>HPLC</b>	= Cromatografía de líquidos de alta presión
<b>K</b>	= Constante de la celda de conductividad
<b>L</b>	= Litros
<b>mm</b>	= Milímetros (unidad de precipitación pluvial)
<b>mM</b>	= Milimolar
<b>M</b>	= Molar
<b>ppm</b>	= Partes por millón
<b>R</b>	= Coeficiente de correlación
<b>Rs</b>	= Recesión superficial
<b>RS</b>	= Recesión superficial anual
<b>RT</b>	= Tiempo de retención

---

$\rho$	= Densidad de la roca caliza
$t$	= Tiempo total de goteo
$v$	= Volumen de agua que incidió sobre la roca

*1. INTRODUCCIÓN*

Se acepta de manera general que los principales contaminantes emitidos a la atmósfera, como resultado de la actividad humana, son los óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), hidrocarburos, compuestos orgánicos volátiles, etc.

El proceso mediante el cual algunos compuestos se depositan por la lluvia o la nieve, sobre las superficies de los materiales, se llama depósito húmedo. Sin embargo, también ocurre otro proceso atmosférico conocido como depósito seco. En el depósito seco, partículas tales como cenizas, o gases como el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) o el óxido nítrico ( $\text{NO}$ ) se depositan o se adsorben sobre las superficies de los materiales. Los mecanismos precisos por los cuales el depósito seco se lleva a cabo, y sus efectos sobre los suelos, bosques, cosechas y edificios aún no se entienden totalmente.

En cuanto al depósito húmedo, éste se presenta cuando algunos compuestos, sobre todo los contaminantes sulfurados y nitrogenados, al entrar en contacto con el agua, dan lugar a los ácidos sulfúrico y nítrico, respectivamente. Estos ácidos fuertes disminuyen el pH de la lluvia a un valor inferior a 5.6 (valor del pH de la lluvia en equilibrio con el dióxido de carbono atmosférico).

A la lluvia con estas características se le da el nombre genérico de lluvia ácida.

Todos los materiales expuestos a "cielo abierto" son susceptibles a deteriorarse por efecto de la lluvia ácida; sin embargo, uno de los aspectos a los que se le da más importancia, a nivel mundial, es al efecto que causa la lluvia ácida sobre objetos que forman parte del patrimonio cultural de una nación, como son los monumentos.

En las sociedades industriales contemporáneas, los procesos de intemperismo natural se han agudizado por las concentraciones elevadas de los contaminantes. Los contaminantes ácidos en particular, tanto en el aire como en la lluvia, están identificados entre los problemas más serios que afectan a las rocas calizas, componentes fundamentales de los monumentos.

En general, los ácidos presentes tanto en los depósitos secos como húmedos, son agentes importantes que causan deterioro en la roca caliza y en el mármol. El daño que se genera puede ser el resultado de la reacción ácida directa con la superficie de la roca, o se puede deber a la formación de fases minerales secundarias, tales como el yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), producto de la acción del ácido sulfúrico sobre la roca. El transporte capilar del sulfato de calcio a través de los poros de la roca puede causar un incremento en el volumen de ésta y en consecuencia acelerar su deterioro.

La temperatura, la humedad, la presencia de ácidos orgánicos y la presión parcial del dióxido de carbono en la solución, son otros de los factores que influyen en el deterioro de los materiales.

Conocer los mecanismos detallados del deterioro de la roca caliza en un ambiente contaminado es, por lo tanto, fundamental para proteger y conservar las estructuras de la lluvia ácida y de la contaminación del aire.

El presente trabajo tiene como objetivos fundamentales:

- 1.- Cuantificar los efectos que causa la lluvia ácida en el material con el que están contruidos los monumentos mayas, legado invaluable de la cultura de México y de América Central, mediante la utilización de una cámara de intemperismo acelerado (CIA).
- 2.- Establecer los mecanismos de disolución que intervienen en el proceso de deterioro de los monumentos mayas mediante la caracterización precisa del material utilizado en su construcción.

En México existen relativamente pocos estudios concernientes a evaluar el efecto que causan los contaminantes atmosféricos sobre los monumentos mayas. No se han reportado investigaciones que hagan uso de cámaras de intemperismo acelerado donde se simule el efecto de degradación, que causa la lluvia ácida, sobre estos materiales.

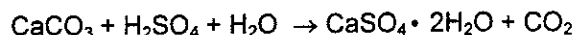
Es pues de capital importancia contar, en nuestro país, con un estudio de este tipo con el objeto de fomentar el desarrollo de esta línea de investigación y proponer una estrategia de conservación que permita limitar el deterioro de nuestros monumentos.

2. ANTECEDENTES



## 2.1 Efecto de la lluvia ácida en la roca caliza

Se han realizado algunos estudios relativos al impacto que causa la lluvia ácida sobre algunos materiales. Cheng y Castillo (1984) llevaron a cabo un estudio sobre el deterioro del mármol del City Hall, en Schenectady, New York. Ellos encontraron que la conversión de mármol en cristales de yeso se debe a la existencia de Fe (III) que actúa como catalizador:



El espesor de mármol que sufre esta conversión química es de 2 a 5 mm, aproximadamente, y la estructura del mármol se debilita debido a este proceso. Se determinó, asimismo, que otro de los factores que influyen en el deterioro del mármol es la presencia de partículas carbonáceas, con alto contenido de azufre.

Por otra parte, Baer et al (1986), en una Conferencia Internacional que se llevó a cabo en Amsterdam, puntualizaron que los óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ) y otros gases ácidos son los responsables de la erosión superficial del material de construcción; sin embargo, manifiestan que el proceso de degradación atmosférica es un fenómeno complejo, gobernado por muchos factores relacionados entre sí, y de los cuales, la contaminación del aire es sólo uno de ellos. Indican, asimismo, que el análisis de los procesos de deterioro, inducido por factores meteorológicos, se debe enfocar desde el punto de vista de la termodinámica y de la transferencia de calor. También se asegura que la humedad de la atmósfera es un factor muy importante que se debe tomar en consideración.

Consideran que es innegable que el daño a los monumentos culturales es irreversible y no es fácilmente sujeto a una evaluación económica.

Existen aún incertidumbres con respecto a las expresiones matemáticas y a los límites de confianza de las funciones de daño causado a los materiales. Lipfert (junio, 1987), en Nueva York, indica que, efectivamente, los agentes antropogénicos en la atmósfera acortan la vida de los materiales calcáreos, pero se requiere una investigación más extensa antes de que se puedan cuantificar los beneficios a la sociedad, que resulten de reducir algunos contaminantes específicos.

En México, donde existe un número apreciable de estructuras que están sujetas a daños irreversibles, es de capital importancia cuantificar el daño a los materiales, particularmente aquellas estructuras de interés histórico o cultural, las cuales ya presentan un deterioro apreciable debido a los niveles de contaminación del aire en el pasado.

Se ha comentado (Lipfert; julio, 1987) el uso de cámaras de intemperismo acelerado para estudiar los efectos que causan algunas mezclas de aire contaminado sobre materiales, tales como

metales y material calcáreo. Él mismo indica que esta técnica, efectivamente, permite la determinación de cada contaminante por separado; sin embargo, menciona que es difícil simular los niveles de turbulencia de la atmósfera, así como los efectos de la precipitación natural, de tal manera, que se debe tener cuidado en extender los resultados cuantitativos, obtenidos en las cámaras, a la atmósfera real.

Reddy y Youngdahl (1987) expusieron algunas muestras de roca a las condiciones atmosféricas en cuatro sitios al este de los Estados Unidos. La exposición duró dos años, y al final de este tiempo se encontró que la rapidez de recesión superficial, para muestras de mármol en Carolina del Norte, fue de  $15 \mu\text{m} / \text{año}$ . La recesión superficial se incrementó con la cantidad de lluvia incidente, así como con el aumento de la acidez de la lluvia, aunque este último efecto fue menos importante que el primero.

La recesión superficial se calculó de la manera siguiente:

$$\text{recesión superficial} = 0.03 + (0.12 \times [\text{H}^+])$$

Entre los métodos que se emplearon para evaluar el daño a las muestras se citan los siguientes:

- a) Análisis químico del influente así como del efluente.
- b) Medición de los cambios físicos en la superficie de la roca.
- c) Evaluación de cambios en la masa de la muestra.

Se concluyó que los tres métodos dan resultados similares al evaluar la pérdida de material en la roca.

Baedecker et al (1992) realizaron pruebas de depósito ácido en cinco sitios de los Estados Unidos, autorizados por el programa NAPAP en 1984, para llevar a cabo investigaciones sobre efectos en metales, pinturas y material calizo.

Para estimar la recesión superficial de la roca caliza, los parámetros que se consideraron fueron: la cantidad de lluvia incidente, la concentración total de calcio en el efluente, el área de la muestra sobre la que incidió la lluvia, la densidad de la roca y la pérdida de agua, por evaporación, que sufrió la muestra.

Los resultados obtenidos indican una recesión superficial de 6 a  $10 \mu\text{m}/\text{año}$  y concluyen, asimismo, que alrededor del 70% de la disolución de la roca se debe a la solubilidad de la calcita en agua, en equilibrio con el dióxido de carbono atmosférico.

Reddy (1988) puntualiza, en otra investigación que se llevó a cabo en el noreste de los Estados Unidos, a finales de 1984, que la disolución de la superficie de la roca aumenta la concentración de calcio en el efluente. Este incremento en la concentración de calcio se puede traducir en una pérdida superficial de carbonato de calcio. No se encontraron diferencias notables entre las recesiones superficiales exhibidas entre la roca caliza y el mármol. Los resultados presentados en dicho trabajo muestran que la recesión superficial es directamente proporcional a la concentración de ion hidrógeno que incide sobre la superficie de la roca, así como a la cantidad de lluvia incidente.

Una estimación preliminar de la influencia del dióxido de azufre sobre la roca sugiere que el daño al material, por dicho compuesto, no es significativo.

Inglaterra es un país que también posee obras de arte importantes, las cuales han sufrido efectos de intemperismo. Jaynes y Cooke (1987) eligieron 25 sitios de exposición, al sureste de Inglaterra, para su estudio. Se eligió esta región porque posee una gran variedad de condiciones atmosféricas contaminadas. Su método consistió en colocar sobre un carrusel rotatorio las muestras de roca. Se eligió este diseño porque resuelve tres problemas principales:

- 1.- Evita que las muestras se encharquen en el agua.
- 2.- Evita que las muestras sean sacudidas por el viento.
- 3.- Se asegura que todas las muestras reciban igual exposición de lluvia.

Las muestras se expusieron a la precipitación natural durante dos años.

Los parámetros que se midieron fueron: la pérdida de masa, cambios en la rugosidad superficial y el análisis de contaminantes adsorbidos por la roca.

El intemperismo de las muestras se atribuyó, fundamentalmente, a la lluvia ácida que contenía  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{CO}_2$ . La sulfatación fue el proceso que más afectó a las muestras. La rugosidad superficial aumentó con el intemperismo de las muestras.

Finalmente, dichos investigadores hacen hincapié en que se requieren estudios adicionales para evaluar en forma más completa el papel que desempeñan algunas otras variables atmosféricas en la degradación de las muestras.

Peleg et al (1989) llevaron a cabo un estudio sobre el deterioro que causan los contaminantes del aire sobre roca caliza de Jerusalem. Para ello dichas muestras se expusieron a altos niveles de contaminantes ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}$ ) en la presencia y en la ausencia de hidrocarburos, vapor de agua y luz ultravioleta. Después de la exposición, las capas externas de las muestras se rasparon y se analizaron para determinar sulfatos y nitratos. Los resultados revelaron que aún

después de un solo día de exposición, se encontraron concentraciones significativas de  $\text{CaSO}_4$  y  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  hasta una profundidad de 40  $\mu\text{m}$ .

Se encontró que la formación de sulfato depende de la humedad relativa, y la formación de nitrato se relaciona con la luz UV y, en un grado limitado, con la presencia de hidrocarburos. La humedad relativa, al parecer, no modifica la formación de nitrato.

Las simulaciones se realizaron en una cámara cilíndrica de 18 litros de capacidad, rodeada de 4 lámparas fluorescentes (de 40 W cada una) . Con el objeto de reducir el tiempo del experimento se usaron altas concentraciones de gases contaminantes para que se pudiera obtener un efecto de degradación apreciable.

Es difícil cuantificar el daño que sufren las superficies de las rocas debido a que el deterioro es a nivel microscópico, como lo estableció Viles (1990) , al exponer 32 muestras de roca caliza durante dos meses: 16 a la lluvia, y las otras 16, al depósito seco y ocultas de la precipitación.

Después de los dos meses, se encontraron cantidades apreciables de yeso en las muestras que habían sido protegidas de la lluvia, y las muestras que se expusieron a la lluvia mostraban poca formación de yeso, pero considerable evidencia de disolución.

En la Catedral de St. Paul, en Londres, se realizaron investigaciones por parte de Trudgill et al (1991) para cuantificar la erosión que había sufrido la balaustrada de la catedral. Utilizaron un medidor de microerosión (MEM) . Después de sus investigaciones no se encontraron diferencias significativas en las medidas de la recesión superficial media, realizadas en 1990, comparadas con las del período 1980-1985, a pesar de que en Londres los niveles de emisión del  $\text{SO}_2$  se han reducido sustancialmente.

Se cree que esto puede deberse a un " efecto de memoria " originado por los niveles altos del  $\text{SO}_2$  en el período 1965-1980, y que hayan podido influir posteriormente, a pesar de la disminución de la contaminación.

Finalmente dichos investigadores argumentan que los efectos que causan, por una parte, los gases nitrogenados y, por la otra, el dióxido de azufre, son difíciles de cuantificar separadamente.

El fenómeno de la precipitación ácida constituye, actualmente, en Québec (1996) un problema prioritario que ha generado una serie de políticas de control de emisiones. El pH anual medio de las precipitaciones es de 4.35, valor que causa daños directos e indirectos a los organismos acuáticos. Se observó, por ejemplo, que si el pH cambia de 5.5 a 5.0, esto causa una disminución del 50% en cierto número de peces, mientras que el 25% de las especies residuales desaparecen completamente cuando el pH es de 4.5.

A nivel forestal se encontró una relación directa entre la acidez y las concentraciones de sulfatos y de nitratos en las precipitaciones.

En cuanto al impacto sobre los materiales de construcción (mármol), se determinó que en ciertos lugares, el depósito ácido, de origen antropogénico, contribuye con un 30%, aproximadamente, en la disolución del material. De esta cantidad, el 67% se atribuye a compuestos sulfurados y, el resto, a compuestos nitrogenados.

Los factores que se deben tomar en cuenta para establecer una relación causa-efecto entre la lluvia y el material son: la cantidad total de precipitación, la acidez de las precipitaciones, el tiempo de exposición, la geometría de la superficie, los compuestos orgánicos presentes, etc.

Se considera primordial, en Québec, evaluar mejor los impactos de la precipitación ácida y estimar si la reducción de la contaminación será suficiente para revertir la acidez de las aguas superficiales, con el fin de establecer soluciones concretas lo más rápidamente posible.

## 2.2 Química de la disolución

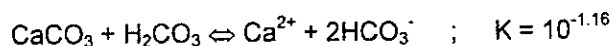
La calcita está básicamente formada por  $\text{CaCO}_3$ . La disolución química de este material es un proceso importante de degradación relacionado con la acidez, ya que el  $\text{CaCO}_3$  es fácilmente disuelto por ácidos. El  $\text{CO}_2$  disuelto en el agua de lluvia produce ácido carbónico, aún en la lluvia limpia, incrementando la solubilidad del  $\text{CaCO}_3$  relativa a su solubilidad en agua pura. Las rocas que son rugosas debido a procesos físicos o biológicos (rocas viejas) pueden ser más susceptibles a un ataque químico. Así, los efectos de la acidez interactúan con los procesos naturales de degradación (NAPAP, 1990).

El ion hidrógeno disuelve la calcita mediante la reacción siguiente (Baedecker et al., 1992. Reddy, 1988. Snoeyink, 1987):

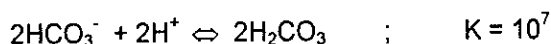


Así, una mol de ion hidrógeno depositado sobre la roca podría disolver una mol de calcita.

En la lluvia ácida, las contribuciones primarias de  $\text{H}^+$  por arriba de la acidez natural dada por el dióxido de carbono provienen, fundamentalmente, de los ácidos nítrico y sulfúrico (Bravo, 1987). La reacción de la caliza con el ácido carbónico puede expresarse mediante la ecuación química siguiente (Baedecker, 1992):



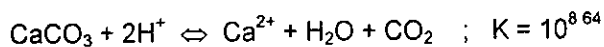
y el ion bicarbonato podría combinarse con  $\text{H}^+$  para formar más ácido carbónico,



no obstante, el ácido carbónico se disocia de acuerdo con el mecanismo siguiente:



de tal manera que la reacción global se expresaría mediante la ecuación:



lo cual reduce el efecto del depósito del  $\text{H}^+$ , y una mol de calcita sería disuelta por cada dos moles de ion hidrógeno.

Todo lo anterior explica el por qué se debe esperar un efecto de deterioro acelerado en la roca caliza cuando hay condiciones de acidez proporcionadas por la lluvia (NAPAP, 1991).

La reacción de la calcita con ácido carbónico incrementa su solubilidad natural (en agua pura) de  $5.8 \times 10^{-5}$  M a  $5.5 \times 10^{-4}$  M (NAPAP, 1991. Baedeker et al., 1992).

La pérdida de carbonato de calcio de la roca bajo condiciones de equilibrio, si no hay limitaciones cinéticas, se regula por la solubilidad del mineral, expresada en unidades de masa por volumen de solución. Si, en el equilibrio, el volumen de la solución acuosa que reacciona con la superficie de la piedra es del doble, entonces, la pérdida de carbonato de calcio de la roca será también del doble (Reddy, 1988).

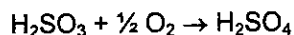
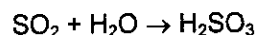
Pero no sólo el  $\text{CaCO}_3$  de la roca caliza es importante en el deterioro de ésta por su disolución, que da como resultado la erosión, sino también por el papel que desempeña en la formación de productos de alteración química sobre la superficie (NAPAP, 1990).

Una forma más observable de daño a la roca carbonatada debido a los contaminantes atmosféricos es la formación de productos de alteración que comúnmente aparecen como áreas oscuras o incrustaciones negras en la roca, protegida del lavado directo de la lluvia (McGee, 1991). Las incrustaciones consisten en sales solubles, predominantemente yeso. Además del cambio estético causado por el oscurecimiento de ciertas áreas, las incrustaciones comienzan a engrosar con el tiempo hasta agrietar la roca, dando como resultado una grave pérdida de la estructura.

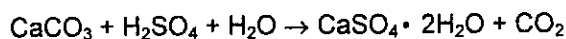
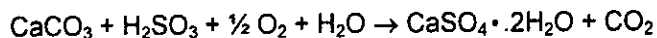
Las incrustaciones de sales son agregados bastante compactos de una o más especies minerales sobre o debajo de la superficie. Frecuentemente, además del yeso (la más común), se presentan la hidromagnesita y la nesquehonita (Arnold, 1985).

Las sales tienden a formar eflorescencias e incrustaciones con un rango variado de formas de cristales, como son: mullido o esponjoso, erizado, en pústulas, en columna, filamentoso, etc. (Arnold, 1985).

La contaminación atmosférica, especialmente la que ocasiona el  $\text{SO}_2$ , es un factor clave en la formación de yeso sobre la roca carbonatada (McGee, 1991). El yeso se puede formar por reacciones que comienzan con el depósito seco del  $\text{SO}_2$  en la superficie de la roca, o de la reacción del  $\text{H}_2\text{SO}_4$  con la roca. La humedad relativa favorece la captura del  $\text{SO}_2$  por la roca caliza. En presencia de humedad, el  $\text{SO}_2$  puede formar ácido sulfuroso o ácido sulfúrico:



los cuales reaccionarán con la roca caliza para formar yeso:



Ya que el yeso es más soluble ( $K_{PS} = 9.1 \times 10^{-6}$ ) que el carbonato de calcio ( $K_{PS} = 2.8 \times 10^{-9}$ ), las zonas resguardadas de la lluvia son las que se verán más afectadas, pues no tendrán la posibilidad de ser lavadas como las zonas expuestas totalmente a la lluvia (McGee, 1991).

En una atmósfera que está relativamente libre de óxidos de azufre, la lluvia que se percola continuamente se filtra a las zonas internas de la roca caliza, disuelve el carbonato de calcio, y los productos se depositan como microcristales de calcita sobre la superficie. El depósito continúa y la cubierta se engrosa. La tensión superficial y la fuerza interfacial causan una emersión del líquido filtrado, el cual es retenido en las ranuras de las cuarteaduras, dentro de la masa cristalina de la cubierta y entre las caras cristalina y reciente del sustrato. El líquido al secarse, deposita su soluto y la cubierta se engrosa, creciendo principalmente hacia arriba, formando un hueco, lo cual permite que un nuevo estrato secundario de calcita inicie un nuevo desarrollo (Charola, 1979)

Uno de los aspectos más importantes del clima en la estimación de los efectos potenciales de la lluvia ácida es la cantidad y frecuencia de la precipitación. En climas secos, las partículas y gases alcalinos que transporta el viento son abundantes y, en consecuencia, tienden a neutralizar la acidez atmosférica. En climas húmedos, hay menos partículas y gases alcalinos en el aire y la precipitación tiende a ser más ácida (EPA, 1980).

Los periodos estacionales de lluvia son también un elemento clave para la medición del efecto potencial ácido de la precipitación. Por ejemplo, las concentraciones de ozono muestran un pico consistente en verano, mientras que las concentraciones de  $SO_2$  y  $NO_x$  son mínimas. Por otra parte, las concentraciones altas de sulfatos se han asociado con temperaturas altas, humedades altas y concentraciones altas de ozono; así como con presiones y velocidades del viento moderadamente bajas (EPRI, 1983). Todo esto influirá de manera directa en el daño que los contaminantes ocasionan sobre los materiales.

La dirección del viento y su velocidad determinan la dirección y velocidad de los contaminantes a tal punto que ejercen el control sobre su dispersión y dilución. La humedad y la radiación solar influyen sobre la velocidad a la que los gases se convierten en ácidos (EPA, 1980).

El ambiente microbiológico en el cual se encuentre el material calizo también tendrá influencia sobre el deterioro de la estructura (Rosvall, 1988). Algunas investigaciones en edificios históricos construidos con roca caliza o mármol, reportan la presencia de tiobacilos en la piedra deteriorada, pero en cantidades muy bajas para producir efectos notables. Se ha reportado una relación definida entre la degradación de la roca y la presencia de bacterias nitrificantes. Su capacidad para formar nitratos mediante la oxidación del amoníaco y de los nitritos, justifica su potencial de deterioro.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, se observa que los factores que influyen en el deterioro de la roca caliza son diversos y muy complejos, razón por la cual es importante estudiar cada uno de estos factores por separado para conocer mejor el efecto que causan en el daño al



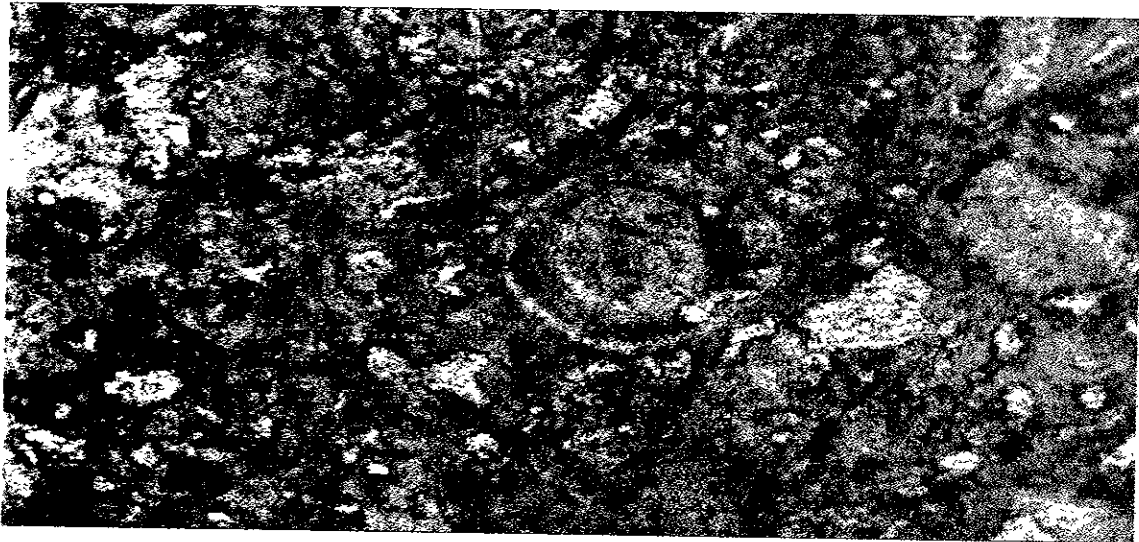
material. El presente trabajo de investigación tiene precisamente este propósito. conocer particularmente el efecto químico que el agua ácida causa sobre la roca caliza, utilizando para ello una cámara de intemperismo acelerado, donde se simulen las condiciones de temperatura, humedad y precipitación lo más cercanamente posible a sus valores promedio en la zona de interés.

*3. DESARROLLO EXPERIMENTAL*

### 3.1.2 Características petrográficas

En el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México se llevó a cabo el estudio petrográfico del material calcáreo utilizado en esta investigación (Ferrusquía, 1998), conforme a los procedimientos específicos mencionados en la literatura (Folk, 1968). De acuerdo con este análisis, las muestras se recolectaron de un lugar que posee roca caliza que se remonta al período terciario tardío. Aunque las muestras son demasiado pequeñas para indicar el estrato del cual proceden; sin embargo, dada su uniformidad, parece que la roca se estratificó densamente; es decir, el estrato tenía al menos 80 cm de espesor. Las superficies de las rocas poseen un color anaranjado pálido 10 YR 8/2, que cambia, por intemperización, a gris rosáceo 5 YR 8/1, y finalmente a gris olivo 5 YR 6/1, de acuerdo con la carta cromática de Goddard et al (1963).

La inspección con un microscopio petrográfico muestra que la caliza consiste de una mezcla de granos aloquímicos y de calcita microcristalina. Los componentes aloquímicos constituyen del 65% al 80% del volumen de la roca, y consisten principalmente de oolitas y seudoolitas, de forma esférica y ovoide (las esféricas poseen un diámetro de 150 a 200  $\mu\text{m}$ , y las ovoides presentan un diámetro menor de 150 a 160  $\mu\text{m}$ , y un diámetro mayor de 350  $\mu\text{m}$ ). La figura 2 muestra una fotografía de la calcita, tomada con un microscopio petrográfico.



**Fig. 2 Fotomicrografía de la roca caliza donde se muestran los componentes aloquímicos**

Las oolitas presentan su estructura característica de capas concéntricas, algo disminuida debido a la micritización. Las seudoolitas no muestran capas, y originalmente debieron ser oolitas u otra clase de granos aloquímicos; su tamaño y semejanza con las oolitas verdaderas indica que probablemente son oolitas fuertemente alteradas. Las oolitas presentan algunos microfósiles.

La matriz de las muestras consiste de microcristales de calcita, de 2 a 4  $\mu\text{m}$  de longitud, que constituyen del 20 al 35% de la roca. La micrita no muestra alteración o fractura. Esto indica que, después del depósito, no hubo episodios de deformaciones estructurales importantes que afectaran a la caliza, sino sólo procesos naturales que condujeron a la formación de caliza a partir del polvo calcáreo depositado en el fondo de un mar tropical poco profundo.

De acuerdo con Folk (1968), las muestras pertenecen a una oomicrita; es decir, a una caliza formada por granos oolíticos colocados en una matriz micrítica. Esta clase de rocas se originan comúnmente a partir de depósitos de polvo calcáreo, sedimentados bajo condiciones de agua quieta y baja energía.

### 3.1.3 Densidad, porosidad y absorción de agua

Otras características físicas de la roca se determinaron en el laboratorio del Centro de Ciencias de la Atmósfera. La densidad y la porosidad se determinaron de acuerdo con los procedimientos indicados en ISRM (1979) y RILEM (1980). El porcentaje de absorción de agua se determinó de acuerdo con el estándar de la ASTM, C97-47 (1985).

La tabla 1 muestra los resultados obtenidos.

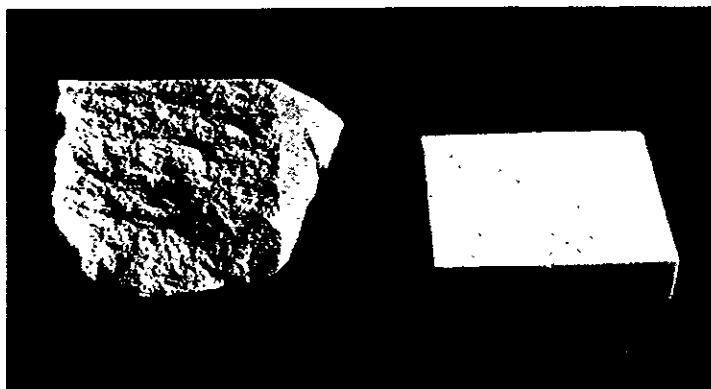
Densidad ( g / cm <sup>3</sup> )	Porosidad ( % )	Absorción de agua ( % )
2.30 $\pm$ 0.05	10.7 $\pm$ 0.2	9.2 $\pm$ 0.2

**Tabla 1 Densidad, porosidad y absorción de agua de la roca caliza**

### 3.1.4 Dimensiones y masas

Las cuatro muestras de roca caliza que se utilizaron en el experimento se prepararon mediante el corte de la muestra original. Su forma fue la de un paralelepípedo recto de base cuadrada. Después de cortarlas, se pulieron con el objeto de eliminar cualquier material extraño que pudiera provocar la contaminación del agua que incidiría sobre cada una de ellas. No se utilizó ningún tratamiento químico para limpiar sus superficies.

La figura 3 muestra la caliza antes y después de su preparación.



**Fig. 3 Roca caliza antes y después de su corte y pulido**

En la tabla 2 se indican las masas (medidas con una balanza analítica, con una precisión de  $\pm 0.0001$  g) antes del goteo, y las dimensiones (determinadas con un vernier, con una precisión de  $\pm 0.001$  cm) de cada una de las muestras utilizadas. El valor del área se refiere a la de la cara expuesta a la lluvia ácida.

Muestra No.	Masa ( g )	Área ( cm <sup>2</sup> )	Espesor ( cm )
2	45.9066	$25.2 \pm 0.08$	0.80
3	53.4312	$25.0 \pm 0.07$	0.90
4	52.3974	$23.3 \pm 0.07$	1.00
5	64.5109	$25.3 \pm 0.07$	1.10

**Tabla 2 Masas originales y dimensiones de las muestras de roca caliza**

Durante el desarrollo del experimento se corrió un blanco (ausencia de muestra), simultáneamente con las muestras, y se rotuló con la leyenda de muestra No. 1. Es por ello que las muestras de roca caliza están identificadas como se indica en la tabla anterior.

### 3.1.5 Análisis por difracción de rayos-x

Con el objeto de conocer en forma más precisa la composición de la roca caliza que se utilizó en el experimento, antes del goteo, se realizó el análisis por difracción de rayos-x del material, en el Instituto de Investigaciones en Materiales, de la Universidad Nacional Autónoma de México (Baños, 1998).

En el anexo 1 se muestran los análisis correspondientes.

Con base en estos resultados, se observa que la muestra de roca caliza está constituida fundamentalmente por carbonato de calcio en forma de calcita y de aragonita. También existe montmorillonita, una arcilla que existe comúnmente en estos materiales.

## 3.2 AGUA DE LLUVIA

### 3.2.1 Sitio de muestreo

La estación de muestreo del agua de lluvia está localizada en el Instituto de Ciencias del Mar, en Puerto Morelos (  $20^{\circ} 50' N$ ;  $86^{\circ} 54' W$  ), Quintana Roo, México. La figura 1 indica la ubicación de este lugar. El sitio cumple con los criterios de selección establecidos por la EPA, en cuanto a satisfacer las normas para ser considerado como un sitio de muestreo de precipitación tipo regional.

Puerto Morelos es un pueblo pequeño localizado aproximadamente a 95 km al noreste de Tulum, y a 50 km al norte de la isla de Cozumel, donde se localiza una planta de generación de potencia.

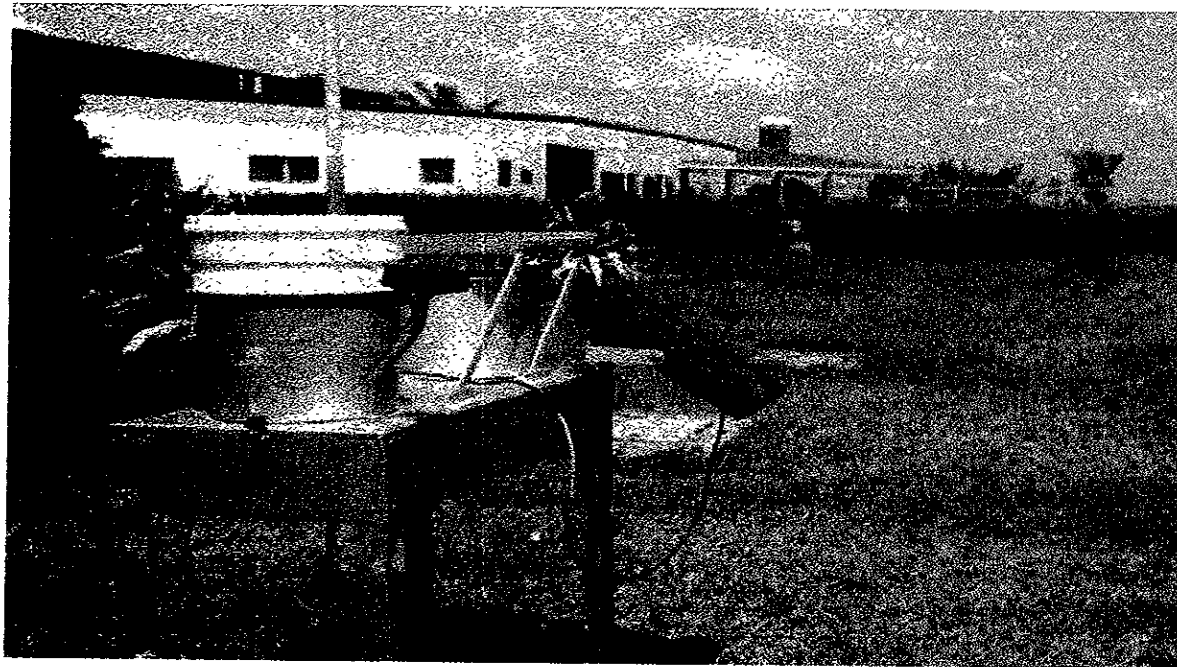
El colector de precipitación tanto seca como húmeda es de la marca Aerochem Metrics Collector, autorizado por el Comité Técnico de la NADP (National Atmospheric Deposition Program, U.S.A.). Dicho colector está ubicado en una zona campestre para evitar la contaminación de origen local (fig. 4). Este sitio está localizado a más de 50 m de la playa,

Para la recolección de las muestras se contó con el apoyo del personal del Instituto de Ciencias del Mar, de la Universidad Nacional Autónoma de México.

### 3.2.2 Recolección y preservación

Durante un período de dos años ( 1994-1995 ) se recolectaron muestras de agua de lluvia en Puerto Morelos. Para ello se utilizaron recipientes de polipropileno (Nalgene). Inmediatamente después de la recolección, se midió el volumen de precipitación, así como el pH de cada una de las muestras (utilizando un potenciómetro Corning, modelo 3D). Los recipientes se tapaban perfectamente, y las muestras se colocaban en refrigeración a  $4^{\circ}C$ , de acuerdo con las

recomendaciones de la EPA (1994) referentes a la recolección y manejo de las muestras. Las muestras de agua se enviaban periódicamente a la Ciudad de México para su análisis químico en el laboratorio de Ciencias de la Atmósfera.



**Fig. 4 Colector del agua de lluvia en Puerto Morelos**

En el laboratorio, se les determinó nuevamente el pH, así como la conductividad. Las concentraciones iónicas de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , se cuantificaron mediante cromatografía iónica utilizando un cromatógrafo de líquidos de alta presión.

### **3.2.3 Determinación del pH y de la conductividad**

#### **3.2.3.1 Determinación del pH**

Para la determinación de los pH's de las muestras se utilizó un potenciómetro Benchtop pH/ISE Meters, modelo 420 A. ATI. ORION. Antes de la medición de las muestras se llevó a cabo una autocalibración con dos soluciones buffer, cuyos pH's eran 4 y 7 respectivamente. El modelo 420 A, cuenta con un compensador automático de temperatura.

### 3.2.3.2 Determinación de la conductividad

Para la determinación de la conductividad, se utilizó un conductímetro YSI, modelo 32 (Scientific Division. Yellow Springs Instrument Co., Inc.), el cual tiene incorporado un termistor y una celda de conductividad ( $K=1.0 \text{ cm}^{-1}$ ). Este aparato permite medir conductividades entre  $0.1 \mu\text{S}$  y  $200 \text{ mS}$ , y las muestras pueden ser leídas en un intervalo de temperatura de  $-5^\circ\text{C}$  a  $50^\circ\text{C}$ .

Antes de la determinación de las conductividades de las muestras, el aparato se calibró con una solución de KCl,  $5 \times 10^{-4} \text{ M}$ . La conductividad teórica de esta solución es de  $73.9 \mu\text{S}$ . La conductividad real (C.R.) de las muestras de agua de lluvia, se calculó de la manera siguiente:

$$\text{C.R.} = \{(73.9 \text{ C.E./C.S.})\}$$

Donde C.E. y C.S. son las conductividades leídas de la muestra de agua de lluvia y de la solución estándar de KCl, respectivamente.

Las determinaciones de conductividad se llevaron a cabo a  $25^\circ\text{C}$ .

En el anexo II se muestran los valores de pH, y en el anexo VI, los valores de conductividad de las muestras de agua de lluvia de Puerto Morelos, durante los años 1994 y 1995.

### 3.2.4 Determinación de aniones y de cationes

Para cuantificar los iones en las muestras de agua de lluvia se utilizó un cromatógrafo de líquidos de alta presión. A continuación se describen las características de algunos componentes básicos del cromatógrafo utilizado en esta investigación.

a) Bomba Waters, modelo 510 HPLC pump, de doble pistón, con un intervalo de presión de 0-6000 psig.

b) Detector de conductividad Waters 431.

c) Columnas: para la determinación de aniones se utilizó una columna IC-Pak A HR, de alta resolución, con dimensiones  $4.6 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ . El material de empaque es una resina de polimetacrilato con un grupo funcional de amonio cuaternario. El tamaño de partícula es de  $6 \mu\text{m}$ , y la capacidad es de  $30 \pm 3 \mu\text{eq/mL}$  (La capacidad de una resina es una medida de la cantidad de ion intercambiable ( $\mu\text{eq}$ ) por gramo seco o por unidad de volumen (mL) de la resina dilatada).

En cuanto a los cationes se utilizó una columna IC-Pak C M/D, con dimensiones  $4.6 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ , con tamaño de partícula  $10 \mu\text{m}$ , y una capacidad de  $12.0 \pm 0.2 \mu\text{eq/mL}$ . El material de empaque es una resina de divinilbenceno-estireno con un grupo funcional de ácido sulfónico.

En vista de que el análisis por HPLC es muy sensible y cualquier impureza puede afectar los resultados, se utilizaron reactivos extremadamente puros para la preparación de las



soluciones. En cuanto al agua, ésta fue desionizada y filtrada (dyf) (conductividad de  $18.2 \mu\text{S}$  y filtrada a través de un filtro Millipore<sup>®</sup> de  $0.22 \mu\text{m}$ , para eliminar los sólidos en suspensión).

Los recipientes en los que se prepararon las soluciones eran de polipropileno para evitar contaminaciones como las que se presentan con los recipientes de vidrio.

### 3.2.4.1 Determinación de aniones

#### 3.2.4.1.1 Preparación del eluyente

La fase móvil para el análisis de aniones se preparó de la manera siguiente:

En un matraz volumétrico de 1 litro se mezclaron 500 mL de agua dyf y 7.2 g de hidróxido de litio monohidratado. Se añadieron, a continuación, 25.5 g de ácido bórico, y se agitó nuevamente la mezcla. A continuación, se adicionaron al matraz 13.2 mL de ácido glucónico (al 50% en masa), y 94 mL de glicerina (al 95% en masa), y se agitó nuevamente. Se añadió agua dyf hasta la marca y se homogeneizó perfectamente el contenido.

En otro matraz volumétrico de 1 litro se colocaron 13 mL de la solución anterior y 120 mL de acetonitrilo. Se añadió agua dyf hasta la marca y se agitó perfectamente. Esta solución se filtró a través de una membrana Millipore<sup>®</sup> de  $0.22 \mu\text{m}$ . La solución así obtenida constituyó la fase móvil.

#### 3.2.4.1.2 Preparación de las soluciones patrón y estándar

Para preparar las soluciones patrón de 1000 ppm de cada uno de los aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ), se utilizaron las cantidades de sales que se indican en la tabla 3.

Sal	Masa (g)
NaCl	$0.1649 \pm 0.0001$
$\text{NaNO}_3$	$0.1371 \pm 0.0001$
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	$0.1479 \pm 0.0001$

**Tabla 3 Masas de las sales utilizadas en la preparación de las soluciones patrón de aniones**

Se disolvieron cada una de estas sales en matraces volumétricos de 100 mL, con agua dyf. y se aforó hasta la marca. Estas soluciones se pueden utilizar hasta un mes después de su preparación.

A partir de estas soluciones de 1000 ppm, se realizaron mezclas de aniones en cantidades adecuadas para preparar las soluciones estándar, las cuales se utilizaron para generar las curvas de calibración, indispensables para analizar las muestras de agua de lluvia.

A continuación y como modo de ejemplo, en la tabla 4, se indican los volúmenes de las soluciones de 1000 ppm que se utilizaron para preparar las soluciones estándar, requeridas en uno de los múltiples experimentos realizados para analizar las muestras. La elección de tales concentraciones de los estándares obedeció a que las concentraciones de las muestras analizadas quedaron incluidas en dicho intervalo.

<b>Anión: Cl<sup>-</sup></b>	
<b>Concentración (ppm)</b>	<b>Volumen (μL)</b>
0.23 ± 0.001	23 ± 0.1
0.75 ± 0.002	75 ± 0.2
1.50 ± 0.005	150 ± 0.5
3.00 ± 0.009	300 ± 0.9
6.00 ± 0.02	600 ± 2
<b>Aniones: NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	
<b>Concentración (ppm)</b>	<b>Volumen (μ L)</b>
0.40 ± 0.001	40 ± 0.1
1.00 ± 0.003	100 ± 0.3
2.00 ± 0.006	200 ± 0.6
4.00 ± 0.01	400 ± 1
8.00 ± 0.02	800 ± 2

**Tabla 4 Volumen utilizado de las soluciones de 1000 ppm para preparar las soluciones estándar de aniones**

Así, para preparar el 1er, estándar, se vertieron en un matraz volumétrico de 100 mL, 23  $\mu\text{L}$  de la solución de NaCl, 40  $\mu\text{L}$  de la solución de  $\text{NaNO}_3$  y 40  $\mu\text{L}$  de la solución de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y se aforó al volumen con agua dyf.

De esta manera, los estándares quedaron conformados como se indica en la tabla 5.

Estándar No.	$\text{Cl}^-$ (ppm)	$\text{NO}_3^-$ (ppm)	$\text{SO}_4^{2-}$ (ppm)
1	$0.23 \pm 0.001$	$0.40 \pm 0.001$	$0.40 \pm 0.001$
2	$0.75 \pm 0.002$	$1.00 \pm 0.003$	$1.00 \pm 0.003$
3	$1.50 \pm 0.005$	$2.00 \pm 0.006$	$2.00 \pm 0.006$
4	$3.00 \pm 0.009$	$4.00 \pm 0.01$	$4.00 \pm 0.01$
5	$6.00 \pm 0.02$	$8.00 \pm 0.02$	$8.00 \pm 0.02$

**Tabla 5 Composición de los estándares de aniones**

#### 3.2.4.1.3 Condiciones experimentales

Las condiciones de operación que se utilizaron en el cromatógrafo para correr la curva estándar de aniones, fueron las siguientes:

- Gasto volumétrico del eluyente: 1 mL/min
- Umbral de pico (peak threshold): 2200
- Conductividad del eluyente: 163  $\mu\text{S}$
- Velocidad de la carta: 0.5 cm/min
- Atenuación: 128
- Integración inhibida desde 0.1 a 2.9 min
- PH (altura de pico): 1
- Offset (OF): 10

#### 3.2.4.1.4 Cromatogramas y curvas de calibración

En el anexo III, se muestran los cromatogramas y las curvas de calibración correspondientes a los 5 estándares de aniones. En los cromatogramas se indican los tiempos de

retención para cada uno de los aniones, así como la altura de los picos, siendo este valor directamente proporcional a la concentración del anión en el estándar.

### 3.2.4.2 Determinación de cationes

#### 3.2.4.2.1 Preparación del eluyente

En un matraz volumétrico de 1 litro se colocaron 800 mL de agua dyf y se añadieron 29.2 mg de EDTA. Se agitó la mezcla por 15 minutos y se añadieron 189  $\mu$ L de ácido nítrico (Ultrex). Se diluyó la solución a 1 litro y se agitó perfectamente. Se filtró la solución a través de un filtro Millipore<sup>®</sup> de 0.22  $\mu$ m de tamaño de poro.

#### 3.2.4.2.2 Preparación de las soluciones patrón y estándar

Para preparar las soluciones patrón de 1000 ppm de cada uno de los cationes, se utilizaron las cantidades de sal que se indican en la tabla 6.

Sal	Masa ( g )
NaCl	0.2542 $\pm$ 0.0001
NH <sub>4</sub> Cl	0.2964 $\pm$ 0.0001
KCl	0.1907 $\pm$ 0.0001
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6 H <sub>2</sub> O	1.0547 $\pm$ 0.0001
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4 H <sub>2</sub> O	0.5892 $\pm$ 0.0001

**Tabla 6 Masas de las sales utilizadas en la preparación de las soluciones patrón de cationes**

Se disolvieron cada una de estas sales con agua dyf, en matraces volumétricos de 100 mL y se aforaron hasta la marca.

En la tabla 7 se indican las concentraciones de las soluciones estándar de cationes utilizadas en este evento en particular. Como en el caso de los aniones, las concentraciones de los cationes, en las muestras de agua de lluvia, quedaron incluidas en el intervalo (lineal) de los estándares.

Estándar No.	Na <sup>+</sup> (ppm)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (ppm)	K <sup>+</sup> (ppm)	Mg <sup>2+</sup> (ppm)	Ca <sup>2+</sup> (ppm)
1	0.10 ± 0.0003	0.50 ± 0.002	0.10 ± 0.0003	0.10 ± 0.0003	0.50 ± 0.002
2	0.25 ± 0.001	1.00 ± 0.003	0.50 ± 0.002	0.50 ± 0.002	1.00 ± 0.003
3	0.50 ± 0.002	1.50 ± 0.005	1.50 ± 0.005	1.00 ± 0.003	3.00 ± 0.009
4	1.50 ± 0.005	2.00 ± 0.006	3.00 ± 0.009	1.50 ± 0.005	4.00 ± 0.01

**Tabla 7 Composición de los estándares de cationes**

### 3.2.4.2.3 Condiciones experimentales

Las condiciones de operación que se utilizaron en el cromatógrafo para correr la curva estándar de cationes, fueron las siguientes:

- Gasto volumétrico del eluyente: 1 mL/min
- Umbral de pico (peak threshold): 3000
- Conductividad del eluyente: 1090  $\mu$ S
- Velocidad de la carta: 0.5 cm/min
- Atenuación: 512
- Integración inhibida desde 0.1 a 3.0 min
- PH (altura de pico): 1
- Offset (OF): 10
- Respuesta: std.
- Sensibilidad: 0.005

### 3.2.4.2.4 Cromatogramas y curvas de calibración

En el anexo III, se muestran los cromatogramas y las curvas de calibración correspondientes a los 4 estándares. Se indican en los cromatogramas los tiempos de retención para cada uno de los cationes, así como la altura de los picos, valor que es directamente proporcional a la concentración del catión en el estándar.

j) Bomba centrífuga: Little Giant Pump Co. Model 3-MD; 115 V ~ 60 Hz. 1 Phase. Thermally protected, que permitía enviar el agua ácida desde el bidón inferior al superior. Se aconseja utilizar esta bomba cuando se manejan soluciones salinas.

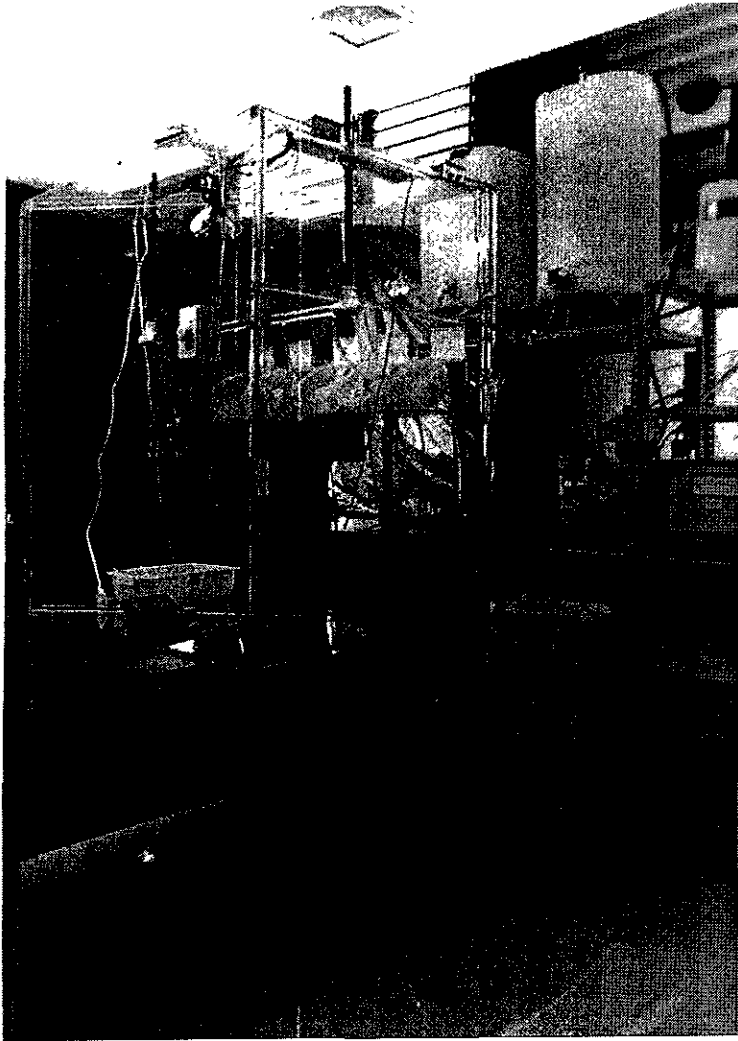
k) Barotermohigrógrafo: Davis. Perception II. Permitía conocer los valores de la presión atmosférica, temperatura y humedad, en cualquier instante, dentro de la cámara.

l) Tres bidones de plástico de 60 litros. En estos recipientes se almacenaba el agua ácida, que se hacía gotear sobre las muestras.

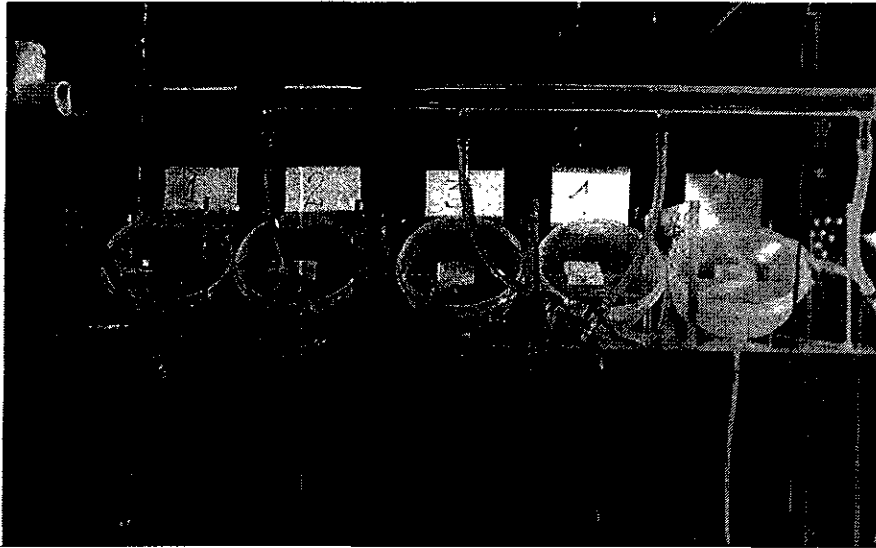
m) Un flotador de plástico colocado dentro del bidón que contenía la lluvia ácida que se enviaba al tubo de distribución. Este aditamento permitía mantener el nivel del agua ácida dentro de ciertos límites, para asegurar que la presión hidrostática del fluido no variara apreciablemente durante el goteo.

n) Cinco recipientes de polipropileno de un galón cada uno. En ellos se recolectaba el efluente después de llevar a cabo el goteo sobre las muestras, para su análisis químico posterior.

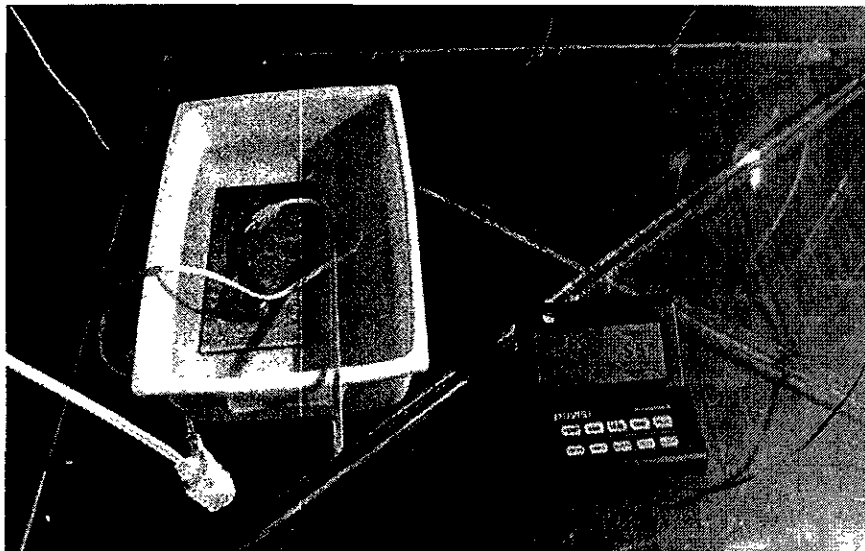
Las figuras 5 a-d, muestran la CIA y algunas de sus partes.



**Fig. 5a** Vista general de la CIA

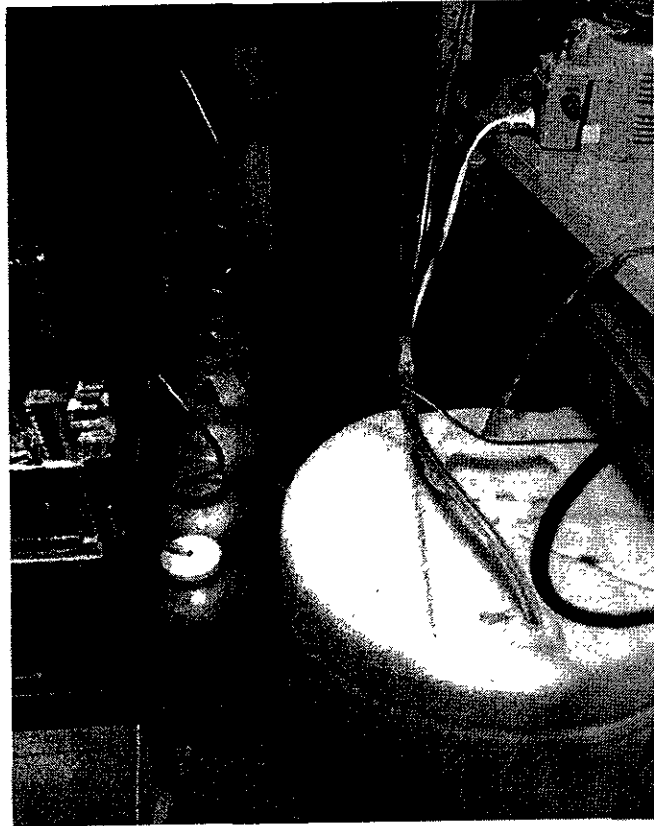


**Fig. 5b Roca caliza, tubo de distribución  
y sostenedores de muestra**



**Fig. 5c Barotermohigrógrafo y recipiente con agua desionizada**





**Fig. 5d Captación del efluente procedente de la CIA**

Antes de realizar las pruebas de goteo con la lluvia ácida, fue necesario llevar a cabo pruebas previas para ajustar parámetros tales como: el flujo volumétrico del agua; la posición de la resistencia variable para asegurar que la temperatura fuese de  $26^{\circ}\text{C}$ , dentro de la cámara; la posición del reóstato, para mantener la humedad constante, etc.

### 3.4 GOTEO SOBRE LA ROCA CALIZA

#### 3.4.1 Composición química del agua ácida

Para preparar el agua ácida que se haría incidir sobre las muestras de roca caliza, se tomaron como referencia los datos de Puerto Morelos, correspondientes al año 1995. Se tomó en cuenta este año porque contiene información de todas las estaciones; es decir, es más representativo que el año 1994.

Se planeó preparar una lluvia ácida que tuviera concentraciones iónicas iguales a la del valor promedio anual del ion en cuestión, más dos veces su desviación estándar (ver anexo II).

Ion	Concentración (M)	Concentración (ppm)
Sodio	$3.120 \times 10^{-4}$	$9.00 \pm 0.03$
Amonio	$2.287 \times 10^{-5}$	$0.41 \pm 0.001$
Potasio	$1.438 \times 10^{-5}$	$0.56 \pm 0.002$
Magnesio	$4.625 \times 10^{-5}$	$1.13 \pm 0.003$
Calcio	$4.387 \times 10^{-5}$	$1.76 \pm 0.005$
Cloruro	$4.453 \times 10^{-4}$	$16.60 \pm 0.05$
Nitrato	$3.796 \times 10^{-5}$	$2.04 \pm 0.006$
Sulfato	$3.411 \times 10^{-5}$	$3.27 \pm 0.01$

**Tabla 8 Concentración teórica del agua de lluvia utilizada en el experimento**

La tabla 8 muestra la composición química teórica que debería tener el agua ácida que se utilizaría en el experimento; sin embargo, debido a que para la preparación de la solución se utilizaron sales cuyo contenido aniónico y catiónico ya está definido, es sumamente difícil preparar la solución con las concentraciones iónicas indicadas en la tabla. Es por ello que la información anterior representa sólo una guía para la preparación de la solución real.

Las sales que se utilizaron en el experimento, para la preparación del agua ácida, fueron las que se indican en la tabla 9.

Sal
NaNO <sub>3</sub>
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
KCl
NaCl
NH <sub>4</sub> Cl
MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O
CaCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O

**Tabla 9 Sales utilizadas en la preparación del agua ácida**

### 3.4.2 Preparación del agua ácida

Con base en la información del punto anterior, se preparó el agua que se utilizó para el goteo de las muestras, de la manera siguiente: En un bidón limpio de 60 litros se colocaron, aproximadamente, 30 litros de agua desionizada y, a continuación, se adicionaron las cantidades de sales necesarias (para facilitar esta operación se prepararon soluciones concentradas de las sales, y de allí se tomaron los volúmenes requeridos) para la preparación de la solución. Se añadió más agua desionizada para llevar el volumen a 50 litros, aproximadamente, y se agitó la mezcla.

A continuación se midió el pH de la solución, y con base en este valor, se añadió el volumen necesario de HNO<sub>3</sub>, 0.1 M, para llevar el pH de la solución a un valor cercano a 4.6.

La razón de que la solución tuviese este valor de pH fue debido a que una de las muestras analizadas de Puerto Morelos (en el año 1994), poseía este valor, el cual fue el más pequeño obtenido en los dos años. Este valor refleja la importancia de simular las condiciones más drásticas en el goteo de las muestras.

Después de la adición de HNO<sub>3</sub>, la solución se agitó y se volvió a determinar el pH para asegurarse de que el valor era el que se esperaba.

### 3.4.3 Descripción del proceso

De acuerdo con la figura 6, que muestra un diagrama esquemático de la CIA, el proceso de goteo se llevó a cabo de la manera siguiente:

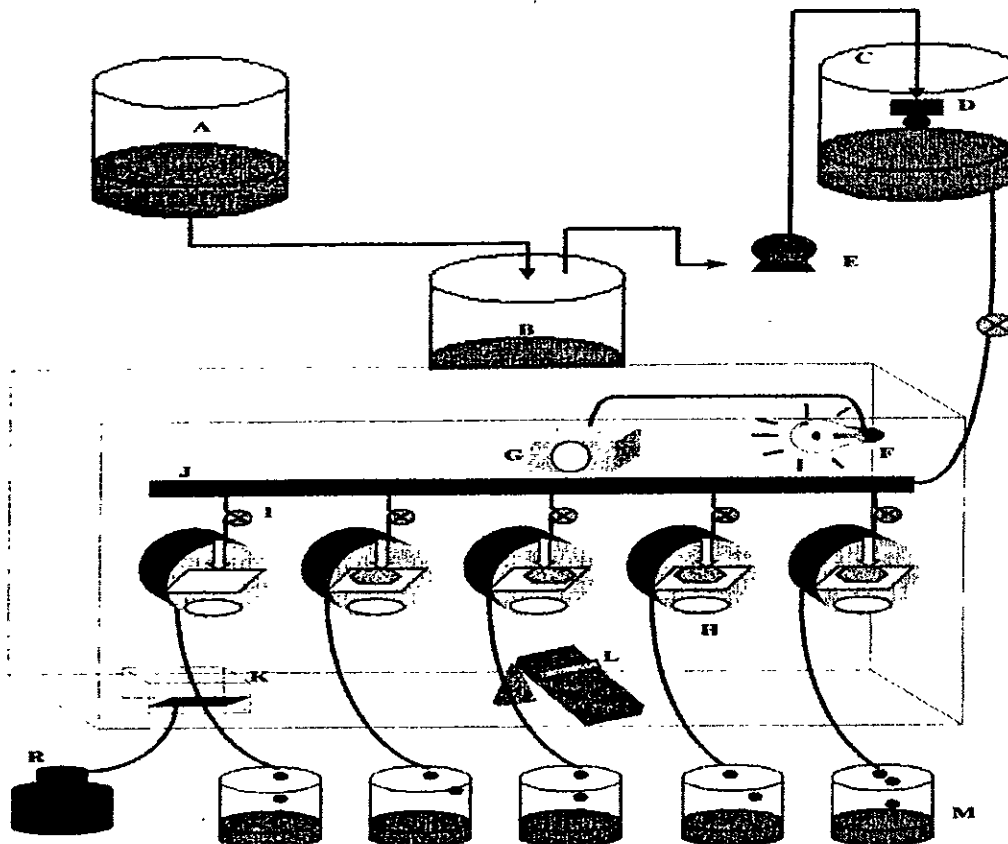


Fig. 6 Diagrama esquemático de la CIA

El agua ácida se preparó en el recipiente A. De aquí se envió al recipiente B, por gravedad, con el objeto de facilitar la operación de bombeo hacia el recipiente C, mediante la bomba E. A medida que el agua pasaba de un recipiente a otro, se agitaba el agua de los bidones mediante barras magnéticas, para asegurar la completa disolución de las sales.

Del recipiente C, el agua se enviaba al tubo de distribución J. El flujo volumétrico del agua enviada a las muestras, se controlaba mediante las válvulas I, intercaladas entre las muestras y el tubo de distribución.

El agua ácida se hacía gotear sobre cada una de las muestras y el blanco (H), al utilizar para este fin cubiertas de jeringas hipodérmicas empotradas en los recipientes de polietileno, y a las cuales se les horadó para simular el efecto de goteo.

Se ajustó la gota de tal manera que, al caer sobre la muestra, bañara a ésta sobre toda su superficie.

El efluente se enviaba a los recipientes de polipropileno M, para posteriormente ser analizado, no sin antes agitarlo perfectamente.

Para mantener la temperatura constante, se ajustaba la intensidad de la luz infrarroja F, mediante la resistencia variable G.

La elección apropiada de la posición del reóstato R permitía, de la misma manera, graduar la rapidez de evaporación del agua K y, por ende, controlar la humedad dentro de la cámara.

El barotermohigrógrafo L, permitía llevar un control adecuado de las variables: presión, temperatura y humedad dentro de la cámara, en cualquier instante.

El flotador D, como ya se indicó anteriormente, mantenía el nivel de agua prácticamente constante para asegurar un goteo, sobre las rocas, más uniforme.

Durante el día, las rocas se sujetaban al goteo 8 horas continuas, y las 16 horas restantes, se sometían al período de secado, al mantener la luz infrarroja activa, así como la humedad.

A las muestras de agua recolectadas en el efluente, se les determinaba el volumen, el pH, la conductividad y la concentración de aniones y de cationes. La inclusión del blanco fue muy importante para observar el efecto químico de deterioro que sufrieron las muestras.

Para la cuantificación de los iones por HPLC, se filtraba cierta cantidad del efluente a través de un filtro Millipore® de 0.22  $\mu\text{m}$ , y parte de la porción filtrada se inyectaba al cromatógrafo.

De esta manera, un lote de resultados consistió en la caracterización química completa de las 4 muestras y el blanco.

A medida que el experimento progresaba, el agua del recipiente A se iba consumiendo, de tal manera que era necesaria la preparación de más agua ácida para su reemplazo. Sin embargo, debido a que esta agua se mezclaba con parte de la anterior, era muy difícil mantener la misma concentración iónica del agua entre un bidón y otro, y es por ello, que se efectuó el análisis del blanco, fundamental para conocer estos cambios.

### **3.5 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONATO DE CALCIO EN LA ROCA**

#### **CALIZA MEDIANTE CROMATOGRAFÍA IÓNICA**

Con el objeto de conocer el contenido de carbonato de calcio en las muestras de roca caliza, se llevó a cabo la disolución (por triplicado) de cierta cantidad de muestra con ácido clorhídrico diluído. Después de la disolución de las muestras, se aforaron a 100 mL con agua desionizada, se homogeneizaron y se filtraron a través de un filtro Millipore® de 0.22 µm.

A continuación se inyectaron las muestras al cromatógrafo para determinar el contenido de iones calcio, en cada una de ellas.

En el anexo IV, se muestran los cromatogramas obtenidos. A partir del valor del área, y mediante la utilización de las soluciones estándar que se prepararon y corrieron en forma simultánea, fue posible la cuantificación de los iones calcio en la solución y, en consecuencia, la determinación del porcentaje promedio de carbonato de calcio en la roca caliza.

### **3.6 DETERMINACIÓN DE LAS MASAS DE LAS MUESTRAS DE ROCA CALIZA Y**

#### **ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS-X DESPUÉS DEL GOTEO**

Después de haber expuesto las muestras de roca caliza al efecto del agua ácida, éstas se colocaron en una estufa durante 2 h, a una temperatura de 105°C, para eliminarles el agua; se colocaron en un desecador, a peso constante, y se les determinó su masa.

Posteriormente se enviaron al Instituto de Investigaciones en Materiales, para determinarles nuevamente su difractograma (el análisis por difracción de rayos-x es una herramienta muy importante para conocer tanto el número de fases sólidas que constituyen determinada matriz, como la constitución química de cada una de ellas).

4. RESULTADOS

#### **4.1 Balance iónico en las muestras de agua de lluvia de Puerto Morelos**

De acuerdo con los resultados obtenidos en las muestras de agua de lluvia de Puerto Morelos (anexo II), se llevó a cabo el estudio del balance iónico en tales muestras, para los años 1994 y 1995. El anexo V muestra los resultados obtenidos. El cociente indicado en la última columna se refiere a la razón entre la suma de cationes y la de aniones.

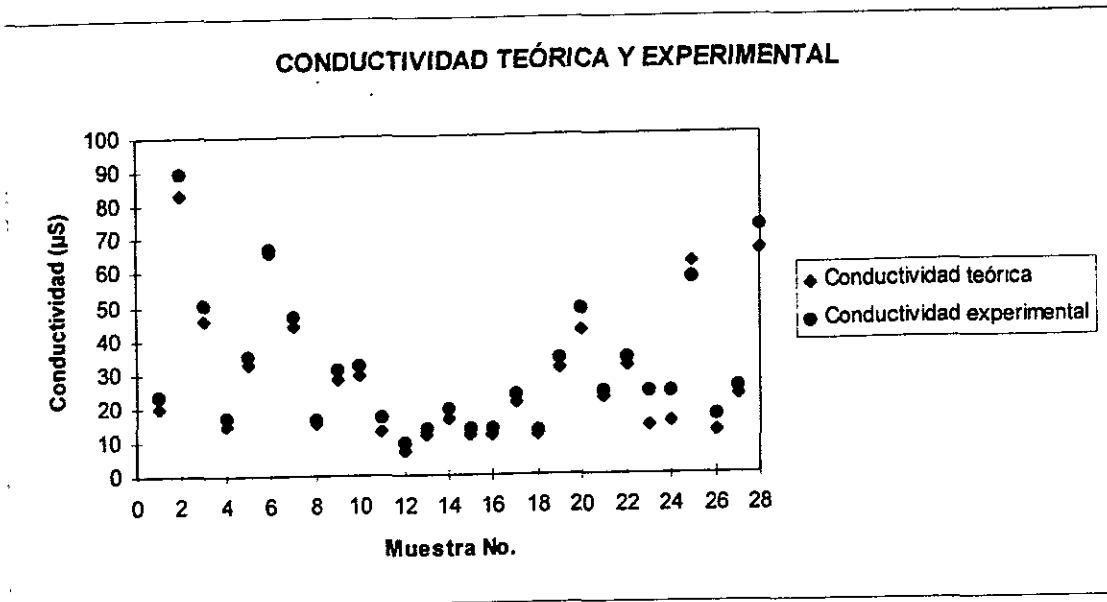
#### **4.2 Conductividades teórica y experimental en las muestras de agua de lluvia de Puerto Morelos**

En el anexo VI, se muestran los resultados obtenidos al realizar el estudio de conductividad en las muestras de agua de lluvia de Puerto Morelos. Este estudio consistió en llevar a cabo una comparación entre las conductividades experimentales y las conductividades teóricas de las muestras de agua de lluvia.

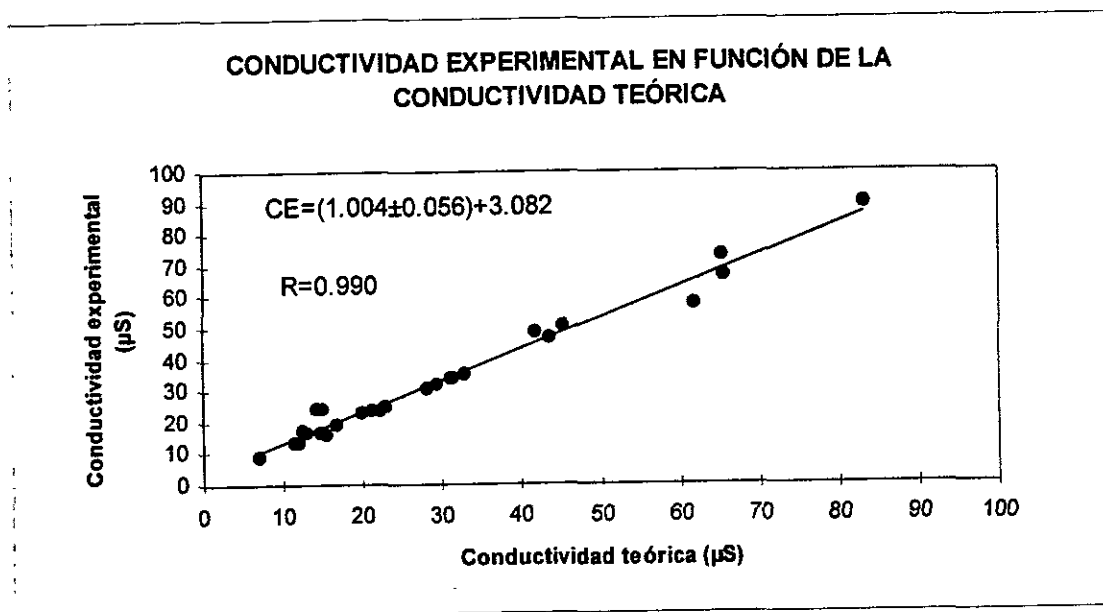
Las conductividades teóricas se obtienen al tomar en cuenta la contribución que cada ion aporta a la conductividad total de la solución. Este parámetro, que se denomina conductividad equivalente límite, depende del ion en cuestión y su valor se encuentra reportado en la literatura (Lange, 1979).

En la figura 7 se muestra la gráfica de las conductividades experimental y teórica, en función del número de muestra para el año 1994. La figura 8 muestra la gráfica de conductividad experimental en función de la conductividad teórica para el mismo año.



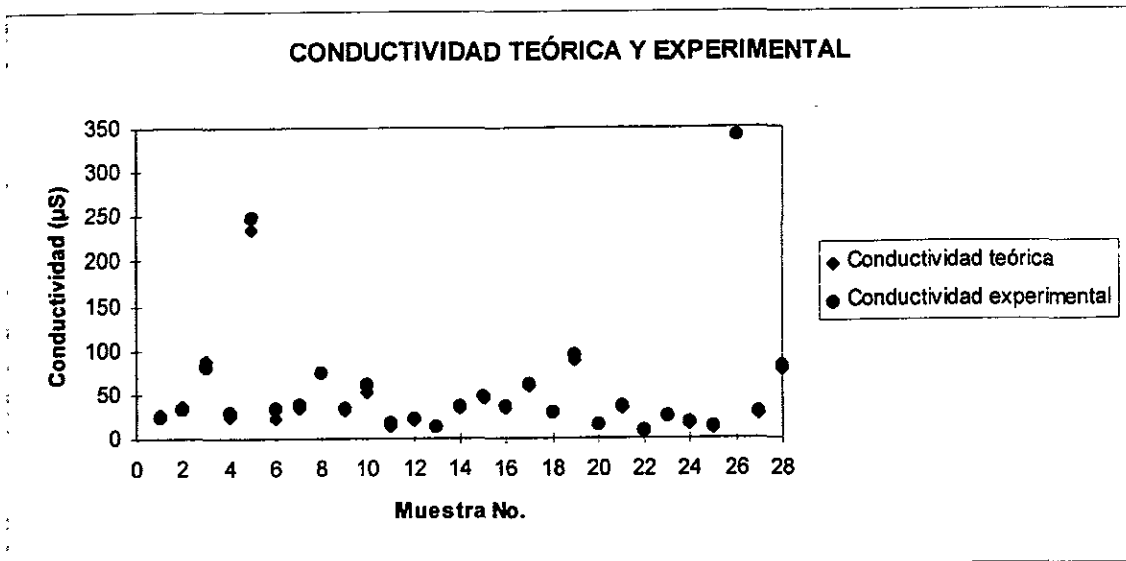


**Fig. 7** Conductividades experimental y teórica de las muestras de agua de lluvia de Puerto Morelos. Año 1994.

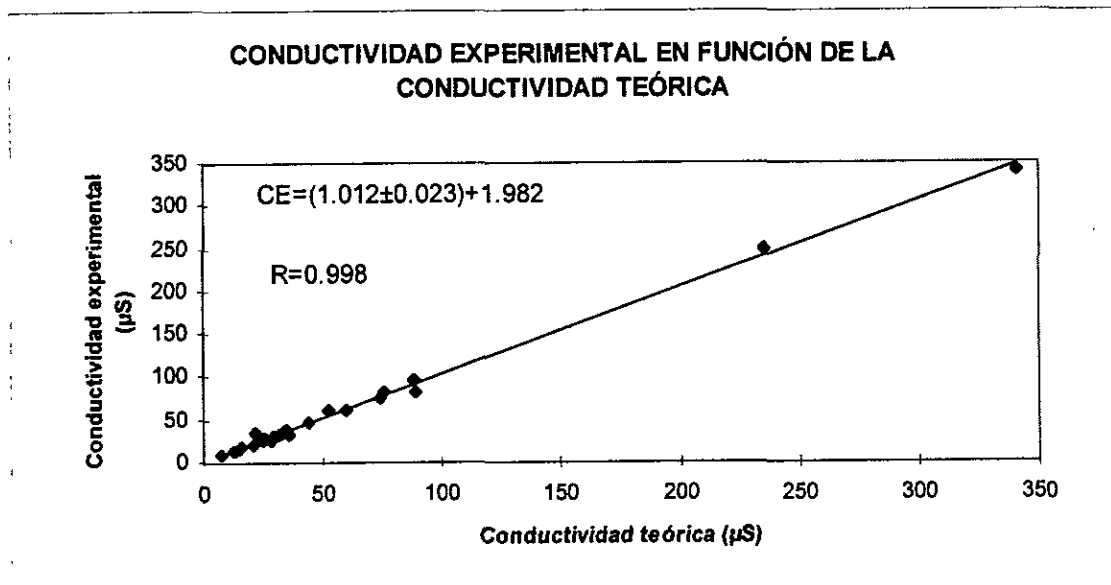


**Fig. 8** Conductividad experimental en función de la conductividad teórica en las muestras de agua de lluvia de Puerto Morelos. Año 1994

Las figuras 9 y 10 muestran la misma información que las gráficas anteriores para las muestras de agua de lluvia de Puerto Morelos correspondientes al año 1995.



**Fig. 9** Conductividades experimental y teórica de las muestras de agua de lluvia de Puerto Morelos. Año 1995.



**Fig. 10** Conductividad experimental en función de la conductividad teórica en las muestras de agua de lluvia de Puerto Morelos. Año 1995.

### 4.3 Composición química del influente y del efluente en la CIA

En el anexo VII se muestra la composición química del agua ácida, correspondiente a los 15 lotes obtenidos y analizados en la CIA. En dicho anexo se indica, para cada lote y cada muestra: el pH, el volumen de efluente recolectado, la conductividad experimental, las concentraciones molares de los cationes y de los aniones, así como sus concentraciones netas. Las concentraciones netas de cada muestra se obtuvieron restando de las concentraciones de dicha muestra, las concentraciones del blanco.

En las columnas rotuladas con MUESTRA No., el primer dígito corresponde al número de muestra, y el segundo dígito se refiere al lote en cuestión.

Además de la información anterior, la tabla 10 muestra, en forma condensada, el volumen total que se utilizó en el goteo (V), el tiempo total de goteo (t) y el gasto volumétrico (G), para cada una de las muestras, en los 15 lotes.

Muestra No.	V (L)	t (h)	G (mL/min)
1	50.583	812.58	1.037
2	44.554	812.73	0.914
3	44.998	812.93	0.923
4	42.621	813.43	0.873
5	45.638	813.62	0.935

**Tabla 10 Volumen total empleado en el goteo, tiempo total de goteo y flujo volumétrico para cada una de las muestras en la CIA**

Como dato adicional, se calculó el diámetro promedio de las gotas de agua que incidieron sobre las muestras de roca caliza. Esta determinación fue factible ya que al realizar las pruebas previas antes de poner en marcha la cámara de intemperismo acelerado, se cuantificaron el número de gotas por unidad de tiempo que caían del orificio y el gasto volumétrico. Se consideraron 30 eventos y el resultado obtenido fue  $(0.500 \pm 0.018)$  cm.

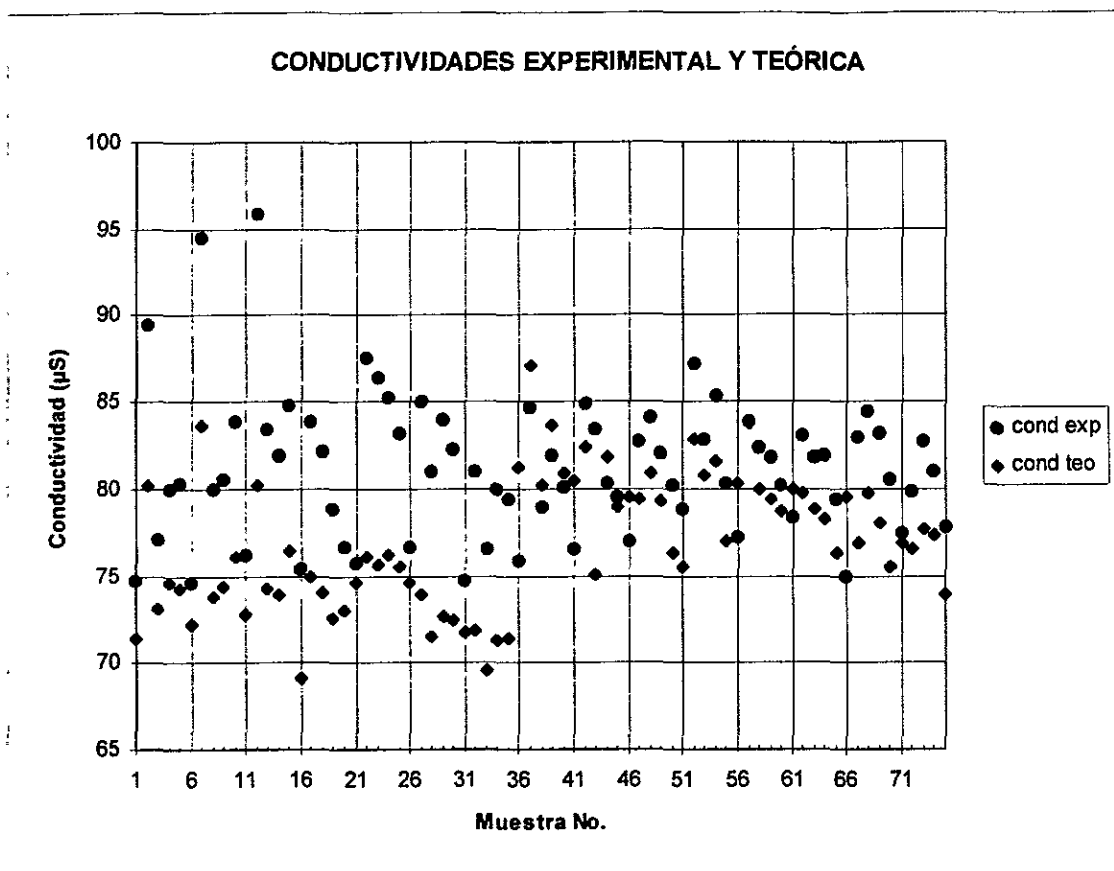
#### 4.4 Balance iónico en las muestras de agua obtenidas en la CIA

De la misma forma que para las muestras de agua de lluvia de Puerto Morelos, se realizó el balance iónico del efluente obtenido en la CIA. En el anexo VIII, se indica la razón entre la suma de cationes y la suma de aniones para los 15 lotes obtenidos. Cabe hacer mención que a los valores de pH del efluente, la especie más importante en el sistema de los carbonatos es el ion bicarbonato (Manahan, 1991), razón por la cual, fue necesaria su cuantificación por un procedimiento analítico mencionado en la literatura (Villagómez, 1986).

#### 4.5 Conductividades teórica y experimental en las muestras de agua en la

##### CIA

En la figura 11, se muestra la gráfica de conductividad experimental y conductividad teórica en función del número de muestra. Se puede observar una mejor concordancia entre las conductividades experimentales y teóricas a partir del lote ocho. Esto se debe a que a partir de este lote, se realizaron las determinaciones de los iones bicarbonato en la solución, dando lugar a un mejor balance iónico entre los cationes y los aniones.



**Fig. 11 Conductividades experimental y teórica en función del número de muestra obtenida en la CIA**

#### 4.6 Recesión superficial en las muestras de roca caliza

La recesión superficial de cada una de las muestras de roca caliza se determinó de acuerdo con la literatura (Baedecker et al, 1992). Las variables que se consideraron en el cálculo de la recesión superficial fueron: la concentración total neta de calcio proveniente de cada muestra ( $[Ca^{2+}]$ , mmoles/L); el volumen total de agua ácida que incidió sobre cada muestra (V, L); el área de la roca sobre la que incidió el agua ( $A_o$ ,  $cm^2$ ); la densidad de la roca ( $\rho$ ,  $g/cm^3$ ) y la porosidad de la roca (Baedecker et al, 1992, consideran que la fracción de la lluvia incidente retenida por la roca caliza es de 0.36).

La recesión superficial, en  $\mu m$ , se calculó de la manera siguiente:

$$Rs = \{([Ca^{2+}] V 1000)/(A_o \rho)\} \quad (1)$$

La recesión superficial, en  $\mu m/año$ , se determinó como se indica a continuación:

$$RS = Rs (1.92)/V \quad (2)$$

En donde el factor 1.92, se obtuvo al considerar que si la precipitación pluvial anual promedio, en Puerto Morelos, es de 1200 mm, el volumen anual que debería pasar por la roca caliza sería de 3 litros. Este valor multiplicado por la fracción no retenida (0.64), da lugar al factor ya indicado.

En el anexo IX, se muestran los valores individuales de la recesión superficial para cada muestra, así como el valor promedio. Asimismo, se indica el volumen total de agua que incidió sobre cada muestra y el tiempo, en años, que debería transcurrir para que, de manera natural, incidiera sobre la roca la cantidad de agua que se utilizó en este experimento.

Sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, la porosidad de la roca caliza es del orden del 11% (tabla 1), de tal manera que la recesión superficial promedio de cada muestra sería la que se indica en la tabla 11.

Muestra No.	RS promedio, $\mu m/año$
2	4.71 $\pm$ 0.19
3	4.21 $\pm$ 0.29
4	4.30 $\pm$ 0.16
5	3.59 $\pm$ 0.11

**Tabla 11 Recesión superficial en las muestras de roca caliza**

#### 4.7 Determinación del contenido de carbonato de calcio en la roca caliza

##### 4.7.1 Mediante la pérdida en masa de la roca caliza

De acuerdo con los cromatogramas obtenidos al realizar el experimento indicado en la sección 3.5, se determinó el contenido de calcio en las tres muestras de roca caliza analizadas y, por ende, el contenido de carbonato de calcio promedio. En la tabla 12, se indican los resultados obtenidos.

Muestra No.	Concentración de calcio, ppm	% de carbonato de calcio
1	3.6±0.01	87±0.30
2	3.6±0.01	87±0.30
3	3.5±0.01	87±0.30
		% CaCO <sub>3</sub> , prom = 87±0.50

**Tabla 12 Contenido de carbonato de calcio en la roca caliza**

Con la información anterior, fue posible obtener la masa de carbonato de calcio disuelta por el agua ácida para cada una de las muestras. En la tabla 13, se indica la pérdida total de masa que sufrieron las muestras, mediante el análisis gravimétrico, y en la tabla 14, se indica la pérdida de carbonato de calcio por cada muestra, considerando que cada una de ellas posee un contenido del 87% de dicho compuesto.

Muestra No.	Masa inicial (g)	Masa final (g)	pérdida en masa (g)
2	45.9066	45.3406	0.5660±1.414 x10 <sup>-4</sup>
3	53.4312	52.9340	0.4972±1.414 x10 <sup>-4</sup>
4	52.3974	51.9135	0.4839±1.414 x10 <sup>-4</sup>
5	64.5109	64.0176	0.4933±1.414 x10 <sup>-4</sup>

**Tabla 13 Pérdida en masa de las muestras de roca caliza mediante**

**análisis gravimétrico**

Muestra No.	Masa de carbonato de calcio, g
2	$0.49 \pm 1.7 \times 10^{-3}$
3	$0.43 \pm 1.5 \times 10^{-3}$
4	$0.42 \pm 1.5 \times 10^{-3}$
5	$0.43 \pm 1.5 \times 10^{-3}$

**Tabla 14 Pérdida de carbonato de calcio en las muestras de roca caliza mediante análisis gravimétrico**

#### 4.7.2 Mediante la concentración total de calcio en el efluente

La masa de carbonato de calcio disuelta por el agua ácida también se obtuvo a partir de la concentración total neta de calcio, determinada en el efluente, para cada muestra. En la tabla 15, se indican los resultados obtenidos.

Muestra No.	Masa de carbonato de calcio, g
2	$0.45 \pm 4.5 \times 10^{-3}$
3	$0.41 \pm 4.1 \times 10^{-3}$
4	$0.37 \pm 3.7 \times 10^{-3}$
5	$0.36 \pm 3.6 \times 10^{-3}$

**Tabla 15 Pérdida de carbonato de calcio en las muestras de roca caliza mediante la cuantificación del calcio en el efluente**

#### 4-8 Análisis por difracción de rayos-x de la roca caliza después del goteo

En el anexo I, se muestra el análisis por rayos-x de la roca caliza después del goteo con el agua ácida. Se puede observar, de acuerdo con la gráfica obtenida (para la muestra No. 2), que después del goteo, no se detecta la presencia de la montmorillonita; en cambio, se observa la presencia de un nuevo compuesto, a saber: sulfato de calcio hidratado:  $(\text{CaSO}_4 \cdot 0.19 \text{H}_2\text{O})$ .



5. *EVALUACIÓN DE RESULTADOS*

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, se pueden establecer los siguientes comentarios importantes:

1.- Con base en el análisis por difracción de rayos-x, la muestra de roca caliza utilizada en la construcción de los monumentos mayas contiene, efectivamente, como compuesto mayoritario carbonato de calcio, en forma de calcita y de aragonita. Asimismo, contiene un material arcilloso: montmorillonita.

2.- El contenido de carbonato de calcio en la roca caliza que se utilizó en esta investigación es  $(87 \pm 0.50)\%$ .

3.- De los cationes disueltos por el agua ácida, el calcio es el que presenta una mayor concentración en el efluente. Las concentraciones de sodio y de magnesio también aumentan, indicando la contribución de estos iones por la roca caliza (en efecto, la montmorillonita contiene tales elementos en su estructura). La concentración de ion amonio disminuye en el efluente. Esto se puede atribuir al equilibrio químico siguiente:



El cual indica, como es el caso, que si la acidez del efluente disminuye, el equilibrio se desplaza hacia la derecha, disminuyendo la concentración de ion amonio.

El análisis por difracción de rayos-x muestra que la roca caliza contiene trazas de potasio; sin embargo, en el efluente, en algunas ocasiones se observa un incremento en su concentración y, en algunas otras, una disminución.

4.- En cuanto a los aniones, las concentraciones de los cloruros y de los bicarbonatos se incrementan en el efluente, aunque este último, presenta concentraciones muy altas. Las concentraciones de nitratos y de sulfatos presentan un comportamiento irregular, ya que en algunas ocasiones su concentración aumenta y, en algunas otras, disminuye.

5.- Al llevar a cabo la suma de las concentraciones netas del ion potasio y del ion nitrato, se observa que el resultado es positivo para ambos iones ( $2.532 \times 10^{-5}$  M, para potasio; y  $5.673 \times 10^{-5}$  M, para nitratos), lo cual indica que en el efluente, hubo una contribución neta de estos iones por la roca caliza. Sin embargo, cuando se realiza el mismo tratamiento para el ion sulfato se obtiene un valor negativo ( $-2.907 \times 10^{-5}$  M), indicando que la roca caliza absorbió parte de estos iones (esta

conclusión refuerza el hecho de que en el análisis por difracción de rayos-x se identificara sulfato de calcio en la roca).

6.- la neutralización del agua ácida por el carbonato de calcio, sugiere el mecanismo de disolución químico siguiente:



Ya que como se mencionó anteriormente, en el efluente se encuentran altas concentraciones de los iones bicarbonato y calcio, y los resultados encontrados son congruentes con la estequiometría de dicha reacción.

7.- Las conductividades experimentales no difieren significativamente de las conductividades teóricas, en las muestras de Puerto Morelos. Esta afirmación es producto de aplicar una prueba *t*, a un nivel de significación del 5%, a ambos conjuntos de datos, así como al hecho de que las pendientes, en las graficas de la conductividad teórica en función de la conductividad experimental, incluyen el valor unitario, al considerar las incertidumbres.

8.- El estudio de la conductividad, realizado en las muestras provenientes de la CIA, indica que a los valores de pH del efluente, es muy importante tomar en cuenta la contribución de los iones bicarbonato en la conductividad total de la solución, como se muestra en la figura 11, donde se observa una menor dispersión entre las conductividades experimental y teórica a partir del lote 8 (lote a partir del cual se cuantificaron los iones bicarbonato).

9.- Respecto al balance iónico, en las muestras de la CIA, se observa que antes del lote 8, la suma de aniones no representa fielmente la concentración real que debería tener la solución en estos iones. Esto se refleja en los valores altos (respecto a la unidad) que se obtienen. De la misma manera que en el estudio de la conductividad, el balance iónico mejora apreciablemente cuando se toman en cuenta los iones bicarbonato. Las muestras indicadas como blanco, se acercan mucho al valor unitario, ya que al valor de pH que poseen, la concentración de bicarbonato es despreciable.

10.- Con el objeto de verificar que el balance iónico en las muestras de la CIA, a partir del lote 8, no difiriera significativamente del valor unitario, se llevó a cabo una revisión en la bibliografía (Caulcutt, 1983; Anderson, 1987) para determinar la incertidumbre experimental en las concentraciones de los aniones y de los cationes. Se tomó como ejemplo la muestra número 2 del

lote 14, y la suma de aniones con su incertidumbre fue  $(7.43 \pm 0.64) \times 10^{-4}$  M. Si este valor se compara con la suma de cationes para el mismo lote ( $6.975 \times 10^{-4}$  M), se observa que el último valor está comprendido en el primero y, en consecuencia, el valor unitario para el cociente es factible. El nivel de confianza que se utilizó para esta prueba estadística fue del 95%.

11.- La determinación de carbonato de calcio mediante la cromatografía iónica es bastante reproducible como lo indican los resultados obtenidos en la tabla 12.

12.- Baedecker et al (1992), reportan valores de recesión superficial para roca caliza entre 6.7 y 9.0  $\mu\text{m/año}$ . En este trabajo, el intervalo de valores se encuentra entre 3.5 y 4.9  $\mu\text{m/año}$ ; sin embargo, es importante mencionar algunas discrepancias entre ambos experimentos: el área de la roca utilizada por tales investigadores ( $1858 \text{ cm}^2$ ) difiere apreciablemente de la utilizada en esta investigación ( $25 \text{ cm}^2$ ); ellos exponen las muestras de roca caliza a la lluvia natural, mientras que en esta investigación se someten a una lluvia ácida preparada en el laboratorio; utilizan factores empíricos para relacionar la cantidad de agua que incide sobre las muestras y el efluente que se obtiene; y finalmente, asignan un valor de porosidad de la roca que difiere sustancialmente del utilizado en este trabajo (0.36 vs 0.11).

13.- La pérdida de carbonato de calcio obtenida por el método gravimétrico, no difiere sustancialmente del método en el que se cuantifica el ion calcio en el efluente, al menos para las muestras 2 y 3; sin embargo, para las muestras 4 y 5, los resultados discrepan en alrededor del 15%. Esto se puede deber a que en el método gravimétrico, la pérdida en masa, se debe a la erosión química y física que sufrió la roca, mientras que al cuantificar el ion calcio arrastrado por el agua, solamente se considera la disolución química. Esto se corrobora, ya que en el análisis gravimétrico, en todos los casos, se obtienen valores superiores a los del otro método.

14.- El hecho de que el análisis por difracción de rayos-x de la roca caliza, después de la irrigación, no detecte la presencia de la montmorillonita, quizá es debido a que como esta arcilla se expande fácilmente (Kirk Othmer, 1993), puede ser arrastrada por disolución con la lluvia ácida. Este hecho confirmaría la presencia de magnesio en el efluente.

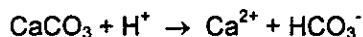
6. *CONCLUSIONES*

La cromatografía iónica mostró ser una técnica analítica muy útil y confiable en la cuantificación de los aniones y de los cationes en muestras de agua de lluvia. Útil, porque la determinación de varios aniones o de cationes, en una sola corrida, es ideal para cuantificar una gran cantidad de muestras como las que se analizaron en este trabajo, y confiable, porque las curvas de calibración que se obtuvieron presentan coeficientes de correlación bastante aceptables (la curva de calibración del ion amonio es la que presenta el peor coeficiente de correlación; sin embargo, en vista de que para cada lote de muestras era necesario volver a generar una nueva curva de calibración, los resultados para este ion mejoraron).

El agua de lluvia que cayó sobre Puerto Morelos, en el año de 1994, presentó características más ácidas que en el año de 1995. En efecto, se observa que de los 28 datos presentes en el año de 1994, 20 de ellos, poseen un valor inferior a 5.6; mientras que sólo 4 de los 28 datos correspondientes a 1995, cumplen con esta característica.

Como pruebas de concordancia analítica, el balance iónico y el estudio de conductividad permiten conocer si la cuantificación de las especies iónicas más importantes en una solución se ha llevado a cabo o no, tal como fue el caso del ion bicarbonato, donde al no considerarse en el balance iónico, originó discrepancias tan altas como del 25% respecto al valor teórico.

De acuerdo con las concentraciones de calcio y de bicarbonato encontradas en el efluente, la neutralización del agua ácida por la roca caliza, está de acuerdo con el mecanismo de disolución químico siguiente:



Es decir, la lluvia ácida causó la disolución-química de la roca caliza al disolver el carbonato de calcio que contiene, así como los elementos que constituyen la arcilla. Este daño a la roca, conocido como *recesión superficial*, tuvo un valor promedio de 4.2  $\mu\text{m}/\text{año}$ , bajo las condiciones experimentales utilizadas en esta investigación.

Sin embargo, afirmar que la *recesión superficial total* de la roca caliza que forma parte de los monumentos mayas es de tal magnitud, sería erróneo, ya que en los 23 años de simulación que abarcó este estudio, la roca también se degradaría por fenómenos físicos y bacteriológicos, además de químicos.

La presencia de sulfato en la lluvia causó la formación de sulfato de calcio en la roca, como lo indican los análisis por difracción de rayos-x después del goteo, así como el déficit de iones sulfatos encontrados en el efluente, respecto a la lluvia incidente.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, se puede afirmar que los objetivos de este trabajo de investigación se han cumplido, en el sentido de que, por una parte, se cuantificaron los efectos que la lluvia ácida causó sobre el material calizo y, por la otra, se propuso un mecanismo de disolución de la roca compatible con los resultados obtenidos.



- 1.- Anderson, R. L. *Practical Statistics for Analytical Chemists*. Van Nostrand Reinhold, New York, pp 94-103, 1987.
- 2.- Arnold, A. and Kueng, A. *Crystallization and Habits of Salt Efflorescences on Walls I. Methods of Investigation and Habits*. Vth. Intern. Cong. Deterioration and Conservation of Stone. Lausanne. 255-267, 1985.
- 3.- ASTM. *Standard Methods of Test for Absorption and Bulk Specific Gravity of Natural Building Stone*. No. C97-47. American Society for Testing Materials. Part XVI, pp.1-3, 1985.
- 4.- Baedeker, P.A. et al. *Effects of Acidic Deposition on the Erosion of Carbonate Stone- Experimental Results from the U.S. National Acid Precipitation Assessment Program (NAPAP)*. *Atmopsheric Environment*, **26B**, No. 2, pp 147-158, 1992.
- 5.- Baer, S.N., et al. *Effects of Acidification of Materials and Cultural Property*. *Studies in Environmental Science* 30. *Acidification and its Policy Implications*. Proceedings of an International Conference held in Amsterdam, may 5-9, 1986 (pp 189-213).
- 6.- Baños, L. *X-Ray Studies of Carbonate Stones from Tulum, Quintana Roo*. Private Communication. Institute of Investigation in Materials, National University of Mexico. 1998.
- 7.- *Boletín Climatológico del Servicio Meteorológico Nacional*. Anual de 1980. Instituto de Geofísica, UNAM.
- 8.- Bravo, A. H. *La contaminación del aire en México*. *Universo Veintiuno*. México, pp.198-200, 1987.
- 9.- Caulcutt, R. and Boddy, R. *Statistics for Analytical Chemists*. Chapman & Hall, London. First edition, pp 79-96, 1983.
- 10.- Charola, A.E. and Lewin, S.Z. *Efflorescences on Building Stones, SEM in the Characterization and Elucidation of the Mechanisms of Formation*. *Scanning Electron Microscopy I*. 379-386. 1979.
- 11.- Cheng, J.R. and Castillo, R. *A Study of Marble Deterioration at City Hall, Schenectady, New York*, **34**, 1, 15-19, 1984.
- 12.- *Encyclopedia of Chemical Technology*. Vol. 6. Fourth Edition. Kirk-Othmer. 1993.
- 13.- EPA. 1980. *Acid Rain*. EPA-600/9-79-036. United States Environmental Protection Agency. Office of Research and Development. Washington, D.C. 36 pp.
- 14.- EPA. *Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems*. Vol. V: *Precipitation Measurement Systems*. EPA/600/R-94/038e. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Research and Development. Washington, D.C., 20460. April, 1994.



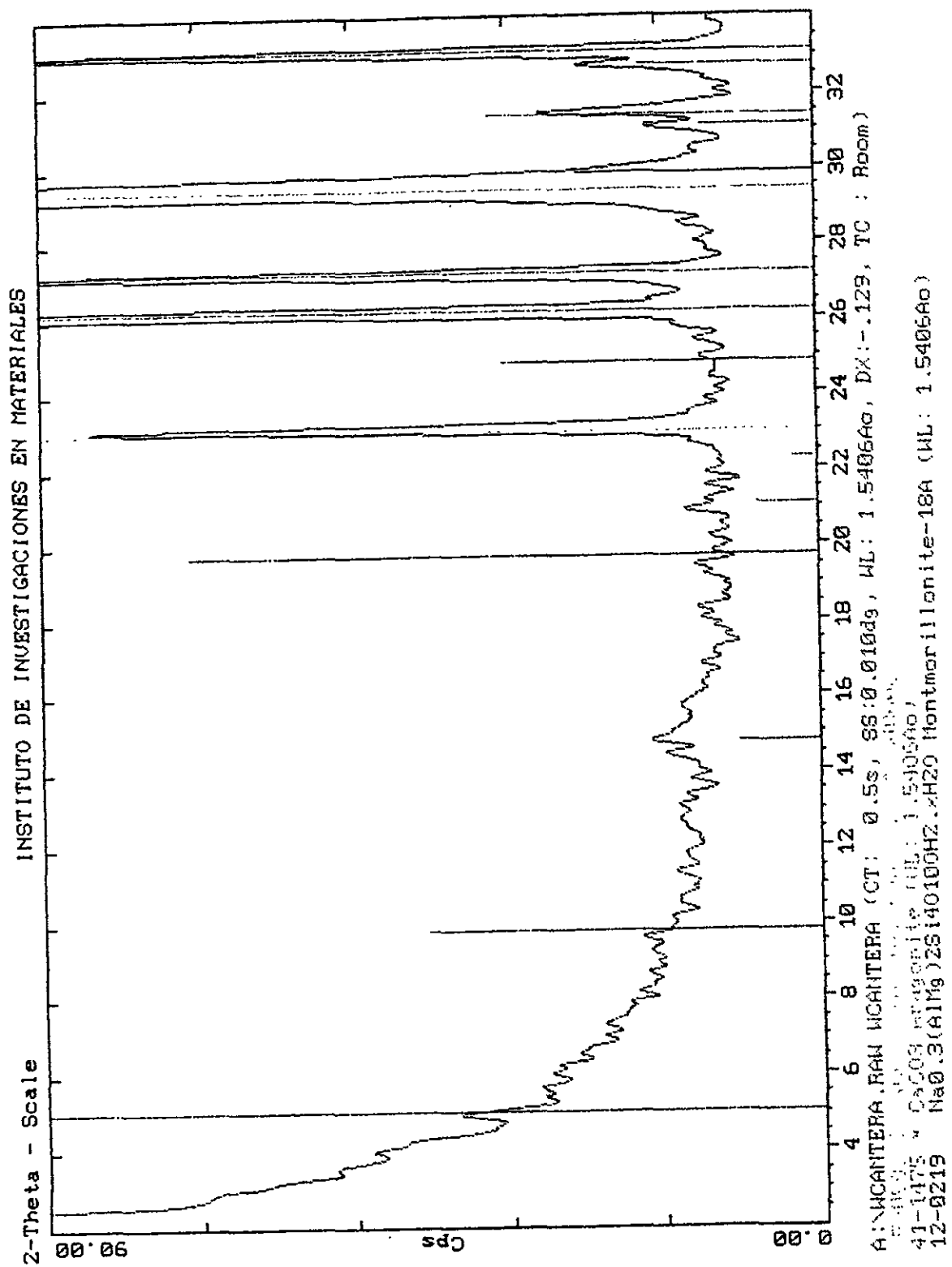
- 15.- EPRI. 1983. The Sulfate Regional Experiment Report of Findings. Vol. 1-3, EA-1901, Research Projects 862-1 y 862-2. Electric Power Research Institute. Palo Alto, Calif. 94304.
- 16.- Fernández, V. G. Apuntes de Química Ambiental. Julio de 1986 (pp 89-111). División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería. UNAM.
- 17.- Fernández, V. G. Manual de Laboratorio de Química del Agua (pp 117-124). División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- 18.- Ferrusquía, I.V. Petrographic Study of Carbonate Stones from Tulum, Quintana Roo. Private Communication. Institute of Geology, National University of Mexico. 1998.
- 19.- Folk, R.L. Petrology of Sedimentary Rocks. Austin, Tex., Hemphill's, 170 pp. 1968.
- 20.- Goddard, E.N. et al. Rock Color Chart. Geol. Soc. America (Spec. Publ.). 1963.
- 21.- ISRM. Commission on Standardization of Laboratory and Field Test. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. **16**, 2, 143-156, 1979.
- 22.- Jaynes, M.S. and Cooke, U.R. Stone Weathering in Southeast England. Atmospheric Environment. **21**, 7, 1601-1622, 1987.
- 23.- Lange's Handbook of Chemistry. Twelfth Edition. Edited by John A. Dean. McGraw-Hill Book Co. 1979.
- 24.- Lipfert, W.F. Uncertainties in the Estimation of Materials Damage due to Acid Deposition. For presentation at the 80<sup>th</sup> Annual Meeting of APCA, New York, June 21-26, 1987.
- 25.- Lipfert, W.F. Effects of Acidic Deposition on the Atmospheric Deterioration of Materials. Materials Performance. July 1987.
- 26.- Manahan, S.E. Environmental Chemistry. Fourth Edition. Lewis Publishers, Inc. 1990.
- 27.- Manual de Estadísticas Básicas del Estado de Quintana Roo. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Mayo de 1984. Instituto de Geografía, UNAM.
- 28.- McGee, S.M. 1991. The Formation of Chemical Alteration Products. Acidic Deposition State of Science and Technology. Vol. III: Terrestrial, Materials, Health and Visibility Effects. The U.S. National Acidic Precipitation Assessment Program. 140-144.
- 29.- NAPAP. 1990. Integrated Assessment Report. National Acid Precipitation Assessment Program. Published by the NAPAP Office of the Director. 722 Jackson Place, NW. Washington, D.C. 520 pp.
- 30.- NAPAP. 1991. Acidic Deposition: State of Science and Technology. Vol. III: Terrestrial, Materials and Visibility Effects. The U.S. National Acidic Precipitation Assessment Program. 129 pp.

- 31.- Peleg, M. et al. Deterioration of Jerusalem Limestone from Air Pollutants; Field Observations and Laboratory Simulation. *Environmental Monitoring and Assessment*. **12**, 191-201, 1989.
- 32.- Précipitations Acides. Les Précipitations Acides au Québec: état de la situation (1996). Environnement et Faune Québec. Mars 1996.
- 33.- Reddy, M.M. and Youngdahl, A.C. Acid Rain and Weathering Damage to Carbonate Building Stone. *Materials Performance*. July 1987.
- 34.- Reddy, M.M. Acid Rain Damage to Carbonate Stone: A Quantitative Assessment Based on the Aqueous Geochemistry of Rainfall Runoff from Stone. *Earth Surface Processes and Landforms*. **13**, 335-354, 1988.
- 35.- RILEM. Essais Recommandés pour Mesurer l'Alteration des Pierres et Evaluer l'Efficacité des Méthodes de Traitement. *Materiaux et Constructions*. **13**, 75, 216-220, 1980.
- 36.- Rosvall, J. *Air Pollution and Conservation. Safeguarding our Architectural Heritage*. Elsevier. 1988.
- 37.- SCT. Quintana Roo. Mapa Turístico de Comunicaciones y Transportes, 1994.
- 38.- Snoeyink, V.L., Jenkins, D. *Química del Agua*. Limusa, 1ª. ed., pp. 181-187, 1987.
- 39.- Trudgill, T.S. et al. Trends in Stone Weathering and Atmospheric Pollution at St. Paul's Cathedral, London, 1980-1990. *Atmospheric Environment*. **25A**, 12, 2851-2853, 1991.
- 40.- Viles, A.H. The Early Stages of Building Stone Decay in an Urban Environment. *Atmospheric Environment*, **24A**, 1, 229-232, 1990.

*B. ANEXOS*

*ANEXO I*  
*ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS-X*

## I.1 ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS-X ANTES DEL GOTEO



5- 586

JCPDS-ICDD Copyright (c) 1991

Quality: i

				d A	Int.	h k l
CaCO <sub>3</sub>						
3						
Calcium Carbonate				3.86	12	0 1 2
				3.035	100	1 0 4
				2.845	3	0 0 6
Calcite, syn				2.495	14	1 1 0
				2.285	18	1 1 3
Rad: CuK $\alpha$ Lambda: 1.5405 Filter: Ni d-sp:						
Cutoff: Int: Diffractometer I/Tcor: 2.00				2.095	18	2 0 2
Ref: Swanson, Fuyat, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, II 51 (1953)				1.927	5	0 2 4
				1.913	17	0 1 8
				1.875	17	1 1 6
				1.826	4	2 1 1
Sys: Rhombohedral (Hex) S.G.: R-3c (167)						
a: 4.989 b: c: 17.062 A: C: 3.4199						
A: B: C: Z: 6 mp:				1.604	8	1 2 2
Ref: Ibid.				1.587	2	1 0 10
				1.525	5	2 1 4
Dx: 2.71 Dm: 2.71 SS/FOM: F30=50(.016,37)				1.518	4	2 0 8
				1.510	3	1 1 9
ea: 1.487, n $\omega$ B: 1.659, ey: Sign: - ZV:						
Ref: Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., 2 142				1.473	2	1 2 5
				1.440	5	3 0 0
				1.422	3	0 0 12
Color: Colorless				1.356	1	2 1 7
X-ray pattern at 26 C. Sample from Mallinckrodt Chemical Works. CAS no.:				1.339	2	0 2 10
13397-26-7. Spectroscopic analysis: <0.1% Sr; <0.01% Ba; <0.001% Al, B, Cs,						
Cu, K, Mg, Na, Si, Sn; <0.0001% Ag, Cr, Fe, Li, Mn. Merck Index, 8th Ed., p.				1.297	2	1 2 8
190. Other form: aragonite. Calcite group, calcite subgroup.				1.284	1	3 0 6
*Not permitted by space group.				1.247	1	2 2 0
PSC: hR10. Mwt: 100.09. Volume[CO]: 367.78.				1.235	2	1 1 12
				1.1795	3	2 1 10

d A	Int.	h k l	d A	Int.	h k l	d A	Int.	h k l
1.1538	3	1 3 4	0.9846	1	2 3 2			
1.1425	1	2 2 6	0.9782	1	[ 1 3 10]			
1.1244	<1	1 2 11	0.9767	3	1 2 14			
1.0613	1	2 0 14	0.9655	2	3 2 4			
1.0473	3	4 0 4	0.9636	4	4 0 8*			
1.0447	4	3 1 8	0.9562	<1	2 0 16*			
1.0352	2	1 0 16	0.9429	2	4 1 0			
1.0234	<1	2 1 13	0.9376	2	2 2 12			
1.0118	2	3 0 12						
0.9895	<1	3 2 1						

Strong lines: 3.04/X 2.29/2 2.10/2 1.91/2 1.88/2 2.50/1 3.86/1 1.60/1

41-1475

JCPDS-ICDD Copyright (c) 1991

Quality: \*

		d Å	Int.	h k l
CaCO <sub>3</sub>				
Calcium Carbonate				
Aragonite				
Rad: CuKα	Lambda: 1.540598	Filter: Mono.	d-sp: Diff.	
Cutoff:	Int: Diffractometer	I/Icor: 1.0		
Ref: Keiler, L., Rask, J., Buseck, P., Arizona State University, Tempe, Arizona, USA, JCPDS Grant-in-Aid Report, (1989)				
Sys: Orthorhombic S.G.: Pnca (62)				
a: 4.9623(3)	b: 7.968(1)	c: 5.7439(3)	A:	C:
A:	B:	C:	Z: 4	mp:
Ref: Ibid.				
Ox: 2.93 Um: 2.95 SS/FOM: F30-217(.004,34)				
ea: 1.5300, mb: 1.6810, ey: 1.6854, Sign: -, 2V: 18(calc.) de				
Ref: Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., 2 182 (1951)				
Color: Colorless				
Specimen from Sefrou, Morocco. Microprobe analyses (wt.%): major Ca, and trace Sr(<<1). Optical data on specimen from Bilin, Bohemia, Czechoslovakia. Merck Index, 8th Ed., 190. Aragonite group. C.O. Cell: a=5.744, b=7.968, c=4.962, a/b=0.7209, c/b=0.6228, S.G.=Pnca (62). Silicon used as internal standard. PSC: oP20. To replace 5-453, and validated by calculated pattern 24-25.				
Structure reference: Jarosch, D., Heger, G., Tschermaks Mineral. Petrogr. Mitt., 35 127 (1996). Mwt: 100.09. Volume[CO]: 227.11.				
		4.212	3	1 1 0
		3.984	1	0 2 0
		3.397	100	1 1 1
		3.274	50	0 2 1
		2.872	6	0 0 2
		2.733	9	1 2 1
		2.702	60	0 1 2
		2.481	40	2 0 0
		2.411	14	0 3 1
		2.373	45	1 1 2
		2.342	25	1 3 0
		2.330	25	0 2 2
		2.190	12	2 1 1
		2.168	2	1 3 1
		2.108	20	1 2 2, 2 2 0
		1.9774	55	2 2 1
		1.9500	1	0 3 2
		1.8821	25	0 4 1
		1.8775	25	2 0 2
		1.8616	2	0 1 3
		1.8275	4	2 1 2
		1.8149	20	1 3 2
		1.7598	3	1 4 1
		1.7430	25	1 1 3
		1.7290	12	2 3 1

d Å	Int.	h k l	d Å	Int.	h k l	d Å	Int.	h k l
1.7257	16	0 2 3	1.3507	2	0 2 4	1.1370	<1	0 1 5
1.5984	2	2 2 2	1.3487	3	3 2 2	1.1323	1	3 3 3
1.6369	3	0 4 2	1.3416	2	1 5 2	1.1274	1	4 1 2
1.6300	1	1 2 3	1.3290	1	1 4 3, 0 6 0	1.1256	2	2 3 4, 3 5 1
1.6198	2	3 1 0	1.3058	1	2 5 1	1.1089	2	1 7 0, 1 1 5
1.5588	4	3 1 1	1.3035	1	1 2 4	1.1035	1	0 2 5, 4 3 1
1.5357	2	0 5 1	1.2615	5	3 3 2	1.0950	<1	4 2 2
1.4993	4	2 4 1	1.2521	1	1 6 1			
1.4891	1	2 1 3	1.2427	3	2 0 4, 3 4 1			
1.4764	2	3 2 1	1.2406	4	4 0 0			
1.4672	4	1 5 1	1.2365	6	3 1 3			
1.4360	1	0 0 4	1.2245	3	0 5 3, 1 3 4			
1.4167	1	2 2 3	1.2149	2	2 5 2			
1.4132	3	0 1 4	1.2059	4	2 4 3, 0 6 2			
1.4107	4	3 1 2	1.1890	3	1 5 3			
1.4040	3	3 3 0	1.1864	2	2 2 4			
1.3804	<1	0 4 3	1.1711	3	1 6 2, 2 6 0			
1.3663	2	2 4 2	1.1642	1	0 4 4, 3 4 2			
1.3639	2	3 3 1	1.1600	2	4 2 1			
1.3592	5	1 1 4	1.1389	1	4 0 2			

Strong lines: 3.40/X 2.70/6 1.98/6 3.27/5 2.37/5 2.48/4 2.34/3 2.33/3

12-219

JCPDS-ICDD Copyright (c) 1991

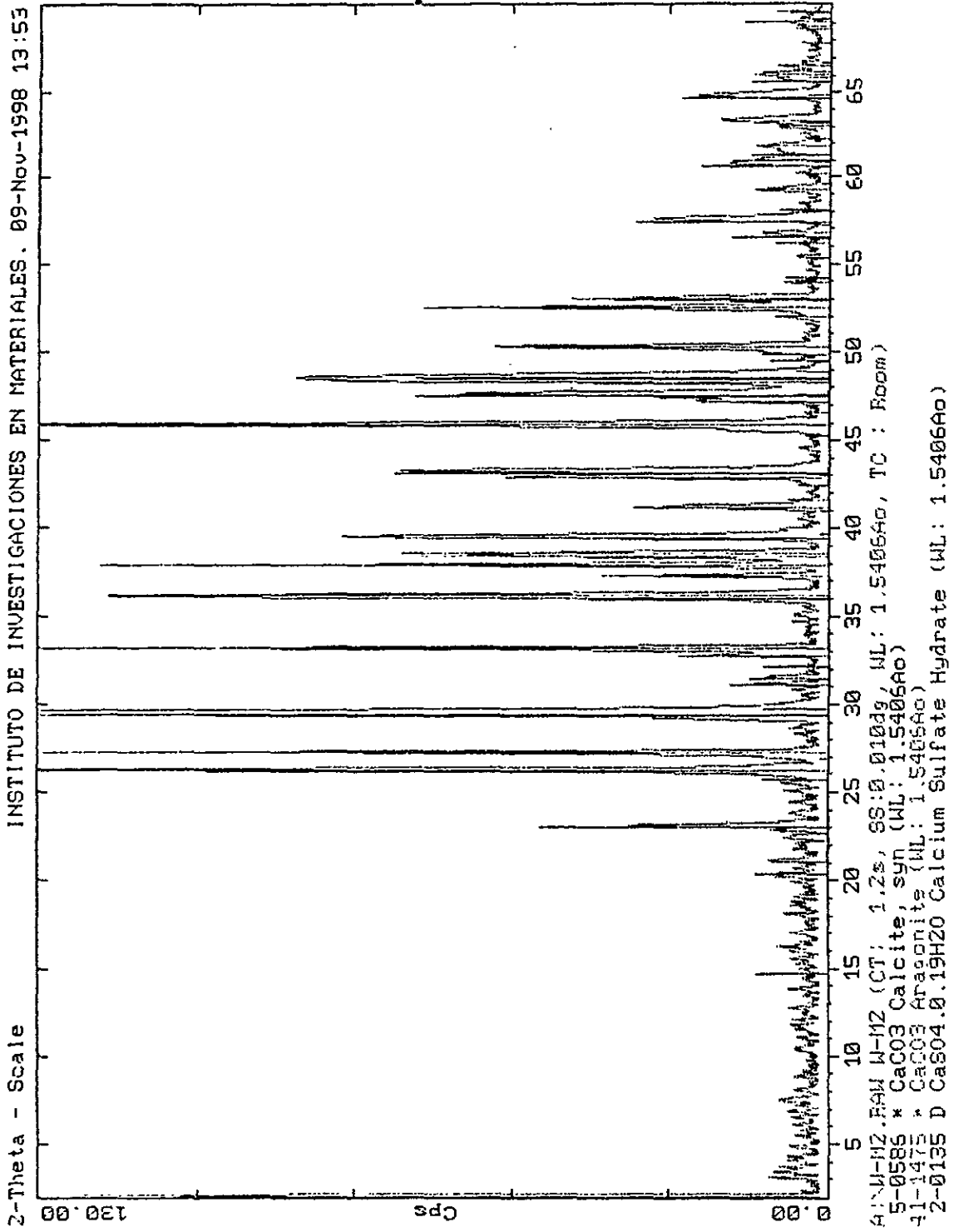
Quality:

	d Å	Int.	h k l
Na (AlMg) Si O OH 1xH O			
0.3 2 4 10 2 2			
Sodium Magnesium Aluminum Silicate Hydroxide Hydrate	17.6	100	0 0 1
Montmorillonite-18A	9.0	50	0 1 0
	5.99	10	0 0 3
	4.49	80	-1 0 2
	3.58	40	0 0 5
Rad: FeKα      λ: 1.9373      Filter:      d-sp: 0.5. -114.6			
Cutoff:      int: Visual      I/Cor:	2.99	30	0 0 6
Ref: Earley et al., Am. Mineral., 38 707 (1953)	2.57	40b	1 3 1
	2.242	10	1 2 6
	1.989	5	0 0 9
	1.699	20	-1 4 6
Sys: Monoclinic      S.G.:			
a: 5.2      b: 9.0      c: 17.9      A:      C:			
A:      B: 90.6      C:      Z: 2      mp:	1.504	60	3 3 0
Ref: Ibid.	1.294	10b	-2 0 12
	1.250	10	4 2 0
Dx:      Dm:      SS/FOM: F13=1(.058,300)			
ea: 1.48-1.61, mωB: 1.50-1.64, ey: 1.50-1.64, Sign: -, 2V: Small			
Ref: Deer, Howie, Zussman, Rock Forming Minerals, 3 226			
Color: Commonly white, yellow or green			
Specimen from Chambers, Arizona, USA, 200-70μ fraction. CAS no.: 1318-93-0.			
Glycol sodium saturated. Pseudohexagonal. Smectite group, dioctahedral			
subgroup. C.D. Cell: a=17.900, b=9.000, c=5.200, a/b=1.9889, c/b=0.5778. To			
replace 12-204. Mwt: 0.00. Volume[CO]: 837.72.			

Strong lines: 17.6/X 4.49/B 1.50/6 9.00/5 3.58/4 2.57/4 2.99/3 1.70/2



1.2 ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS-X DESPUÉS DEL GOTEO



*ANEXO II*  
*COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA DE LLUVIA DE*  
*PUERTO MORELOS*

## II.1 AÑO 1994

CONCENTRACIÓN IÓNICA EN MUESTRAS DE LLUVIA DE PUERTO MORELOS, QUINTANA ROO AÑO 1994										
Mes	pH	Cloruros (ppm)	Nitratos (ppm)	Sulfatos (ppm)	Sodio (ppm)	Amonio (ppm)	Potasio (ppm)	Magnesio (ppm)	Calcio (ppm)	
30-jun	6.010	4.305	0.810	1.293	2.510	0.102	0.191	0.290	1.247	
13-jul	6.200	19.418	2.450	4.335		0.035	0.560	1.369		
20-jul	5.960	10.151	2.074	2.897	5.892	0.108	0.289	0.794		
8-ago	5.440	3.237	0.952	1.067	1.878	0.067	0.082	0.242	0.472	
10-ago	5.130	8.028	0.925	1.573	4.754	0.095	0.255	0.507	0.530	
14-ago	5.770	15.970	1.880	2.541		0.271	0.476	1.071	1.265	
26-ago	5.560	11.265	0.361	1.819	6.361	0.035	0.297	0.837	0.717	
27-ago	5.450	3.754	0.547	0.655	2.131	0.035	0.177	0.260	0.248	
13-sep	5.440	6.897	1.252	1.457	3.812	0.035	0.171	0.458	0.630	
15-sep	5.310	6.981	1.606	1.249	3.646	0.035		0.395	0.478	
18-sep	4.600	2.875	0.995	1.059	1.665	0.084	0.112	0.152	0.100	
19-sep	4.920	1.655	0.509	0.230	0.992	0.035	0.106	0.030	0.100	
VERANO										
promedio		7.878	1.197	1.681	3.364	0.078	0.247	0.534	0.573	
desv. std.		5.495	0.667	1.112	1.843	0.068	0.153	0.403	0.402	
n										
24-sep	5.990	2.852	0.462	0.789	1.623	0.035	0.172	0.166	0.100	
25-sep	5.440	3.806	0.906	1.126	2.241	0.092	0.210	0.224	0.236	
26-sep	5.430	2.951	0.012	0.825	1.655	0.035	0.116	0.169	0.100	
27-sep	6.380	2.877	0.120	0.661	1.714	0.035	0.093	0.173	0.100	
12-oct	5.430	4.942	0.669	1.566	2.786	0.117	0.397	0.293	0.372	
3-nov	5.990	2.797	0.497	0.784	1.561	0.051	0.098	0.172	0.100	
4-nov	5.280	8.071	0.534	1.529	4.563	0.035	0.258	0.524	0.100	
7-nov	4.920	10.039	1.143	3.492	5.533	0.291	0.245	0.639	0.623	
10-nov	5.720	5.639	0.625	1.384	3.023	0.074	0.118	0.377	0.100	
13-nov	6.870	6.802	0.889	1.341	4.596	0.143		0.484	0.530	
22-nov	5.310	2.742	1.136	2.341	1.523	0.243	0.059	0.162	0.100	
23-nov	5.110	3.414	0.679	1.729	1.905	0.132	0.092	0.215	0.100	
3-dic	6.330	15.260	0.327	1.365	3.128	0.086		0.365	0.342	
12-dic	5.900	2.767	0.699	1.317	1.596	0.104	0.077	0.180	0.100	
20-dic	5.730	5.188	0.634	1.326	1.166	0.137		0.030	0.100	
29-dic	5.010	13.543	2.412	4.243	4.567			0.412	0.511	
OTOÑO										
promedio		5.344	0.622	1.438	2.574	0.105	0.161	0.278	0.207	
Desv. std.		3.532	0.323	0.713	1.349	0.079	0.100	0.167	0.177	
n										
promedio	5.522	6.721	0.932	1.626	2.930	0.093	0.202	0.398	0.368	
desv. std.		4.551	0.615	0.990	1.538	0.070	0.127	0.301	0.320	
n	28	28	28	28	28	27	23	28	28	

## II.2 AÑO 1995

CONCENTRACIÓN IÓNICA EN MUESTRAS DE AGUA DE LLUVIA DE PUERTO MORELOS, QUINTANA ROO, AÑO 1995.										
Mes	pH	Cloruros (ppm)	Nitratos (ppm)	Sulfatos (ppm)	Sodio (ppm)	Amonio (ppm)	Potasio (ppm)	Magnesio (ppm)	Calcio (ppm)	
1-ene	5.150	6.754	0.654	2.342	3.843	0.200	0.205	0.407	0.100	
13-ene	6.450	9.285	0.321	1.822	4.840	0.191	0.232	0.617	0.368	
24-ene	6.720	1.380	1.380	2.789	4.400	0.304		0.558	0.957	
29-ene	7.330	6.222	0.434	1.289	3.322	0.070	0.170	0.438	0.559	
8-mar	7.020	2.185	2.185			0.374				
15-mar	6.450	4.484	0.458	0.804	2.162	0.076	0.569	0.280		
INVIERNO										
prom.		6.690	0.902	1.830	3.720	0.193	0.294	0.460	0.500	
desv. std.		1.980	0.730	0.770	1.040	0.124	0.185	0.130	0.360	
5-abr	6.070	7.977	0.858	1.851	4.274	0.237	0.257	0.540	2.035	
27-abr	5.790	18.785	1.632	3.240	9.989	0.398	0.539	1.300	1.829	
5-jun	6.130	7.475	0.801	1.720	4.218	0.363	0.338	0.525	0.828	
14-jun	6.790	12.209	1.003	2.545	6.856	0.222	0.287	0.668		
15-jun	5.760	3.628	0.279	0.782	2.007	0.092	0.101	0.230	0.344	
18-jun	5.800	4.854	0.991	0.975	2.803	0.100	0.137	0.271	0.281	
19-jun	5.750	3.280	0.488	0.230	1.777	0.095	0.189	0.182	0.208	
22-jun	5.810	8.206	0.607	1.098	3.326	0.122	0.384	0.384	0.437	
PRIMAV.										
prom.		8.310	0.830	1.560	4.370	0.190	0.260	0.540	0.820	
desv. std.		5.130	0.410	0.960	2.690	0.130	0.150	0.390	0.770	
8-jul	6.320	10.701	1.401	2.221	6.000	0.216	0.384	0.708	1.095	
12-jul	6.180	7.833	1.029	1.819	4.418	0.206	0.266	0.531	0.872	
6-ago	6.130	15.128	1.160	2.589	6.430	0.258	0.333	1.008	0.734	
7-ago	5.970	7.033	1.186	1.079	3.843	0.209	0.488	0.464	0.348	
14-sep	6.370	3.883	0.383	3.114	6.284	0.324	0.601	0.801		
18-sep	6.170	3.213	0.483	0.603	1.391	0.035	0.182	0.182	0.658	
VERANO										
prom.		8.780	0.940	1.900	5.090	0.210	0.370	0.620	0.740	
desv. std.		4.440	0.410	0.940	2.410	0.096	0.094	0.290	0.280	
26-sep	6.290	8.411	0.370	1.230	4.809	0.035	0.284	0.628	1.597	
27-sep	5.740	1.890	0.268	0.230	0.947	0.035	0.271	0.065	0.100	
28-sep	5.500	6.345	0.343	1.037	3.892	0.035	0.212	0.419	0.100	
29-sep	5.220	3.804	0.323	0.969	2.171	0.035	0.104	0.274	0.100	
8-oct	5.180	2.838	0.650	0.824	1.528	0.108	0.067	0.205	0.270	
10-oct	6.580	0.269	0.269			0.035				
9-nov	6.292	6.292	0.650	1.593	3.591	0.093	0.199	0.450	0.628	
15-nov	6.490	17.379	2.731	6.616	9.616	0.368	0.492	1.124		
OTOÑO										
prom.		6.720	0.700	0.980	3.780	0.093	0.240	0.450	0.490	
desv. std.		5.220	0.840	0.450	2.910	0.120	0.140	0.350	0.580	
Promedio		7.675	0.633	1.556	4.240	0.167	0.279	0.518	0.646	
desv. std.		4.462	0.802	0.869	2.992	0.122	0.141	0.304	0.598	
n	28	24	28	25	26	28	22	26	22	

*ANEXO III*  
*CRONATOGRAFAS Y CURVAS DE ELUCCION*

## III.1 CROMATOGRAMAS DE ANIONES

ESTANDAR 1. Cloruro: 0.23 ppm

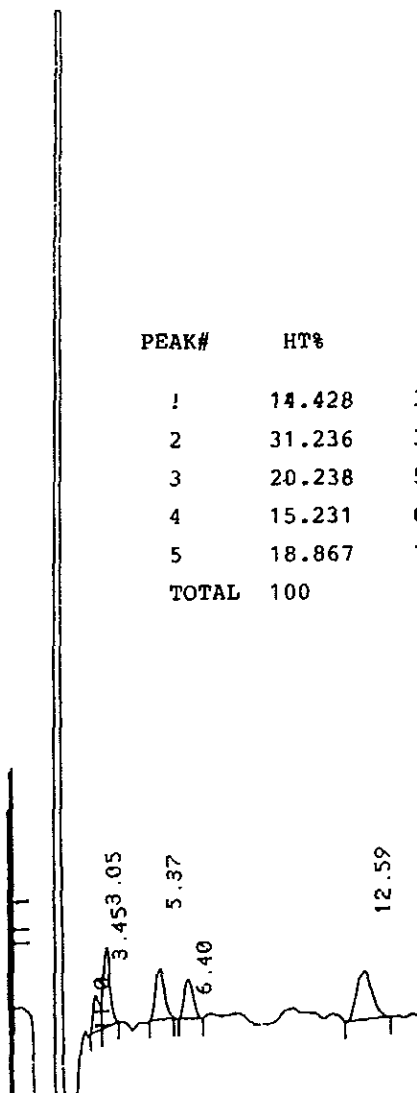
Nitrate y sulfato: 0.40 ppm

Tiempos de retención: cloruro: 3.45 min

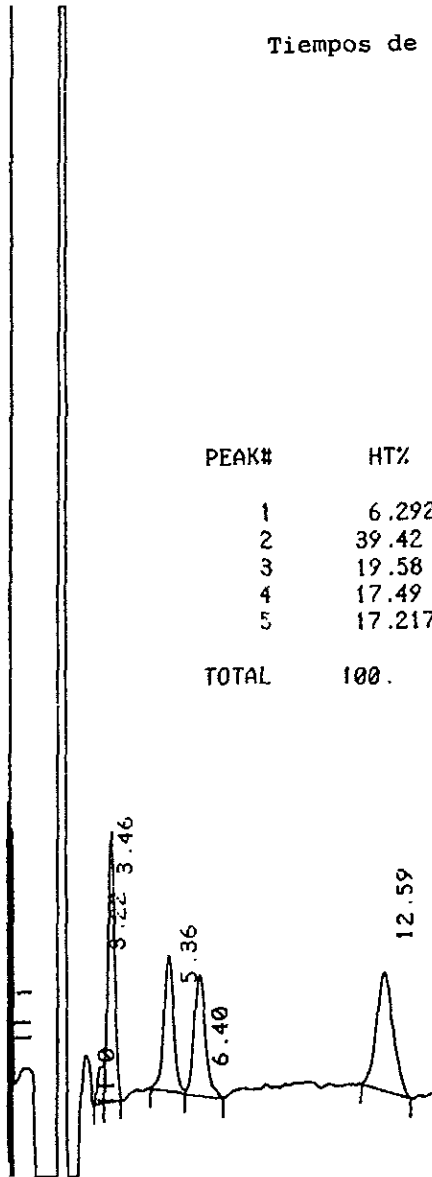
nitrate: 6.40 min

sulfato: 12.59 min

PEAK#	HT%	RT	PK HT BC
1	14.428	3.05	4520 02
2	31.236	3.45	9785 03
3	20.238	5.37	6340 01
4	15.231	6.4	4771 01
5	18.867	12.59	5910 01
TOTAL	100		31327



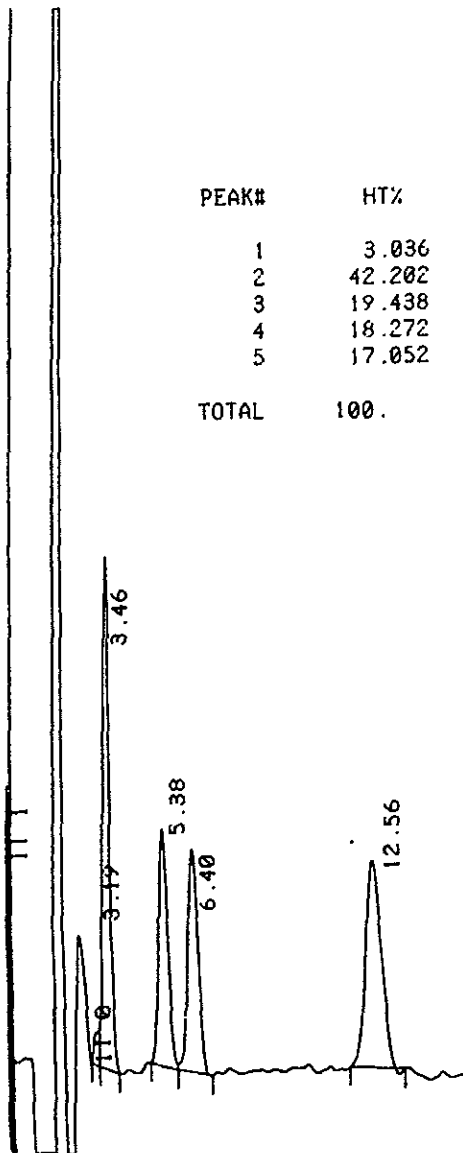
ESTANDAR 2. Cloruro: 0.75 ppm  
 Nitrate y sulfato: 1.00 ppm  
 Tiempos de retención: cloruro: 3.46 min  
 nitrate: 6.40 min  
 sulfato: 12.59 min



PEAK#	HT%	RT	PK HT BC
1	6.292	3.22	4888 02
2	39.42	3.46	30623 03
3	19.58	5.36	15210 02
4	17.49	6.4	13587 03
5	17.217	12.59	13375 01
TOTAL	100.		77683

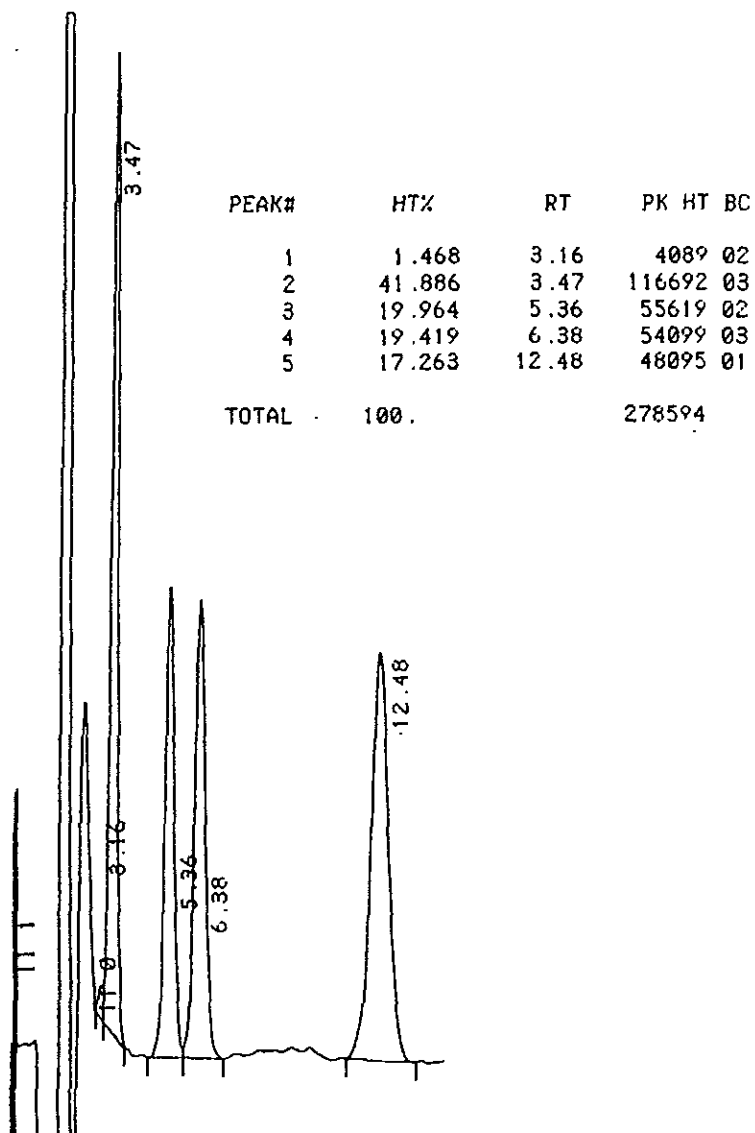
ESTANDAR 3. Cloruro: 1.50 ppm  
Nitrato y sulfato: 2.00 ppm  
Tiempos de retención: cloruro: 3.46 min  
nitrato: 6.40 min  
sulfato: 12.56 min

PEAK#	HT%	RT	PK HT BC
1	3.036	3.19	4308 02
2	42.202	3.46	59888 03
3	19.438	5.38	27584 02
4	18.272	6.4	25930 03
5	17.052	12.56	24198 01
TOTAL	100.		141908





ESTANDAR 4. Cloruro: 3.00 ppm  
Nitrato y sulfato: 4.00 ppm  
Tiempos de retención: cloruro: 3.47 min  
nitrato: 6.38 min  
sulfato: 12.48 min



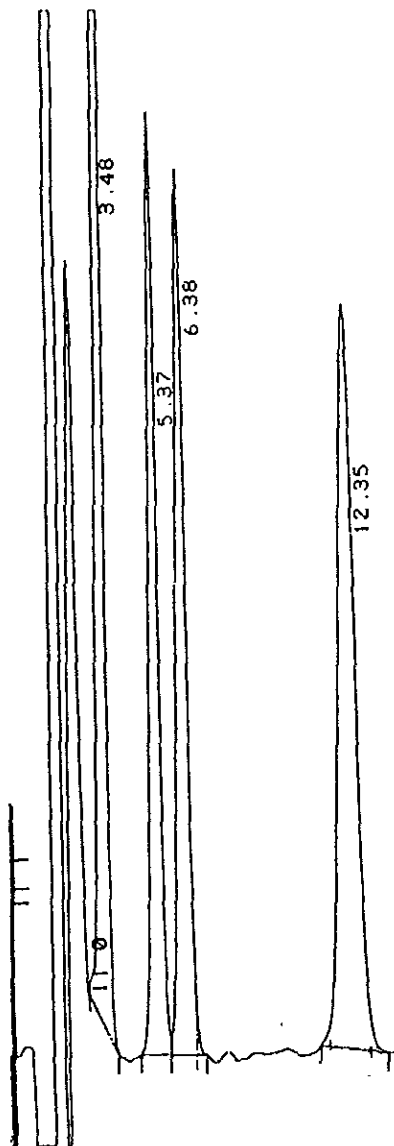
ESTANDAR 5. Cloruro: 6.00 ppm

Nitrato y sulfato: 8.00 ppm

Tiempos de retención: cloruro: 3.48 min

nitrato: 6.38 min

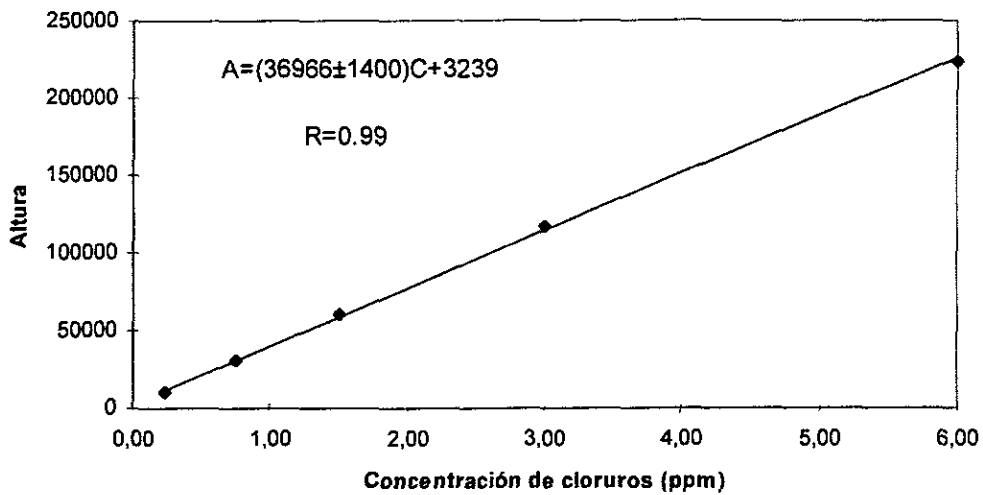
sulfato: 12.35 min



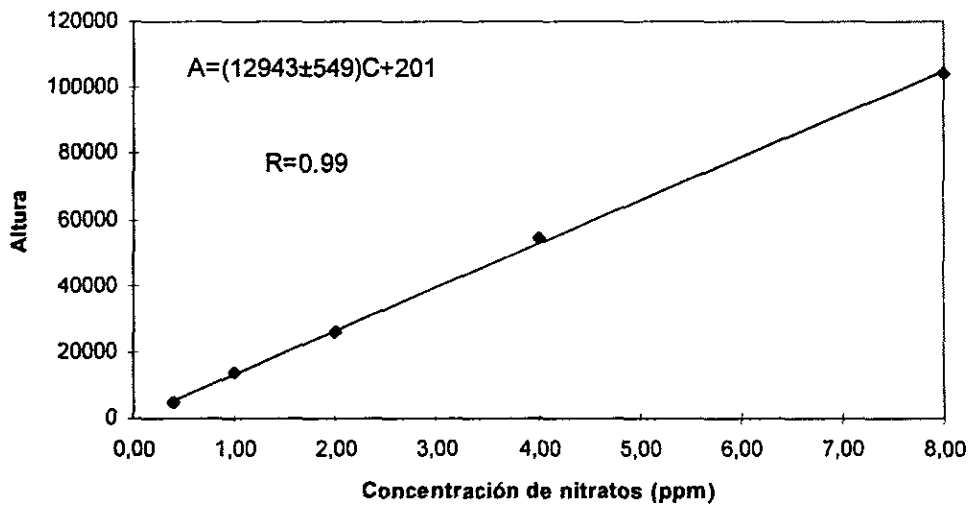
PEAK#	HT%	RT	PK	HT	BC
1	42.45	3.48	223572	01	
2	21.036	5.37	110789	02	
3	19.821	6.38	104391	03	
4	16.693	12.35	87914	01	
TOTAL	100.		526665		

## III.2 CURVAS DE CALIBRACIÓN DE ANIONES

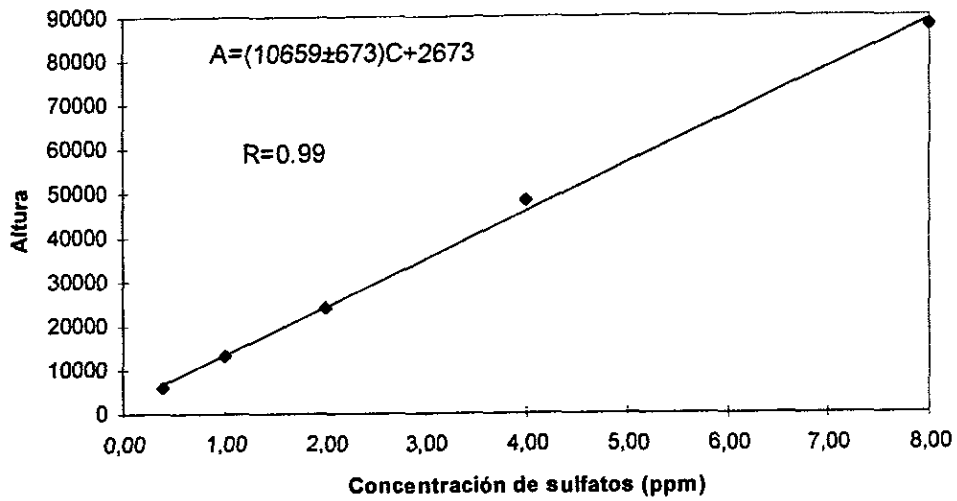
CURVA DE CALIBRACIÓN DE CLORUROS



CURVA DE CALIBRACIÓN DE NITRATOS



## CURVA DE CALIBRACIÓN DE SULFATOS



## III.3 CROMATOGRAMAS DE CATIONES

ESTANDAR 1. Sodio, potasio y magnesio: 0.10 ppm

Amonio y calcio: 0.50 ppm

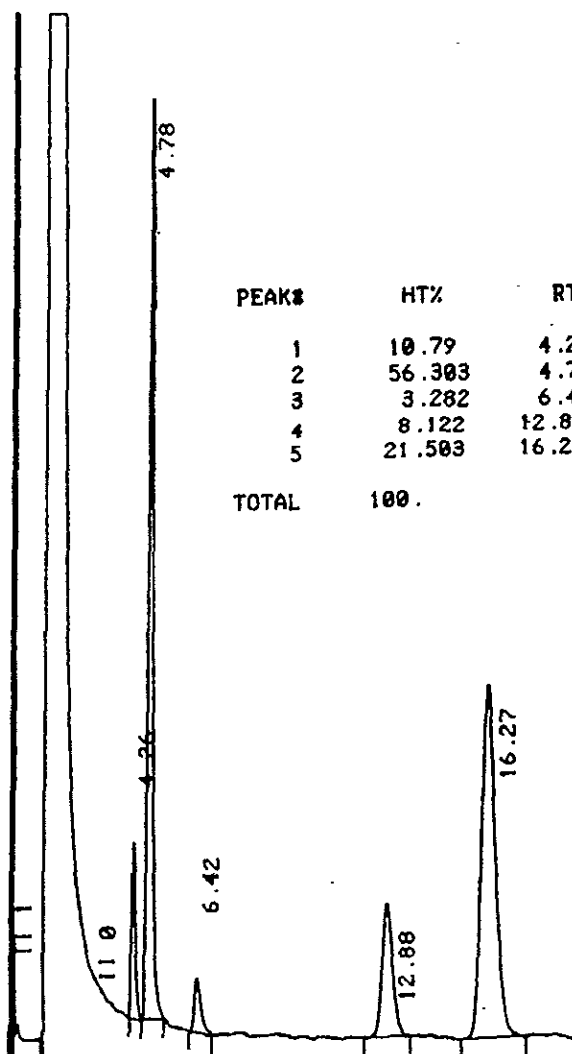
Tiempos de retención: sodio: 4.26 min

amonio: 4.78 min

potasio: 6.42 min

magnesio: 12.88 min

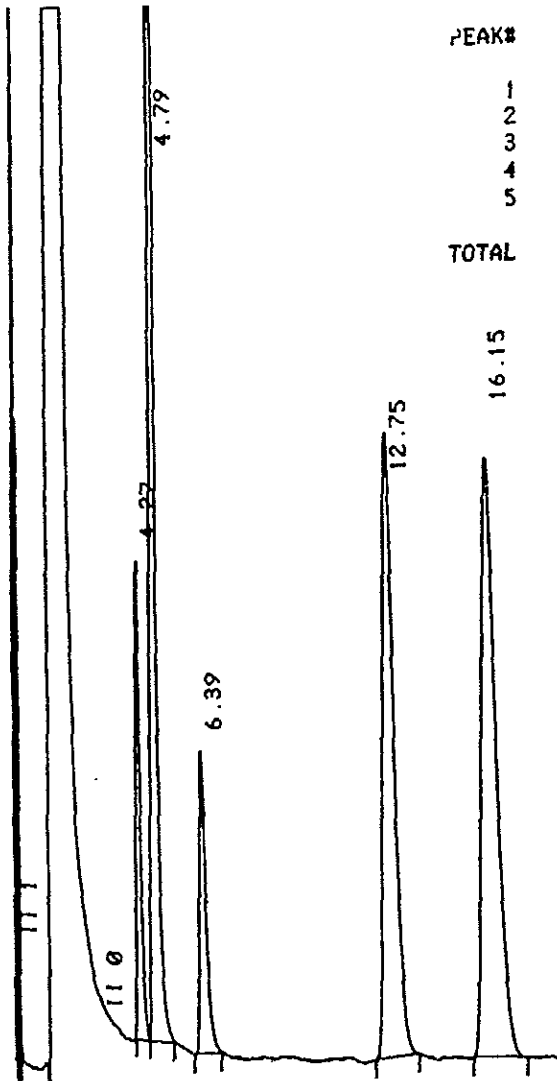
calcio: 16.27 min



PEAK#	HT%	RT	PK HT BC
1	10.79	4.26	84925 02
2	56.303	4.78	443144 03
3	3.282	6.42	25833 01
4	8.122	12.88	63929 01
5	21.503	16.27	169240 01
TOTAL	100.		787072

ESTANDAR 2. Sodio: 0.25 ppm  
 Amonio y calcio: 1.00 ppm  
 Potasio y magnesio: 0.50 ppm

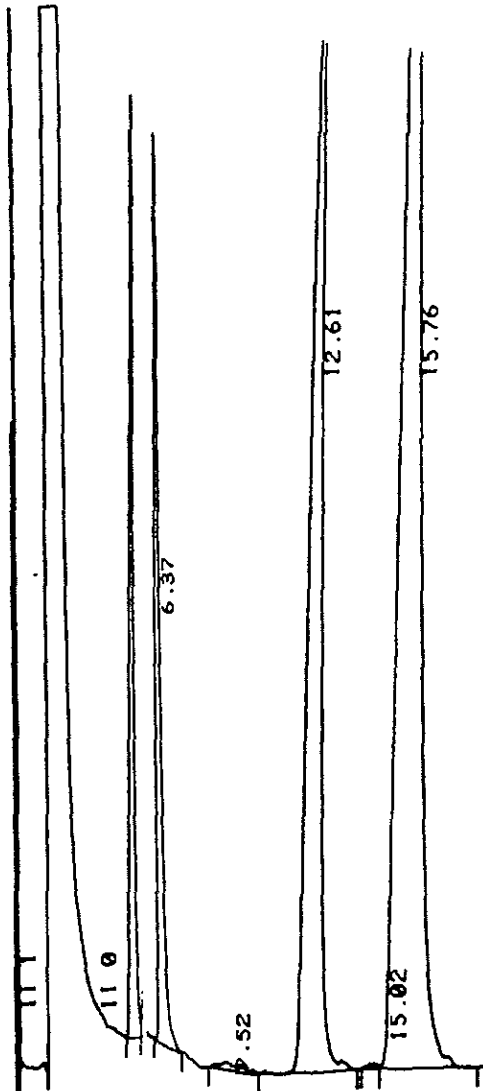
Tiempos de retención:  
 sodio: 4.27 min  
 amonio: 4.79 min  
 potasio: 6.39 min  
 magnesio: 12.75 min  
 calcio: 16.15 min



PEAK#	HT%	RT	PK	HT	BC
1	12.281	4.27	222939	02	
2	48.557	4.79	881424	03	
3	7.793	6.39	141463	01	
4	16.021	12.75	290813	01	
5	15.348	16.15	278605	01	
TOTAL	100.		1815244		

ESTANDAR 3. Sodio: 0.5 ppm  
 Amonio y potasio: 1.5 ppm  
 Magnesio: 1.00 ppm  
 Calcio: 3.00 ppm

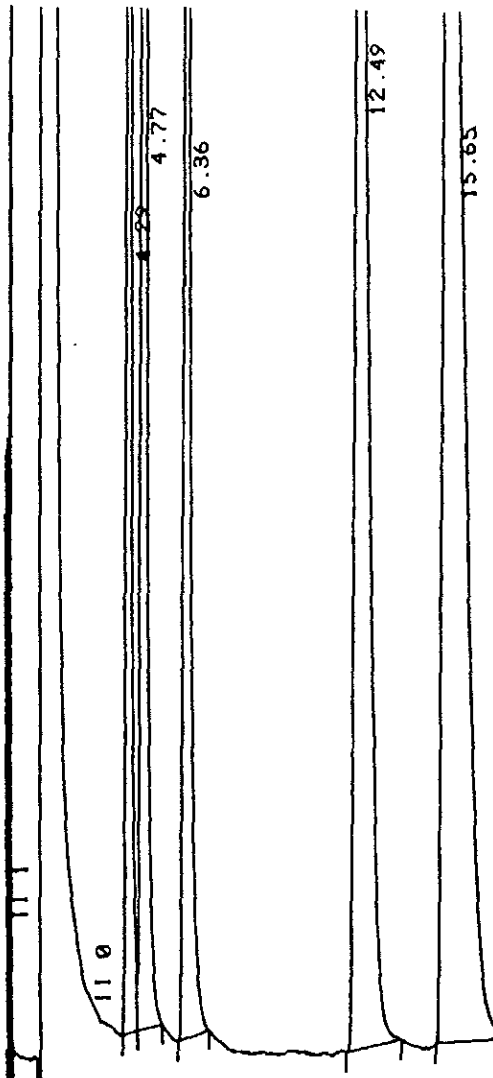
Tiempos de retención:  
 sodio: 4.26 min  
 amonio: 4.78 min  
 potasio: 6.37 min  
 magnesio: 12.61 min  
 calcio: 15.76 min



PEAK#	HT%	RT	PK HT BC
1	13.188	4.26	437921 02
2	38.779	4.78	1287692 03
3	13.076	6.37	434188 01
4	0.113	9.52	3767 02
5	15.701	12.61	521368 03
6	0.056	15.02	1871 02
7	19.087	15.76	633805 03
TOTAL	100.		3320613

ESTANDAR 4. Sodio y magnesio: 1.50 ppm  
 Amonio: 2.00 ppm  
 Potasio: 3.00 ppm  
 Calcio: 4.00 ppm

Tiempos de retención:  
 sodio: 4.29 min  
 amonio: 4.77 min  
 potasio: 6.36 min  
 magnesio: 12.49 min  
 calcio: 15.65 min



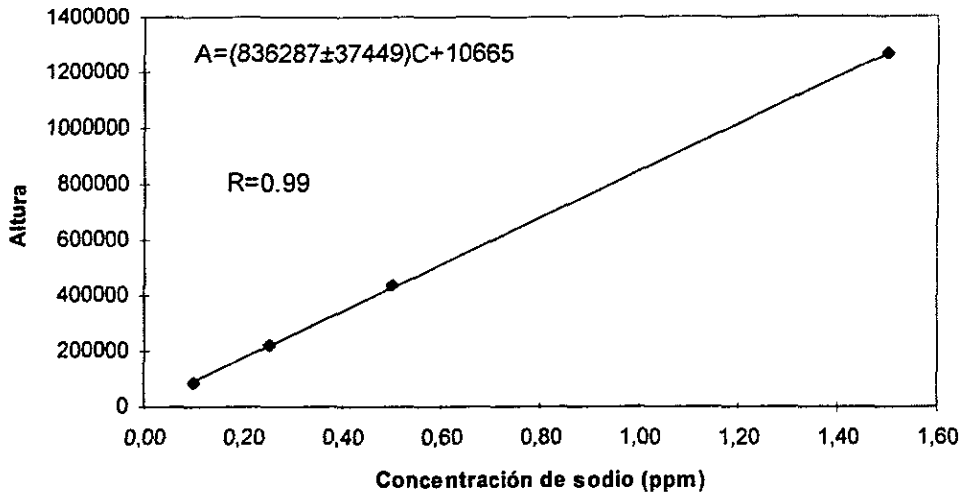
PEAK#	HT%	RT	PK HT BC
1	25.628	4.29	1262149 02
2	26.127	4.77	1286744 03
3	17.981	6.36	885557 01
4	14.597	12.49	718913 01
5	15.667	15.65	771587 01
TOTAL	100.		4924951



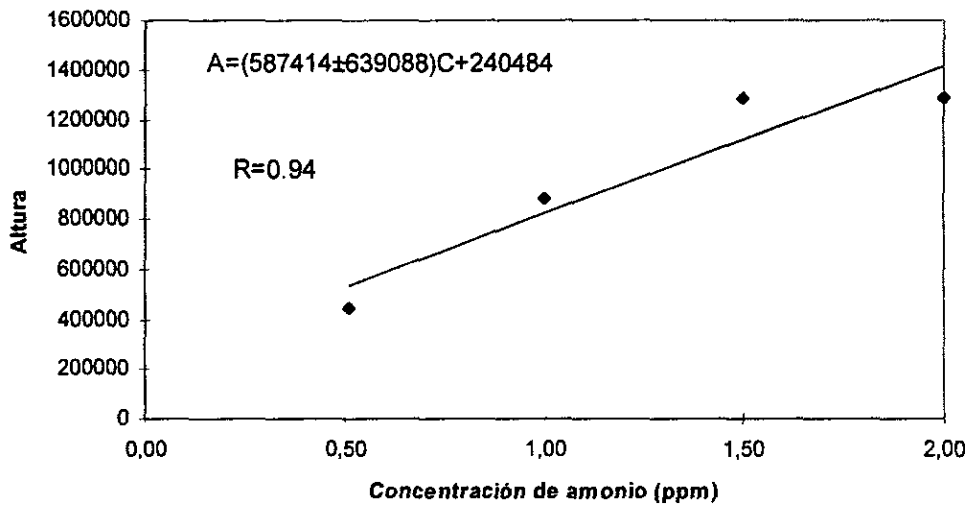
## III.4 CURVAS DE CALIBRACIÓN DE CATIONES

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

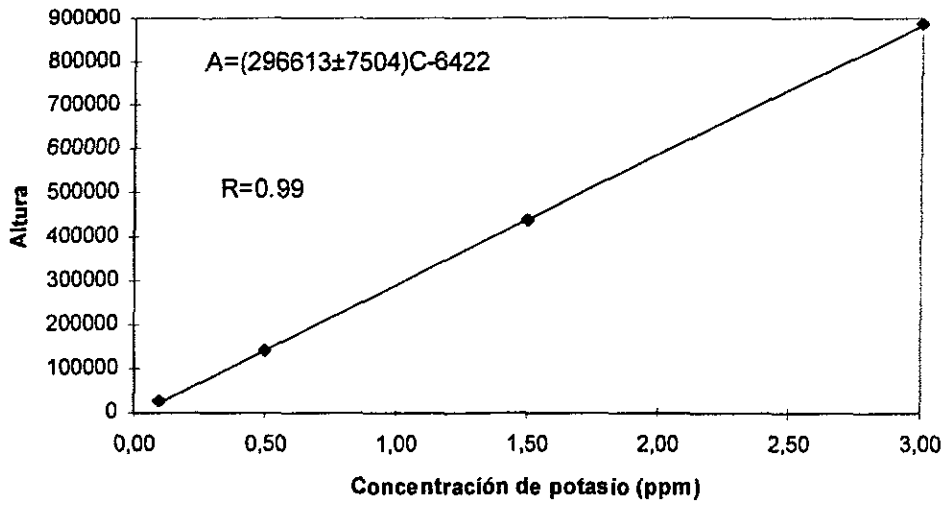
CURVA DE CALIBRACIÓN DE SODIO



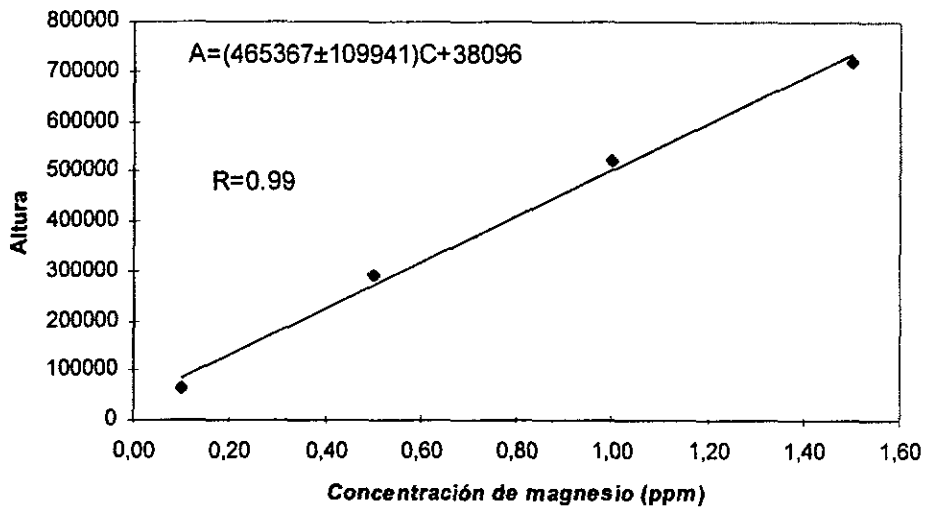
CURVA DE CALIBRACIÓN DE AMONIO



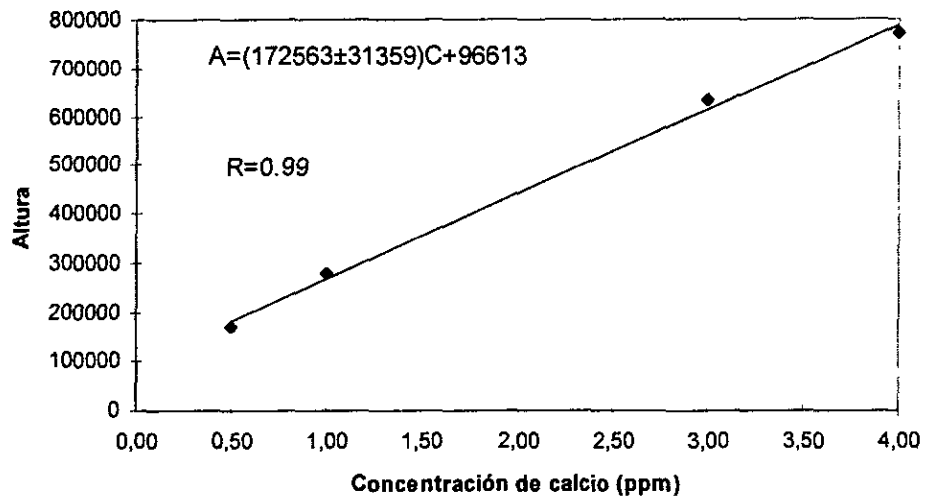
## CURVA DE CALIBRACIÓN DE POTASIO



## CURVA DE CALIBRACIÓN DE MAGNESIO

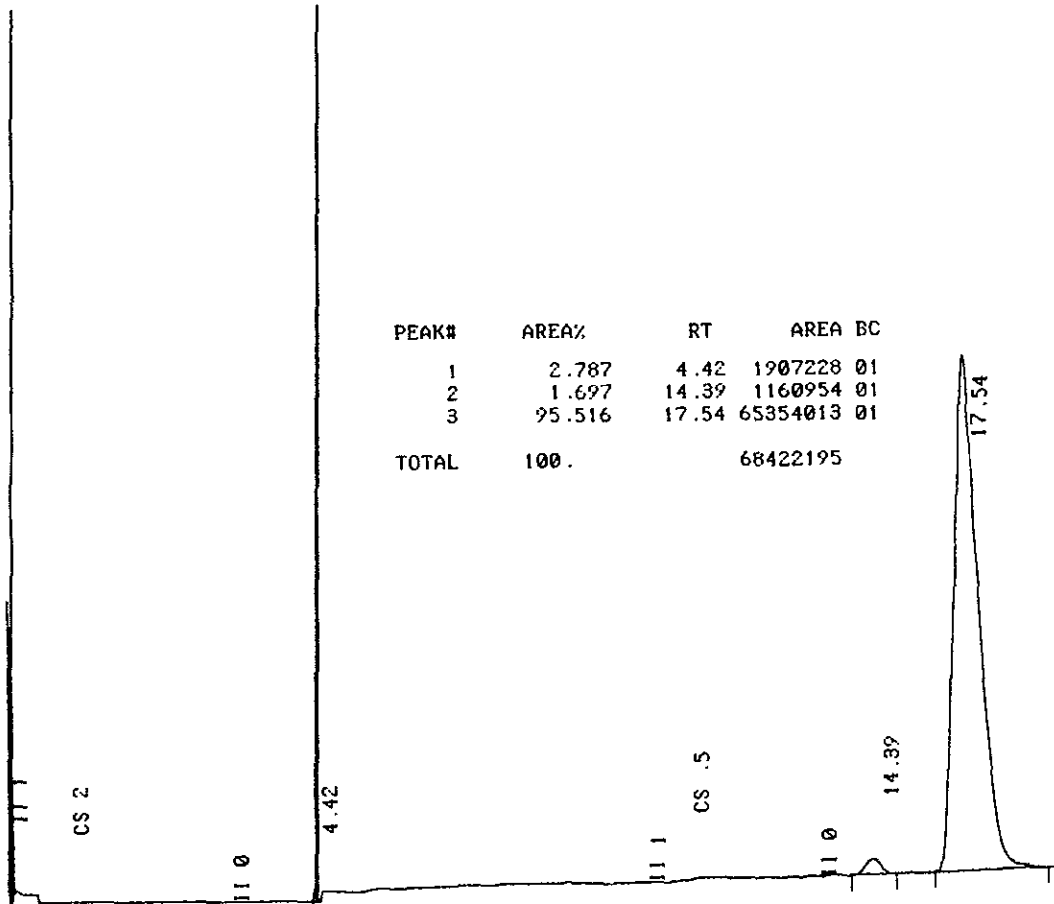


## CURVA DE CALIBRACIÓN DE CALCIO



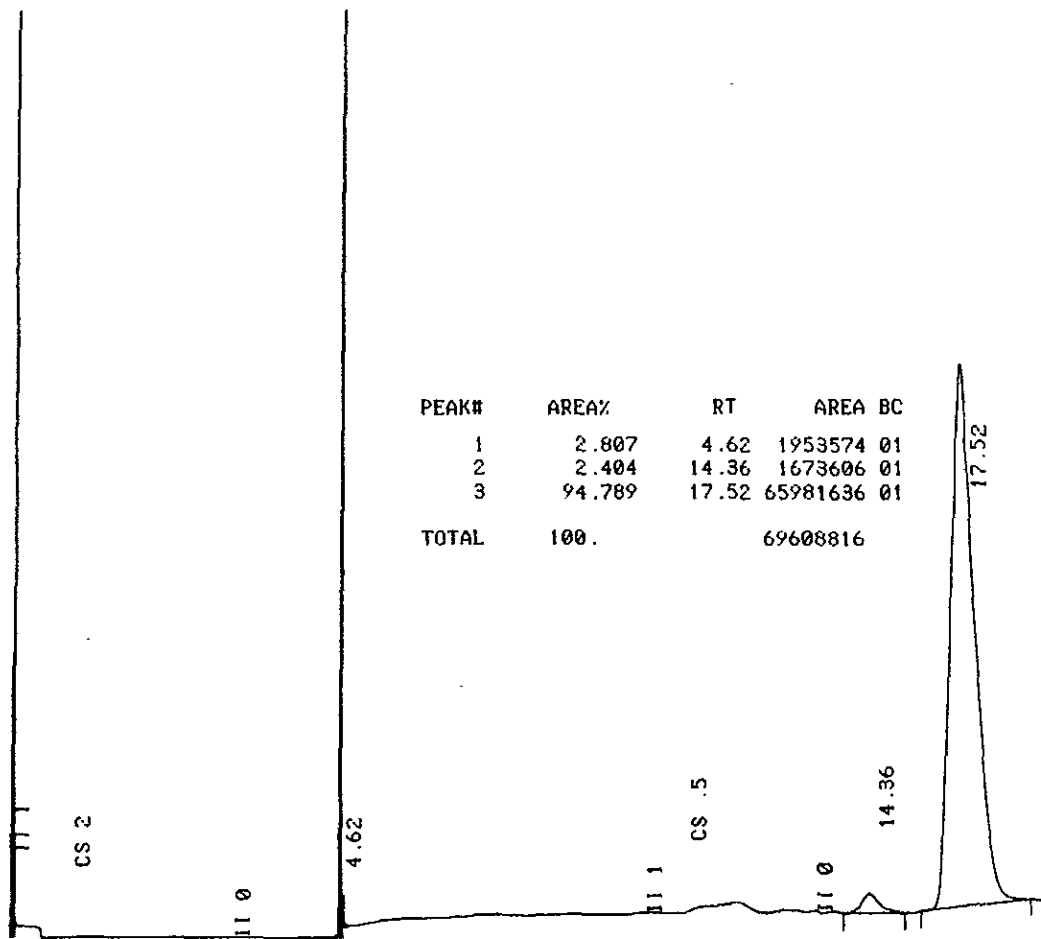
*ANEXO IV*  
*CRONATOGRAMAS DE LA DISOLUCIÓN DE LA ROCA*  
*CALIZA CON ÁCIDO CLORHÍDRICO*

IV.1 MUESTRA No. 1

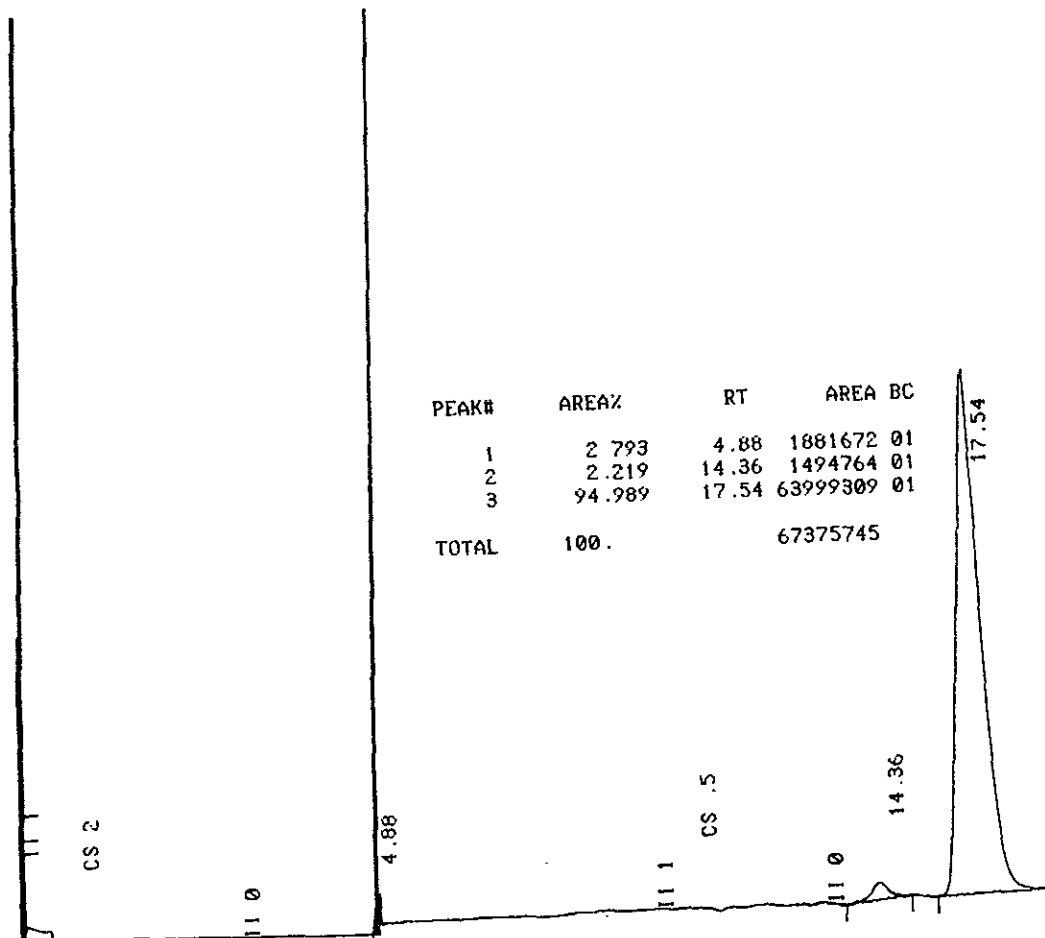


PEAK#	AREA%	RT	AREA BC
1	2.787	4.42	1907228 01
2	1.697	14.39	1160954 01
3	95.516	17.54	65354013 01
TOTAL	100.		68422195

IV.2 MUESTRA No. 2



IV.3 MUESTRA NO. 3



*ANEXO V*  
*BALANCE IÓNICO EN LAS MUESTRAS DE AGUA DE*  
*LLUVIA DE PUERTO MORELOS.*



## V.1 AÑO 1994

		Año: 1994		
Muestra No.	Cloruros, M	Nitratos, M	Sulfatos, M	Suma aniones, M
1	1,214E-04	1,306E-05	1,347E-05	1,345E-04
2	5,477E-04	3,952E-05	4,516E-05	5,872E-04
3	2,863E-04	3,345E-05	3,018E-05	3,198E-04
4	9,130E-05	1,535E-05	1,111E-05	1,067E-04
5	2,264E-04	1,492E-05	1,639E-05	2,414E-04
6	4,504E-04	3,032E-05	2,647E-05	4,808E-04
7	3,177E-04	5,823E-06	1,895E-05	3,236E-04
8	1,059E-04	8,823E-06	6,823E-06	1,147E-04
9	1,945E-04	2,019E-05	1,518E-05	2,147E-04
10	1,969E-04	2,590E-05	1,301E-05	2,228E-04
11	8,109E-05	1,605E-05	1,103E-05	9,714E-05
12	4,668E-05	8,210E-06	2,396E-06	5,489E-05
13	8,044E-05	7,452E-06	8,219E-06	8,790E-05
14	1,074E-04	1,461E-05	1,173E-05	1,220E-04
15	8,324E-05	1,935E-07	8,594E-06	8,343E-05
16	8,115E-05	1,935E-06	6,886E-06	8,308E-05
17	1,394E-04	1,079E-05	1,631E-05	1,502E-04
18	7,889E-05	8,016E-06	8,167E-06	8,691E-05
19	2,277E-04	8,613E-06	1,593E-05	2,363E-04
20	2,832E-04	1,844E-05	3,638E-05	3,016E-04
21	1,591E-04	1,008E-05	1,442E-05	1,691E-04
22	1,919E-04	1,434E-05	1,397E-05	2,062E-04
23	7,734E-05	1,832E-05	2,439E-05	9,566E-05
24	9,630E-05	1,095E-05	1,801E-05	1,072E-04
25	4,310E-04	5,274E-06	1,422E-05	4,363E-04
26	7,805E-05	1,127E-05	1,372E-05	8,932E-05
27	1,463E-04	1,023E-05	1,381E-05	1,566E-04
28	3,820E-04	3,890E-05	4,420E-05	4,209E-04

Año: 1994				
Hidrógeno, M	Sodio, M	Amonio, M	Potasio, M	Magnesio, M
9,772E-07	1,092E-04	5,667E-06	4,885E-06	1,193E-05
6,310E-07	5,157E-04	1,944E-06	1,432E-05	5,633E-05
1,096E-06	2,563E-04	6,000E-06	7,392E-06	3,267E-05
3,631E-06	8,169E-05	3,722E-06	2,097E-06	9,957E-06
7,413E-06	2,068E-04	5,278E-06	6,522E-06	2,086E-05
1,698E-06	4,143E-04	1,506E-05	1,217E-05	4,407E-05
2,754E-06	2,767E-04	1,944E-06	7,596E-06	3,444E-05
3,548E-06	9,269E-05	1,944E-06	4,527E-06	1,070E-05
3,631E-06	1,658E-04	1,944E-06	4,374E-06	1,884E-05
4,898E-06	1,586E-04	1,944E-06	2,455E-05	1,625E-05
2,512E-05	7,242E-05	4,667E-06	2,865E-06	6,254E-06
1,202E-05	4,315E-05	1,944E-06	2,711E-06	1,234E-06
2,630E-06	7,060E-05	1,944E-06	4,399E-06	6,830E-06
3,631E-06	9,748E-05	4,556E-06	5,371E-06	9,216E-06
3,715E-06	7,199E-05	1,944E-06	2,967E-06	6,953E-06
4,169E-06	7,455E-05	1,944E-06	2,379E-06	7,118E-06
3,715E-06	1,212E-04	6,500E-06	1,015E-05	1,206E-05
4,074E-06	6,790E-05	2,833E-06	2,507E-06	7,077E-06
5,248E-06	1,985E-04	1,944E-06	6,599E-06	2,156E-05
1,202E-05	2,407E-04	1,617E-05	6,266E-06	2,629E-05
1,905E-06	1,315E-04	4,111E-06	3,018E-06	1,551E-05
1,349E-07	1,999E-04	7,945E-06	2,829E-05	1,991E-05
4,898E-06	6,625E-05	1,350E-05	1,509E-06	6,665E-06
7,762E-06	8,286E-05	7,333E-06	2,353E-06	8,846E-06
4,677E-07	1,361E-04	4,778E-06	2,569E-04	1,502E-05
1,259E-06	6,942E-05	5,778E-06	1,969E-06	7,406E-06
1,862E-06	5,072E-05	7,611E-06	9,008E-05	1,234E-06
9,772E-06	1,987E-04	2,844E-05	2,191E-04	1,695E-05

Año: 1994		
Calcio, M	Suma cationes, M	Cociente
3,111E-05	1,207E-04	0,898
8,126E-05	5,326E-04	0,907
5,412E-05	2,708E-04	0,847
1,178E-05	9,114E-05	0,854
1,322E-05	2,260E-04	0,936
3,006E-05	4,432E-04	0,922
1,789E-05	2,890E-04	0,893
6,188E-06	1,027E-04	0,895
1,572E-05	1,758E-04	0,819
1,193E-05	1,900E-04	0,853
2,495E-06	1,051E-04	1,082
2,495E-06	5,982E-05	1,090
2,495E-06	7,957E-05	0,905
5,888E-06	1,110E-04	0,910
2,495E-06	8,061E-05	0,966
2,495E-06	8,305E-05	1,000
9,281E-06	1,416E-04	0,943
2,495E-06	7,731E-05	0,890
2,495E-06	2,123E-04	0,898
1,554E-05	2,751E-04	0,912
2,495E-06	1,405E-04	0,831
1,322E-05	2,363E-04	1,146
2,495E-06	8,615E-05	0,901
2,495E-06	1,003E-04	0,935
8,533E-06	3,982E-04	0,913
2,495E-06	7,843E-05	0,878
2,495E-06	1,503E-04	0,960
1,275E-05	4,560E-04	1,083

## V.2 AÑO 1995

Año: 1995				
Muestra No.	Cloruros, M	Nitratos, M	Sulfatos, M	Suma aniones, M
1	1,905E-04	1,055E-05	2,440E-05	2,498E-04
2	2,619E-04	5,177E-06	1,898E-05	3,050E-04
3	6,019E-04	2,226E-05	2,916E-05	6,825E-04
4	1,755E-04	7,000E-06	1,343E-05	2,094E-04
5	1,653E-03	3,492E-05	1,030E-04	1,894E-03
6	1,268E-04	7,387E-06	9,417E-06	1,530E-04
7	2,250E-04	1,381E-05	1,928E-05	2,774E-04
8	5,298E-04	2,632E-05	3,375E-05	6,237E-04
9	2,108E-04	1,292E-05	1,792E-05	2,596E-04
10	3,444E-04	1,618E-05	2,651E-05	4,136E-04
11	1,023E-04	4,500E-06	6,146E-06	1,231E-04
12	1,397E-04	1,598E-05	1,016E-05	1,760E-04
13	9,195E-05	7,871E-06	2,396E-06	1,046E-04
14	2,315E-04	9,790E-06	1,144E-05	2,641E-04
15	3,018E-04	2,260E-05	2,314E-05	3,707E-04
16	2,209E-04	1,680E-05	1,895E-05	2,754E-04
17	4,267E-04	1,871E-05	2,697E-05	4,993E-04
18	1,984E-04	1,913E-05	1,124E-05	2,400E-04
19	5,810E-04	6,177E-06	3,244E-05	6,520E-04
20	9,063E-05	7,790E-06	6,281E-06	1,110E-04
21	2,372E-04	5,968E-06	1,281E-05	2,688E-04
22	5,303E-05	4,290E-06	2,396E-06	6,211E-05
23	1,790E-04	5,532E-06	1,080E-05	2,061E-04
24	1,101E-04	5,210E-06	1,009E-05	1,355E-04
25	8,005E-05	1,048E-05	8,584E-06	1,077E-04
26	2,583E-03	4,339E-06	1,425E-04	2,872E-03
27	1,775E-04	1,048E-05	1,659E-05	2,211E-04
28	4,902E-04	4,405E-05	5,282E-05	6,399E-04

Año: 1995				
Hidrógeno, M	Sodio, M	Amonio, M	Potasio, M	Magnesio, M
7,079E-06	1,672E-04	1,111E-05	5,243E-06	1,675E-05
3,548E-07	2,105E-04	7,278E-06	5,934E-06	2,539E-05
1,905E-07	1,918E-04	1,689E-05	3,489E-04	2,288E-05
4,677E-08	1,445E-04	3,889E-06	4,348E-06	1,802E-05
9,550E-08	1,304E-03	2,078E-05	3,811E-05	1,644E-04
3,548E-07	9,404E-05	4,222E-06	1,455E-05	1,152E-05
8,511E-07	1,859E-04	1,317E-05	6,573E-06	2,222E-05
1,622E-06	4,214E-04	1,989E-05	1,379E-05	5,349E-05
7,413E-07	1,835E-04	2,128E-05	8,645E-06	2,160E-05
1,622E-07	2,982E-04	1,233E-05	7,341E-06	3,571E-05
1,738E-06	8,730E-05	3,444E-06	2,583E-06	9,463E-06
1,585E-06	1,219E-04	5,556E-06	3,504E-06	1,115E-05
1,778E-06	7,729E-05	1,944E-06	4,834E-06	7,900E-06
1,549E-06	1,447E-04	6,778E-06	6,384E-05	1,621E-05
4,786E-07	2,610E-04	1,200E-05	9,822E-06	2,913E-05
6,607E-07	1,922E-04	1,144E-05	6,803E-06	2,185E-05
7,413E-07	3,667E-04	1,433E-05	8,517E-06	4,147E-05
1,072E-06	1,672E-04	1,181E-05	1,248E-05	1,909E-05
4,266E-07	2,733E-04	1,800E-05	2,710E-04	3,296E-05
6,761E-07	6,050E-05	1,944E-06	3,031E-05	7,488E-06
5,129E-07	2,092E-04	1,944E-06	7,264E-06	2,584E-05
1,820E-06	4,119E-05	1,944E-06	6,931E-06	2,674E-06
3,162E-06	1,602E-04	1,944E-06	5,422E-06	1,724E-05
6,026E-06	9,443E-05	1,944E-06	2,660E-06	1,127E-05
6,607E-06	6,646E-05	6,000E-06	2,225E-06	8,435E-06
2,630E-07	2,153E-03	1,944E-06	4,404E-05	2,672E-04
9,550E-07	1,562E-04	5,167E-06	5,090E-06	1,851E-05
3,236E-07	4,184E-04	2,044E-05	1,258E-05	4,625E-05

Año: 1995		
Calcio, M	Suma cationes, M	Cociente
2,495E-06	2,291E-04	0,917
9,182E-06	2,932E-04	0,961
2,388E-05	6,513E-04	0,954
1,395E-05	2,167E-04	1,035
3,264E-04	2,345E-03	1,238
6,981E-05	2,758E-04	—
5,077E-05	3,525E-04	1,271
4,563E-05	6,550E-04	1,050
1,562E-05	2,886E-04	1,112
7,330E-05	5,361E-04	1,296
8,583E-06	1,312E-04	1,065
7,011E-06	1,689E-04	0,959
5,190E-06	1,120E-04	1,071
1,090E-05	2,711E-04	1,026
2,732E-05	3,962E-04	1,069
2,176E-05	2,983E-04	1,083
1,831E-05	5,098E-04	1,021
8,683E-06	2,479E-04	1,033
6,634E-05	7,613E-04	1,168
1,642E-05	1,412E-04	1,273
3,910E-05	3,488E-04	1,297
2,495E-06	6,223E-05	1,002
2,495E-06	2,102E-04	1,020
2,495E-06	1,326E-04	0,978
6,737E-06	1,116E-04	1,037
9,548E-05	2,925E-03	1,018
1,567E-05	2,358E-04	1,066
8,476E-05	7,137E-04	1,115

*ANEXO VI*  
*CONDUCTIVIDADES TEÓRICA Y EXPERIMENTAL EN LAS*  
*MUESTRAS DE AGUA DE LLOVIA DE PUERTO MORELOS*

## VI.1 AÑO 1994

Muestra No.	Conductividad teórica, $\mu\text{S}$	Conductividad experimental, $\mu\text{S}$
1	20,02	23,21
2	83,23	89,45
3	45,50	50,37
4	14,73	16,79
5	32,84	35,14
6	65,66	66,62
7	43,71	46,91
8	15,34	16,11
9	28,26	30,74
10	29,43	31,92
11	12,91	16,93
12	7,07	9,29
13	11,86	13,29
14	16,66	19,15
15	11,56	13,44
16	11,48	13,58
17	21,24	23,50
18	11,58	13,15
19	31,18	33,87
20	41,93	48,75
21	22,13	23,95
22	31,36	33,94
23	14,10	24,06
24	15,08	24,06
25	61,85	57,49
26	12,47	17,13
27	22,97	25,18
28	65,37	72,78



## VI.2 AÑO 1995

Muestra No.	Conductividad teórica, $\mu\text{S}$	Conductividad experimental, $\mu\text{S}$
1	27,90	25,41
2	35,35	34,04
3	89,10	81,22
4	24,64	28,97
5	235,05	249,04
6	21,84	34,76
7	34,72	37,41
8	74,28	75,22
9	31,96	33,97
10	52,28	60,21
11	14,64	17,19
12	20,43	22,23
13	12,89	14,51
14	33,28	35,30
15	44,42	46,52
16	33,04	35,10
17	59,50	60,00
18	29,13	29,85
19	88,13	95,66
20	14,77	16,15
21	34,47	36,68
22	7,56	8,93
23	24,59	25,92
24	15,43	17,76
25	12,35	13,95
26	340,52	341,61
27	26,16	28,59
28	75,78	81,52

ANEXO VII  
COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL INFLUENTE Y DEL  
EFLUENTE EN LA CIA

## VII.1 pH, CONDUCTIVIDAD EXPERIMENTAL Y VOLUMEN

LOTE No. 1			
MUESTRA No.	pH en el efluente	Conductividad ( $\mu\text{S}$ )	Volumen efluente (mL)
1	4.75	74.68	2650
2	7.13	89.50	2440
3	7.15	77.12	2660
4	7.14	79.94	2630
5	7.12	80.33	2670

LOTE No. 2			
MUESTRA No.	pH en el efluente	Conductividad ( $\mu\text{S}$ )	Volumen efluente (mL)
1	4.72	74.59	3500
2	7.63	94.49	2097
3	7.42	80.01	2455
4	7.37	80.50	2513
5	7.43	83.85	3135

LOTE No. 3			
MUESTRA No.	pH en el efluente	Conductividad ( $\mu$ S)	Volumen efluente (mL)
1	4.67	76.24	2970
2	7.86	95.86	1300
3	7.51	83.37	2150
4	7.37	81.91	2610
5	7.46	84.83	3160

LOTE No. 4			
MUESTRA No.	pH en el efluente	Conductividad ( $\mu$ S)	Volumen efluente (mL)
1	4.86	75.37	2085
2	7.38	83.87	2365
3	7.44	82.11	2195
4	7.38	78.89	2340
5	7.37	76.64	2975

LOTE No. 5			
MUESTRA No.	pH en el efluente	Conductividad ( $\mu$ S)	Volumen efluente (mL)
1	4.57	75.74	3600
2	7.05	87.48	3315
3	7.15	86.41	3200
4	7.08	85.25	2660
5	7.02	83.21	2850

LOTE No. 6			
MUESTRA No.	pH en el efluente	Conductividad ( $\mu$ S)	Volumen efluente (mL)
1	4.60	76.67	3570
2	7.17	84.98	3004
3	7.10	81.06	3020
4	7.13	84.02	2800
5	7.15	82.30	2840

LOTE No. 7			
MUESTRA No.	pH en el efluente	Conductividad ( $\mu\text{S}$ )	Volumen efluente (mL)
1	4.71	74.67	3680
2	7.27	80.99	3555
3	7.20	76.58	3220
4	7.29	79.94	2745
5	7.35	79.36	3005

LOTE No. 8			
MUESTRA No.	pH en el efluente	Conductividad ( $\mu\text{S}$ )	Volumen efluente (mL)
1	4.32	75.82	3565
2	6.99	84.66	3000
3	6.87	78.99	3295
4	6.86	81.88	2790
5	6.96	80.05	2970

LOTE No. 9			
MUESTRA No.	pH en el efluente	Conductividad ( $\mu$ S)	Volumen efluente (mL)
1	4.33	76.57	3505
2	7.19	84.85	3270
3	7.15	83.42	3240
4	6.95	80.28	3000
5	7.07	79.52	3125

LOTE No. 10			
MUESTRA No.	pH en el efluente	Conductividad ( $\mu$ S)	Volumen efluente (mL)
1	4.35	77.01	3290
2	6.99	82.74	3415
3	6.88	84.10	3230
4	6.93	82.06	3035
5	6.91	80.21	3185

LOTE No. 11			
MUESTRA No.	pH en el efluente	Conductividad ( $\mu$ S)	Volumen efluente (mL)
1	4.49	78.80	3850
2	6.77	87.20	3170
3	6.70	82.90	3390
4	6.80	85.40	2780
5	6.69	80.30	3190

LOTE No. 12			
MUESTRA No.	pH en el efluente	Conductividad ( $\mu$ S)	Volumen efluente (mL)
1	4.38	77.21	2990
2	6.95	83.84	3040
3	6.84	82.33	3040
4	6.93	81.83	2855
5	6.68	80.23	2900



LOTE No. 13			
MUESTRA No.	pH en el efluente	Conductividad ( $\mu$ S)	Volumen efluente (mL)
1	4.37	78.41	3490
2	6.77	83.02	3340
3	6.88	81.82	3150
4	6.95	81.92	3200
5	6.78	79.41	3260

LOTE No. 14			
MUESTRA No.	pH en el efluente	Conductividad ( $\mu$ S)	Volumen efluente (mL)
1	4.37	74.93	3820
2	6.89	82.91	3730
3	6.84	84.39	3340
4	6.79	83.14	3200
5	6.69	80.51	3170

LOTE No. 15			
MUESTRA No.	pH en el efluente	Conductividad ( $\mu$ S)	Volumen efluente (mL)
1	4.43	77.45	4018
2	6.82	79.85	3513
3	6.94	82.71	3413
4	6.71	80.99	3263
5	6.71	77.79	3203

CONCENTRACIONES MOLARES DE LOS CATIONES							
MUESTRA No.	Comentarios	Sodio, M	Amonio, M	Hidrógeno, M	Potasio, M	Magnesio, M	Calcio, M
1-1	Blanco	3,158E-04	2,138E-05	1,778E-05	1,371E-05	4,580E-05	4,198E-05
2-1		3,677E-04	1,904E-05	7,413E-08	1,527E-05	5,480E-05	1,356E-04
3-1		3,288E-04	2,006E-05	7,080E-08	1,436E-05	5,047E-05	1,005E-04
4-1		3,421E-04	1,976E-05	7,244E-08	1,535E-05	5,458E-05	1,066E-04
5-1		3,346E-04	1,893E-05	7,586E-08	1,521E-05	5,378E-05	1,149E-04
1-2	Blanco	3,163E-04	2,082E-05	1,905E-05	1,400E-05	4,700E-05	4,374E-05
2-2		3,795E-04	1,723E-05	2,344E-08	1,581E-05	5,833E-05	1,487E-04
3-2		3,324E-04	1,769E-05	3,802E-08	1,442E-05	5,138E-05	1,163E-04
4-2		3,421E-04	1,903E-05	4,266E-08	1,455E-05	5,212E-05	1,130E-04
5-2		3,453E-04	1,864E-05	3,715E-08	1,516E-05	5,320E-05	1,237E-04
1-3	Blanco	3,162E-04	1,917E-05	2,138E-05	1,397E-05	4,598E-05	4,170E-05
2-3		3,619E-04	1,391E-05	1,380E-08	1,508E-05	5,648E-05	1,837E-04
3-3		3,344E-04	1,702E-05	3,090E-08	1,467E-05	5,179E-05	1,414E-04
4-3		3,347E-04	1,863E-05	4,286E-08	1,483E-05	5,209E-05	1,288E-04
5-3		3,463E-04	1,836E-05	3,467E-08	1,554E-05	5,400E-05	1,337E-04
1-4	Blanco	3,179E-04	1,977E-05	1,380E-05	1,527E-05	4,681E-05	4,234E-05
2-4		3,311E-04	1,763E-05	4,169E-08	1,445E-05	5,159E-05	1,371E-04
3-4		3,290E-04	1,620E-05	3,631E-08	1,483E-05	5,131E-05	1,361E-04
4-4		3,279E-04	1,899E-05	4,169E-08	1,526E-05	5,130E-05	1,200E-04
5-4		3,322E-04	1,857E-05	4,268E-08	1,517E-05	5,132E-05	1,141E-04
1-5	Blanco	3,2950E-04	2,066E-05	2,692E-05	1,437E-05	4,863E-05	4,511E-05
2-5		3,4280E-04	1,755E-05	8,913E-08	1,481E-05	5,323E-05	1,532E-04
3-5		3,4520E-04	1,750E-05	7,079E-08	1,445E-05	5,418E-05	1,508E-04
4-5		3,4720E-04	1,605E-05	8,318E-08	1,455E-05	5,402E-05	1,446E-04
5-5		3,4740E-04	1,800E-05	9,550E-08	1,496E-05	5,397E-05	1,332E-04
1-6	Blanco	3,3120E-04	1,986E-05	2,512E-05	1,440E-05	4,838E-05	4,371E-05
2-6		3,4080E-04	1,844E-05	6,781E-08	1,437E-05	5,434E-05	1,493E-04
3-6		3,3690E-04	1,744E-05	7,943E-08	1,468E-05	5,332E-05	1,229E-04
4-6		3,3850E-04	1,522E-05	7,413E-08	1,417E-05	5,299E-05	1,390E-04
5-6		3,3980E-04	1,705E-05	7,079E-08	1,489E-05	5,410E-05	1,259E-04
1-7	Blanco	3,263E-04	1,977E-05	1,950E-05	1,401E-05	4,821E-05	4,306E-05
2-7		3,317E-04	1,783E-05	5,370E-08	1,414E-05	5,138E-05	1,332E-04
3-7		3,302E-04	1,839E-05	6,310E-08	1,435E-05	5,114E-05	1,116E-04
4-7		3,339E-04	1,472E-05	5,129E-08	1,425E-05	5,159E-05	1,320E-04
5-7		3,334E-04	1,711E-05	4,667E-08	1,455E-05	5,109E-05	1,257E-04
1-8	Blanco	3,265E-04	1,633E-05	4,786E-05	1,503E-05	4,506E-05	3,065E-05
2-8		3,385E-04	1,631E-05	1,023E-07	1,517E-05	5,110E-05	1,475E-04
3-8		3,371E-04	1,487E-05	1,349E-07	1,507E-05	4,893E-05	1,150E-04
4-8		3,480E-04	1,116E-05	1,380E-07	1,531E-05	5,313E-05	1,330E-04
5-8		3,424E-04	1,265E-05	1,096E-07	1,544E-05	4,943E-05	1,212E-04

MUESTRA No.	Comentarios	Sodio, M	Amonio, M	Hidrógeno, M	Potasio, M	Magnesio, M	Calcio, M
1-9	Blanco	3,250E-04	1,957E-05	4,677E-05	1,500E-05	4,318E-05	3,129E-05
2-9		3,331E-04	1,753E-05	6,457E-08	1,477E-05	4,861E-05	1,443E-04
3-9		3,348E-04	1,413E-05	7,079E-08	1,533E-05	5,004E-05	1,952E-04
4-9		3,391E-04	1,179E-05	1,122E-07	1,508E-05	5,002E-05	1,349E-04
5-9		3,386E-04	1,452E-05	8,511E-08	1,526E-05	5,120E-05	1,178E-04
1-10	Blanco	3,251E-04	1,917E-05	4,467E-05	1,454E-05	4,415E-05	3,042E-05
2-10		3,304E-04	1,804E-05	1,023E-07	1,540E-05	4,918E-05	1,312E-04
3-10		3,376E-04	1,571E-05	1,318E-07	1,532E-05	5,044E-05	1,348E-04
4-10		3,400E-04	1,510E-05	1,175E-07	1,529E-05	5,102E-05	1,198E-04
5-10		3,349E-04	1,446E-05	1,230E-07	1,494E-05	4,904E-05	1,095E-04
1-11	Blanco	3,221E-04	1,822E-05	3,236E-05	1,468E-05	4,710E-05	4,289E-05
2-11		3,341E-04	1,505E-05	1,698E-07	1,499E-05	5,282E-05	1,519E-04
3-11		3,339E-04	1,483E-05	1,995E-07	1,553E-05	5,167E-05	1,287E-04
4-11		3,381E-04	1,289E-05	1,585E-07	1,548E-05	5,299E-05	1,381E-04
5-11		3,353E-04	1,433E-05	2,042E-07	1,522E-05	5,208E-05	1,171E-04
1-12	Blanco	3,287E-04	1,750E-05	4,169E-05	1,527E-05	4,698E-05	4,491E-05
2-12		3,397E-04	1,378E-05	1,120E-07	1,507E-05	5,188E-05	1,449E-04
3-12		3,389E-04	1,494E-05	1,440E-07	1,512E-05	5,089E-05	1,332E-04
4-12		3,375E-04	1,483E-05	1,170E-07	1,530E-05	5,179E-05	1,301E-04
5-12		3,398E-04	1,361E-05	2,080E-07	1,571E-05	5,282E-05	1,190E-04
1-13	Blanco	3,274E-04	1,850E-05	4,266E-05	1,419E-05	4,715E-05	4,493E-05
2-13		3,337E-04	1,281E-05	1,690E-07	1,435E-05	5,007E-05	1,405E-04
3-13		3,384E-04	1,439E-05	1,310E-07	1,427E-05	5,044E-05	1,259E-04
4-13		3,349E-04	1,311E-05	1,120E-07	1,396E-05	5,167E-05	1,273E-04
5-13		3,387E-04	1,411E-05	1,650E-07	1,430E-05	5,159E-05	1,155E-04
1-14	Blanco	3,254E-04	1,866E-05	4,266E-05	1,425E-05	4,723E-05	4,585E-05
2-14		3,168E-04	1,381E-05	1,280E-07	1,483E-05	4,916E-05	1,269E-04
3-14		3,347E-04	1,381E-05	1,440E-07	1,476E-05	5,142E-05	1,366E-04
4-14		3,317E-04	1,555E-05	1,620E-07	1,463E-05	5,118E-05	1,227E-04
5-14		3,327E-04	1,472E-05	2,040E-07	1,407E-05	5,151E-05	1,134E-04
1-15	Blanco	3,245E-04	1,378E-05	3,715E-05	1,442E-05	4,690E-05	4,311E-05
2-15		3,308E-04	9,276E-06	1,510E-07	1,678E-05	4,953E-05	1,235E-04
3-15		3,368E-04	1,155E-05	1,140E-07	1,453E-05	5,007E-05	1,258E-04
4-15		3,365E-04	1,089E-05	1,940E-07	1,501E-05	5,077E-05	1,201E-04
5-15		3,305E-04	1,055E-05	1,940E-07	1,466E-05	4,878E-05	1,028E-04

CONCENTRACIONES MOLARES NETAS DE LOS CATIONES							
MUESTRA No.	Comentarios	Sodio, M	Amonio, M	Hidrógeno, M	Potasio, M	Magnesio, M	Calcio, M
1-1	Blanco						
2-1		5,210E-05	-2,340E-06	-1,771E-05	1,560E-06	9,000E-06	9,362E-05
3-1		1,320E-05	-1,320E-06	-1,771E-05	8,500E-07	4,670E-06	5,852E-05
4-1		2,650E-05	-1,620E-06	-1,771E-05	1,640E-06	8,760E-06	6,462E-05
5-1		1,900E-05	-2,450E-06	-1,770E-05	1,500E-06	7,980E-06	7,292E-05
1-2	Blanco						
2-2		6,320E-05	-3,590E-06	-1,903E-05	1,810E-06	1,133E-05	1,050E-04
3-2		1,610E-05	-3,130E-06	-1,901E-05	4,200E-07	4,380E-06	7,256E-05
4-2		2,580E-05	-1,790E-06	-1,901E-05	5,500E-07	5,120E-06	6,926E-05
5-2		2,900E-05	-2,180E-06	-1,901E-05	1,160E-06	6,200E-06	7,996E-05
1-3	Blanco						
2-3		4,570E-05	-5,260E-06	-2,137E-05	1,110E-06	1,050E-05	1,420E-04
3-3		1,820E-05	-2,150E-06	-2,135E-05	7,000E-07	5,810E-06	9,970E-05
4-3		1,850E-05	-5,400E-07	-2,134E-05	8,600E-07	6,110E-06	8,710E-05
5-3		3,010E-05	-8,100E-07	-2,135E-05	1,570E-06	8,020E-06	9,200E-05
1-4	Blanco						
2-4		1,320E-05	-2,140E-06	-1,376E-05	-8,200E-07	4,780E-06	9,476E-05
3-4		1,110E-05	-3,570E-06	-1,376E-05	-4,400E-07	4,500E-06	9,376E-05
4-4		1,000E-05	-7,800E-07	-1,376E-05	-1,000E-08	4,490E-06	7,766E-05
5-4		1,430E-05	-1,200E-06	-1,376E-05	-1,000E-07	4,510E-06	7,176E-05
1-5	Blanco						
2-5		1,3300E-05	-3,1100E-06	-2,683E-05	4,400E-07	4,800E-06	1,081E-04
3-5		1,5700E-05	-3,1600E-06	-2,685E-05	8,000E-08	5,550E-06	1,057E-04
4-5		1,7700E-05	-4,6100E-06	-2,684E-05	1,800E-07	5,390E-06	9,949E-05
5-5		1,7900E-05	-2,6600E-06	-2,682E-05	5,900E-07	5,340E-06	8,809E-05
1-6	Blanco						
2-6		9,6000E-06	-1,2200E-06	-2,505E-05	-3,000E-08	5,960E-06	1,056E-04
3-6		5,7000E-06	-2,2200E-06	-2,504E-05	2,800E-07	4,940E-06	7,919E-05
4-6		7,3000E-06	-4,4400E-06	-2,505E-05	-2,300E-07	4,610E-06	9,529E-05
5-6		8,6000E-06	-2,6100E-06	-2,505E-05	4,900E-07	5,720E-06	8,219E-05
1-7	Blanco						
2-7		5,400E-06	-1,940E-06	-1,945E-05	1,300E-07	3,170E-06	9,014E-05
3-7		3,900E-06	-1,380E-06	-1,944E-05	3,400E-07	2,930E-06	6,854E-05
4-7		7,600E-06	-5,050E-06	-1,945E-05	2,400E-07	3,380E-06	8,894E-05
5-7		7,100E-06	-2,860E-06	-1,945E-05	5,400E-07	2,880E-06	8,264E-05
1-8	Blanco						
2-8		1,200E-05	-2,000E-06	-4,776E-05	1,400E-07	6,040E-06	1,169E-04
3-8		1,060E-05	-1,460E-06	-4,773E-05	4,000E-08	3,870E-06	8,435E-05
4-8		2,150E-05	-5,170E-06	-4,772E-05	2,800E-07	8,070E-06	1,024E-04
5-8		1,590E-05	-3,680E-06	-4,775E-05	4,100E-07	4,370E-06	9,055E-05

MUESTRA No.	Comentarios	Sodio, M	Amonio, M	Hidrógeno, M	Potasio, M	Magnesio, M	Calcio, M
1-9	Blanco						
2-9		8,100E-06	-2,040E-06	-4,671E-05	-5,600E-07	5,430E-06	1,130E-04
3-9		9,800E-06	-5,440E-06	-4,670E-05	0,000E+00	6,860E-06	1,639E-04
4-9		1,410E-05	-7,780E-06	-4,666E-05	-2,500E-07	6,840E-06	1,036E-04
5-9		1,360E-05	-5,050E-06	-4,668E-05	-7,000E-08	8,020E-06	8,651E-05
1-10	Blanco						
2-10		5,300E-06	-1,130E-06	-4,457E-05	8,600E-07	5,030E-06	1,008E-04
3-10		1,250E-05	-3,460E-06	-4,454E-05	7,800E-07	6,290E-06	1,044E-04
4-10		1,490E-05	-4,070E-06	-4,455E-05	7,500E-07	6,870E-06	8,918E-05
5-10		9,800E-06	-4,710E-06	-4,455E-05	4,000E-07	4,890E-06	7,908E-05
1-11	Blanco						
2-11		1,200E-05	-3,170E-06	-3,219E-05	3,100E-07	5,720E-06	1,090E-04
3-11		1,180E-05	-3,390E-06	-3,216E-05	8,500E-07	4,570E-06	8,581E-05
4-11		1,600E-05	-5,330E-06	-3,220E-05	8,000E-07	5,890E-06	9,521E-05
5-11		1,320E-05	-3,890E-06	-3,216E-05	5,400E-07	4,980E-06	7,421E-05
1-12	Blanco						
2-12		1,100E-05	-3,720E-06	-4,158E-05	-2,000E-07	4,900E-06	9,999E-05
3-12		1,020E-05	-2,560E-06	-4,155E-05	-1,500E-07	3,910E-06	8,829E-05
4-12		8,800E-06	-2,670E-06	-4,157E-05	3,000E-08	4,810E-06	8,519E-05
5-12		1,090E-05	-3,890E-06	-4,148E-05	4,400E-07	5,840E-06	7,409E-05
1-13	Blanco						
2-13		6,300E-06	-5,690E-06	-4,249E-05	1,600E-07	2,920E-06	9,557E-05
3-13		1,100E-05	-4,110E-06	-4,253E-05	8,000E-08	3,290E-06	8,097E-05
4-13		7,500E-06	-5,390E-06	-4,255E-05	-2,300E-07	4,520E-06	8,237E-05
5-13		9,300E-06	-4,390E-06	-4,250E-05	1,100E-07	4,440E-06	7,057E-05
1-14	Blanco						
2-14		-8,600E-06	-5,050E-06	-4,253E-05	5,800E-07	1,930E-06	8,105E-05
3-14		9,300E-06	-5,050E-06	-4,252E-05	5,100E-07	4,190E-06	9,075E-05
4-14		6,300E-06	-3,110E-06	-4,250E-05	3,800E-07	3,950E-06	7,685E-05
5-14		7,300E-06	-3,940E-06	-4,246E-05	-1,800E-07	4,280E-06	6,755E-05
1-15	Blanco						
2-15		6,300E-06	-4,504E-06	-3,700E-05	2,360E-06	2,630E-06	8,039E-05
3-15		1,230E-05	-2,230E-06	-3,704E-05	1,100E-07	3,170E-06	8,269E-05
4-15		1,200E-05	-2,890E-06	-3,696E-05	5,900E-07	3,870E-06	7,699E-05
5-15		6,000E-06	-3,230E-06	-3,696E-05	2,400E-07	2,880E-06	5,969E-05

CONCENTRACIONES MOLARES DE LOS ANIONES					
MUESTRA No.	Comentarios	Cloruros, M	Nitratos, M	Sulfatos, M	Bicarbonatos, M
1-1	Blanco	4,705E-04	4,548E-05	3,331E-05	
2-1		5,458E-04	5,242E-05	3,550E-05	
3-1		5,142E-04	4,871E-05	3,383E-05	
4-1		5,162E-04	4,758E-05	3,508E-05	
5-1		5,068E-04	5,145E-05	3,644E-05	
1-2	Blanco	4,733E-04	4,258E-05	3,550E-05	
2-2		5,755E-04	4,516E-05	3,789E-05	
3-2		5,123E-04	4,355E-05	3,696E-05	
4-2		5,162E-04	4,258E-05	3,581E-05	
5-2		5,236E-04	4,452E-05	3,633E-05	
1-3	Blanco	4,652E-04	5,097E-05	3,623E-05	
2-3		5,196E-04	4,952E-05	3,539E-05	
3-3		4,970E-04	4,677E-05	3,467E-05	
4-3		5,016E-04	4,355E-05	3,519E-05	
5-3		5,210E-04	4,419E-05	3,602E-05	
1-4	Blanco	4,556E-04	4,226E-05	3,706E-05	
2-4		5,080E-04	4,823E-05	3,592E-05	
3-4		4,987E-04	4,806E-05	3,633E-05	
4-4		4,908E-04	4,613E-05	3,727E-05	
5-4		4,968E-04	4,952E-05	3,654E-05	
1-5	Blanco	4,564E-04	4,193E-05	3,727E-05	
2-5		5,094E-04	3,806E-05	3,727E-05	
3-5		5,018E-04	3,967E-05	3,706E-05	
4-5		5,120E-04	4,193E-05	3,789E-05	
5-5		5,080E-04	4,225E-05	3,768E-05	
1-6	Blanco	4,640E-04	4,387E-05	3,675E-05	
2-6		4,790E-04	4,435E-05	3,612E-05	
3-6		4,739E-04	4,274E-05	3,518E-05	
4-6		4,787E-04	4,290E-05	3,487E-05	
5-6		4,801E-04	4,371E-05	3,675E-05	
1-7	Blanco	4,589E-04	4,306E-05	3,529E-05	
2-7		4,730E-04	4,613E-05	3,570E-05	
3-7		4,626E-04	4,322E-05	3,602E-05	
4-7		4,691E-04	4,483E-05	3,550E-05	
5-7		4,733E-04	4,483E-05	3,508E-05	
1-8	Blanco	4,638E-04	5,000E-05	3,373E-05	
2-8		4,804E-04	4,774E-05	3,487E-05	2,980E-04
3-8		4,773E-04	4,500E-05	2,956E-05	2,147E-04
4-8		4,857E-04	4,952E-05	3,685E-05	2,206E-04
5-8		4,750E-04	5,371E-05	3,737E-05	1,943E-04

MUESTRA No.	Comentarios	Cloruros, M	Nitratos, M	Sulfatos, M	Bicarbonatos, M
1-9	Blanco	4,579E-04	4,882E-05	3,592E-05	
2-9		4,683E-04	4,323E-05	3,571E-05	2,308E-04
3-9		4,719E-04	4,387E-05	3,384E-05	
4-9		4,764E-04	4,984E-05	3,217E-05	2,143E-04
5-9		4,779E-04	4,532E-05	3,383E-05	1,690E-04
1-10	Blanco	4,570E-04	4,387E-05	3,685E-05	
2-10		4,621E-04	4,808E-05	3,602E-05	1,850E-04
3-10		4,722E-04	4,645E-05	3,633E-05	1,935E-04
4-10		4,773E-04	4,565E-05	3,706E-05	1,679E-04
5-10		4,646E-04	4,403E-05	3,550E-05	1,500E-04
1-11	Blanco	4,530E-04	4,306E-05	3,633E-05	
2-11		4,722E-04	4,355E-05	3,445E-05	2,235E-04
3-11		4,674E-04	4,435E-05	3,487E-05	2,154E-04
4-11		4,750E-04	4,597E-05	3,414E-05	2,054E-04
5-11		4,691E-04	4,516E-05	3,425E-05	1,433E-04
1-12	Blanco	4,664E-04	4,618E-05	3,520E-05	
2-12		4,769E-04	4,519E-05	3,450E-05	2,410E-04
3-12		4,750E-04	5,014E-05	3,375E-05	1,862E-04
4-12		4,783E-04	5,167E-05	3,498E-05	1,492E-04
5-12		4,775E-04	4,589E-05	3,474E-05	1,586E-04
1-13	Blanco	4,609E-04	4,182E-05	3,614E-05	
2-13		4,691E-04	4,598E-05	3,385E-05	1,805E-04
3-13		4,765E-04	4,583E-05	3,554E-05	1,568E-04
4-13		4,749E-04	4,576E-05	3,427E-05	1,523E-04
5-13		4,730E-04	4,652E-05	3,500E-05	1,220E-04
1-14	Blanco	4,584E-04	3,758E-05	3,705E-05	
2-14		4,693E-04	3,598E-05	3,551E-05	1,667E-04
3-14		4,815E-04	3,803E-05	3,683E-05	1,877E-04
4-14		4,734E-04	3,492E-05	3,416E-05	1,731E-04
5-14		4,697E-04	3,400E-05	3,437E-05	1,356E-04
1-15	Blanco	4,611E-04	3,246E-05	3,732E-05	
2-15		4,653E-04	3,279E-05	3,386E-05	1,651E-04
3-15		4,704E-04	3,488E-05	3,739E-05	1,818E-04
4-15		4,728E-04	3,277E-05	3,803E-05	1,600E-04
5-15		4,671E-04	3,555E-05	3,684E-05	1,232E-04



CONCENTRACIONES MOLARES NETAS DE LOS ANIONES					
MUESTRA No.	Comentarios	Cloruros, M	Nitratos, M	Sulfatos, M	Bicarbonatos, M
1-1	Blanco				
2-1		7,530E-05	6,940E-06	2,190E-06	
3-1		4,370E-05	3,230E-06	5,200E-07	
4-1		4,570E-05	2,100E-06	1,770E-06	
5-1		3,610E-05	5,970E-06	3,130E-06	
1-2	Blanco				
2-2		1,022E-04	2,580E-06	2,390E-06	
3-2		3,900E-05	9,700E-07	1,460E-06	
4-2		4,290E-05	0,000E+00	3,100E-07	
5-2		5,030E-05	1,940E-06	8,300E-07	
1-3	Blanco				
2-3		5,440E-05	-1,450E-06	-8,400E-07	
3-3		3,180E-05	-4,200E-06	-1,560E-06	
4-3		3,640E-05	-7,420E-06	-1,040E-06	
5-3		5,580E-05	-6,780E-06	-2,100E-07	
1-4	Blanco				
2-4		5,240E-05	5,970E-06	-1,140E-06	
3-4		4,310E-05	5,800E-06	-7,300E-07	
4-4		3,520E-05	3,870E-06	2,100E-07	
5-4		4,120E-05	7,260E-06	-5,200E-07	
1-5	Blanco				
2-5		5,300E-05	-3,870E-06	0,000E+00	
3-5		4,540E-05	-2,260E-06	-2,100E-07	
4-5		5,560E-05	0,000E+00	6,200E-07	
5-5		5,160E-05	3,200E-07	4,100E-07	
1-6	Blanco				
2-6		1,500E-05	4,800E-07	-6,300E-07	
3-6		9,900E-06	-1,130E-06	-1,570E-06	
4-6		1,470E-05	-9,700E-07	-1,880E-06	
5-6		1,610E-05	-1,600E-07	0,000E+00	
1-7	Blanco				
2-7		1,410E-05	3,070E-06	4,100E-07	
3-7		3,700E-06	1,600E-07	7,300E-07	
4-7		1,020E-05	1,770E-06	2,100E-07	
5-7		1,440E-05	1,770E-06	-2,100E-07	
1-8	Blanco				
2-8		1,660E-05	-2,280E-06	1,140E-06	2,980E-04
3-8		1,350E-05	-5,000E-06	-4,170E-06	2,147E-04
4-8		2,190E-05	-4,800E-07	3,120E-06	2,206E-04
5-8		1,120E-05	3,710E-06	3,640E-06	1,943E-04

MUESTRA No.	Comentarios	Cloruros, M	Nitratos, M	Sulfatos, M	Bicarbonatos, M
1-9	Blanco				
2-9		1,040E-05	-3,390E-06	-2,100E-07	2,308E-04
3-9		1,400E-05	-2,750E-06	-2,080E-06	
4-9		1,850E-05	3,220E-06	-3,750E-06	2,143E-04
5-9		2,000E-05	-1,300E-06	-2,090E-06	1,680E-04
1-10	Blanco				
2-10		5,100E-06	4,190E-06	-8,300E-07	1,850E-04
3-10		1,520E-05	2,580E-06	-5,200E-07	1,935E-04
4-10		2,030E-05	1,780E-06	2,100E-07	1,679E-04
5-10		7,600E-06	1,600E-07	-1,350E-06	1,500E-04
1-11	Blanco				
2-11		1,920E-05	4,900E-07	-1,860E-06	2,235E-04
3-11		1,440E-05	1,290E-06	-1,460E-06	2,154E-04
4-11		2,200E-05	2,910E-06	-2,190E-06	2,054E-04
5-11		1,610E-05	2,100E-06	-2,080E-06	1,433E-04
1-12	Blanco				
2-12		1,050E-05	-9,900E-07	-7,000E-07	2,410E-04
3-12		8,600E-06	3,960E-06	-1,450E-06	1,662E-04
4-12		1,290E-05	5,490E-06	-2,200E-07	1,492E-04
5-12		1,110E-05	-4,900E-07	-4,600E-07	1,586E-04
1-13	Blanco				
2-13		8,200E-06	4,160E-06	-2,290E-06	1,805E-04
3-13		1,560E-05	4,010E-06	-6,000E-07	1,568E-04
4-13		1,400E-05	3,940E-06	-1,870E-06	1,523E-04
5-13		1,210E-05	4,700E-06	-1,140E-06	1,220E-04
1-14	Blanco				
2-14		1,090E-05	-1,620E-06	-1,540E-06	1,667E-04
3-14		2,310E-05	4,500E-07	-2,200E-07	1,677E-04
4-14		1,500E-05	-2,660E-06	-2,890E-06	1,731E-04
5-14		1,130E-05	-3,580E-06	-2,680E-06	1,356E-04
1-15	Blanco				
2-15		4,200E-06	3,300E-07	-3,480E-06	1,651E-04
3-15		9,300E-06	2,420E-06	7,000E-06	1,618E-04
4-15		1,170E-05	3,100E-07	7,100E-07	1,800E-04
5-15		6,000E-06	3,090E-06	-4,800E-07	1,232E-04

*ANEXO VIII*  
*BALANCE IÓNICO EN LAS MUESTRAS*  
*DE AGUA DE LA CIA*

BALANCE IONICO				
MUESTRA No.	Comentarios	Suma cationes, M	Suma aniones, M	Suma cat/Suma an
1-1	Blanco	5,440E-04	5,826E-04	0,934
2-1		7,829E-04	6,692E-04	1,170
3-1		6,852E-04	6,306E-04	1,055
4-1		6,996E-04	6,339E-04	1,104
5-1		7,062E-04	6,309E-04	1,119
1-2	Blanco	5,517E-04	5,869E-04	0,940
2-2		8,266E-04	6,964E-04	1,187
3-2		6,989E-04	6,298E-04	1,111
4-2		7,060E-04	6,304E-04	1,120
5-2		7,329E-04	6,408E-04	1,144
1-3	Blanco	5,461E-04	5,886E-04	0,928
2-3		8,713E-04	6,399E-04	1,362
3-3		7,525E-04	6,131E-04	1,227
4-3		7,300E-04	6,155E-04	1,186
5-3		7,556E-04	6,372E-04	1,186
1-4	Blanco	5,450E-04	5,720E-04	0,953
2-4		7,408E-04	6,281E-04	1,179
3-4		7,349E-04	6,194E-04	1,186
4-4		7,048E-04	6,115E-04	1,153
5-4		6,968E-04	6,194E-04	1,125
1-5	Blanco	5,789E-04	5,729E-04	1,011
2-5		7,881E-04	6,220E-04	1,267
3-5		7,872E-04	6,158E-04	1,279
4-5		7,751E-04	6,297E-04	1,231
5-5		7,548E-04	6,256E-04	1,208
1-6	Blanco	5,746E-04	5,814E-04	0,988
2-6		7,810E-04	5,956E-04	1,311
3-6		7,215E-04	5,870E-04	1,229
4-6		7,519E-04	5,913E-04	1,272
5-6		7,316E-04	5,973E-04	1,225
1-7	Blanco	5,621E-04	5,725E-04	0,982
2-7		7,329E-04	5,905E-04	1,241
3-7		6,885E-04	5,779E-04	1,191
4-7		7,301E-04	5,849E-04	1,248
5-7		7,187E-04	5,883E-04	1,222
1-8	Blanco	5,571E-04	5,813E-04	0,959
2-8		7,673E-04	6,959E-04	0,856
3-8		6,850E-04	7,961E-04	0,873
4-8		7,469E-04	8,295E-04	0,900
5-8		7,119E-04	7,978E-04	0,892

MUESTRA No.	Comentarios	Suma cationes, M	Suma aniones, M	Suma cat/Suma an
1-9	Blanco	5,553E-04	5,764E-04	0,963
2-9		7,513E-04	8,138E-04	0,923
3-9		8,548E-04	5,835E-04	—
4-9		7,359E-04	8,049E-04	0,914
5-9		7,065E-04	7,599E-04	0,930
1-10	Blanco	5,526E-04	5,746E-04	0,962
2-10		7,247E-04	7,672E-04	0,945
3-10		7,392E-04	7,848E-04	0,942
4-10		7,117E-04	7,650E-04	0,930
5-10		6,815E-04	7,296E-04	0,934
1-11	Blanco	5,673E-04	5,687E-04	0,998
2-11		7,737E-04	8,082E-04	0,957
3-11		7,252E-04	7,969E-04	0,910
4-11		7,488E-04	7,947E-04	0,942
5-11		7,034E-04	7,281E-04	0,969
1-12	Blanco	5,869E-04	5,830E-04	1,007
2-12		7,622E-04	8,321E-04	0,916
3-12		7,373E-04	7,588E-04	0,972
4-12		7,315E-04	7,501E-04	0,975
5-12		7,128E-04	7,513E-04	0,949
1-13	Blanco	5,869E-04	5,750E-04	1,021
2-13		7,422E-04	7,633E-04	0,972
3-13		7,199E-04	7,502E-04	0,960
4-13		7,200E-04	7,415E-04	0,971
5-13		6,995E-04	7,115E-04	0,983
1-14	Blanco	5,871E-04	5,701E-04	1,030
2-14		6,975E-04	7,430E-04	0,939
3-14		7,393E-04	7,609E-04	0,972
4-14		7,098E-04	7,497E-04	0,947
5-14		6,915E-04	7,080E-04	0,977
1-15	Blanco	5,699E-04	5,682E-04	1,003
2-15		7,031E-04	7,309E-04	0,962
3-15		7,147E-04	7,420E-04	0,963
4-15		7,043E-04	7,416E-04	0,950
5-15		6,611E-04	6,995E-04	0,945

*ANEXO IX*  
*RECESIÓN SUPERFICIAL EN LAS MUESTRAS*  
*DE ROCA CALIZA*

RECESIÓN SUPERFICIAL EN LAS MUESTRAS DE ROCA CALIZA				
Muestra No. 2				
Lote No.	Conc. neta de calcio, mM	Volumen, L	Tiempo, años	RS, $\mu\text{m}/\text{año}$
1	9,362E-02	2,440	1,271	3,096
2	1,050E-01	2,097	1,092	3,471
3	1,420E-01	1,300	0,677	4,696
4	9,476E-02	2,365	1,232	3,133
5	1,081E-01	3,315	1,727	3,574
6	1,056E-01	3,004	1,565	3,492
7	9,014E-02	3,555	1,852	2,981
8	1,169E-01	3,000	1,563	3,864
9	1,130E-01	3,270	1,703	3,737
10	1,008E-01	3,415	1,779	3,333
11	1,090E-01	3,170	1,651	3,605
12	9,999E-02	3,040	1,583	3,306
13	9,557E-02	3,340	1,740	3,160
14	8,105E-02	3,730	1,943	2,680
15	8,039E-02	3,513	1,830	2,658
		<b>Vol total</b>	<b>Tiempo total</b>	<b>RS prom<math>\pm</math>incert</b>
		<b>44,554 L</b>	<b>23,205 años</b>	<b>(3,386<math>\pm</math>0,135) <math>\mu\text{m}/\text{año}</math></b>
Muestra No. 3				
Lote No.	Conc. neta de calcio, mM	Volumen, L	Tiempo, años	RS, $\mu\text{m}/\text{año}$
1	5,852E-02	2,660	1,385	1,954
2	7,256E-02	2,455	1,279	2,423
3	9,970E-02	2,150	1,120	3,329
4	9,376E-02	2,195	1,143	3,131
5	1,057E-01	3,200	1,667	3,529
6	7,919E-02	3,020	1,573	2,644
7	6,854E-02	3,220	1,677	2,289
8	8,435E-02	3,295	1,716	2,817
9	1,639E-01	3,240	1,688	5,473
10	1,044E-01	3,230	1,682	3,485
11	8,581E-02	3,390	1,766	2,865
12	8,829E-02	3,040	1,583	2,948
13	8,097E-02	3,150	1,641	2,704
14	9,075E-02	3,340	1,740	3,030
15	8,269E-02	3,413	1,778	2,761
		<b>Vol total</b>	<b>Tiempo total</b>	<b>RS prom<math>\pm</math>incert</b>
		<b>44,998 L</b>	<b>23,436 años</b>	<b>(3,025<math>\pm</math>0,207) <math>\mu\text{m}/\text{año}</math></b>

<b>Muestra No. 4</b>				
<b>Lote No.</b>	<b>Conc. neta de calcio, mM</b>	<b>Volumen, L</b>	<b>Tiempo, años</b>	<b>RS, <math>\mu\text{m}/\text{año}</math></b>
1	6,462E-02	2,630	1,370	2,318
2	6,926E-02	2,513	1,309	2,484
3	8,710E-02	2,810	1,464	3,124
4	7,766E-02	2,340	1,219	2,785
5	9,949E-02	2,660	1,385	3,568
6	9,529E-02	2,800	1,458	3,418
7	8,894E-02	2,745	1,430	3,190
8	1,024E-01	2,790	1,453	3,671
9	1,036E-01	3,000	1,563	3,716
10	8,918E-02	3,035	1,581	3,199
11	9,521E-02	2,780	1,448	3,415
12	8,519E-02	2,855	1,487	3,055
13	8,237E-02	3,200	1,667	2,954
14	7,685E-02	3,200	1,667	2,756
15	7,699E-02	3,263	1,699	2,761
		<b>Vol total</b>	<b>Tiempo total</b>	<b>RS prom<math>\pm</math>incert</b>
		<b>42,621 L</b>	<b>22,198 años</b>	<b>(3,094<math>\pm</math>0,113) <math>\mu\text{m}/\text{año}</math></b>
<b>Muestra No. 5</b>				
<b>Lote No.</b>	<b>Conc. neta de calcio, mM</b>	<b>Volumen, L</b>	<b>Tiempo, años</b>	<b>RS, <math>\mu\text{m}/\text{año}</math></b>
1	7,292E-02	2,670	1,391	2,411
2	7,996E-02	3,135	1,633	2,644
3	9,200E-02	3,160	1,646	3,042
4	7,176E-02	2,975	1,549	2,372
5	8,809E-02	2,850	1,484	2,912
6	8,219E-02	2,840	1,479	2,717
7	8,264E-02	3,005	1,565	2,732
8	9,055E-02	2,970	1,547	2,994
9	8,651E-02	3,125	1,628	2,860
10	7,908E-02	3,185	1,659	2,614
11	7,421E-02	3,190	1,661	2,453
12	7,409E-02	2,900	1,510	2,449
13	7,057E-02	3,260	1,698	2,333
14	6,755E-02	3,170	1,651	2,233
15	5,969E-02	3,203	1,668	1,973
		<b>Vol total</b>	<b>Tiempo total</b>	<b>RS prom<math>\pm</math>incert</b>
		<b>45,638 L</b>	<b>23,770 años</b>	<b>(2,583<math>\pm</math>0,081) <math>\mu\text{m}/\text{año}</math></b>