

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE
CARRERA DE INGENIERO GEÓLOGO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN



**ESTUDIO DE LA DINÁMICA Y EVOLUCIÓN CLIMÁTICA DE
MESOAMÉRICA A PARTIR DEL REGISTRO ELEMENTAL DE
ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL DE ESTALAGMITAS
DESARROLLADAS EN LAS GRUTAS DEL REY MARCOS, SAN
JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ**

OTTO INQUE CHAVARRÍA ROBLES

COBÁN, ALTA VERAPAZ, AGOSTO DE 2017

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE
CARRERA DE INGENIERO GEÓLOGO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**ESTUDIO DE LA DINÁMICA Y EVOLUCIÓN CLIMÁTICA DE
MESOAMÉRICA A PARTIR DEL REGISTRO ELEMENTAL DE
ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL DE ESTALAGMITAS
DESARROLLADAS EN LAS GRUTAS DEL REY MARCOS, SAN
JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ**

**PRESENTANDO AL HONORABLE CONSEJO DIRECTIVO DEL
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE**

POR:

OTTO INQUE CHAVARRÍA ROBLES

CARNÉ 200840405

**COMO REQUISITO PREVIO A OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO**

COBÁN, ALTA VERAPAZ, AGOSTO DE 2017

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

RECTOR MAGNÍFICO

Dr. Carlos Guillermo Alvarado Cerezo

CONSEJO DIRECTIVO

PRESIDENTE:	Lic. Zoot. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales
SECRETARIA:	Lcda. T.S. Floricelda Chiquín Yoj
REPRESENTANTE DOCENTES:	Ing. Geól. César Fernando Monterroso Rey
REPRESENTANTES ESTUDIANTILES:	Br. Fredy Enrique Gereda Milián PEM. César Oswaldo Bol Cú

COORDINADOR ACADÉMICO

Ing. Ind. Francisco David Ruiz Herrera

COORDINADOR DE LA CARRERA

Ing. Geól. Sergio David Morán Ical

COMISIÓN DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

COORDINADOR:	Ing. Geól. Ricardo Enrique Milián de la Cruz
SECRETARIA:	Ing. Geól. Silvia Frine Cortez Bendfeldt
VOCAL:	Ing. Geól. Luis Alfonso Laj Hun

REVISORA DE REDACCIÓN Y ESTILO

Ing. Geól. Silvia Frine Cortez Bendfeldt

REVISOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Ing. Geól. Luis Alfonso Laj Hun

ASESOR

Ing. Geól. Osmin Jared Vásquez Hernández



**CENTRO UNIVERSITARIO
DEL NORTE (CUNOR)
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz
PBX: 79 566 600 Ext. 209
Guatemala, C. A.
c. e.: geologiausac@gmail.com

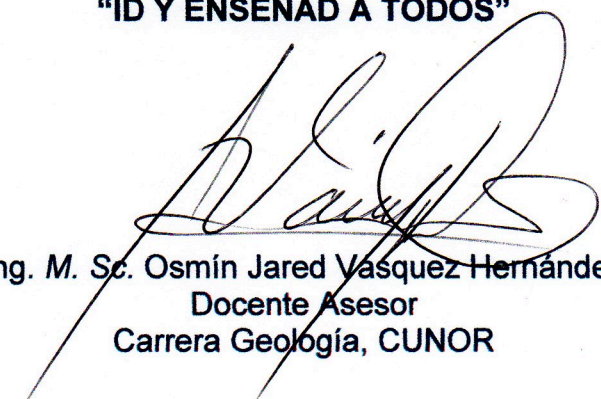
Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

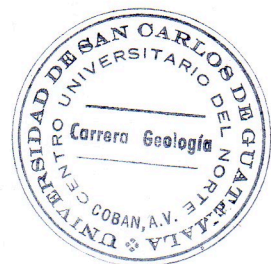
Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **ASESORÍA** del informe final de Trabajo de Graduación del **T.U. GEÓL. OTTO INQUE CHAVARRÍA ROBLES**, carné No. **200840405**, titulado: **“ESTUDIO DE LA DINÁMICA Y EVOLUCIÓN CLIMÁTICA DE MESOAMÉRICA A PARTIR DEL REGISTRO ELEMENTAL DE ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL DE ESTALAGMITAS DESARROLLADAS EN LAS GRUTAS DEL REY MARCOS, SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ”**, el cual considero llena los requisitos establecidos para su aprobación, por lo que someto a consideración de ustedes dicho informe.

Atentamente

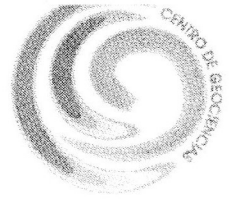
“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. M. Sc. Osmín Jared Vásquez Hernández
Docente Asesor
Carrera Geología, CUNOR





CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM



CAMPUS JURQUILLA, QRO.

Querétaro, Qro, a 21 de Julio del 2016

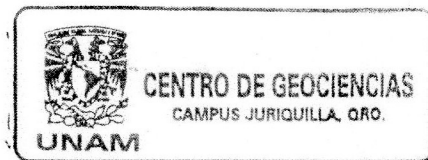
Señores
Comisión Trabajo de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **ASESORÍA EXTERNA** del informe final de Trabajo de Graduación del T.U. **GEÓL. OTTO INQUE CHAVARRÍA ROBLES**, carné No. 200840405, titulado: **"ESTUDIO DE LA DINÁMICA Y EVOLUCIÓN CLIMÁTICA DE MESOAMÉRICA A PARTIR DEL REGISTRO ELEMENTAL DE ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL DE ESTALAGMITAS DESARROLLADAS EN LAS GRUTAS DEL REY MARCOS, SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ"**, el cual considero llena los requisitos establecidos para su aprobación, por lo que someto a consideración de ustedes dicho informe.

Atentamente

Dr. Juan Pablo Bernal Uruchurtu
Investigador Titular "B"
Centro de Geociencias





**CENTRO UNIVERSITARIO
DEL NORTE (CUNOR)
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz

PBX: 79 566 600 Ext. 209

Guatemala, C. A.

c. e.: geologiausac@gmail.com

Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **REVISIÓN** del informe final de Trabajo de Graduación del **T.U. GEÓL. OTTO INQUE CHAVARRÍA ROBLES**, carné n.º **200840405**, titulado: **“ESTUDIO DE LA DINÁMICA Y EVOLUCIÓN CLIMÁTICA DE MESOAMÉRICA A PARTIR DEL REGISTRO ELEMENTAL DE ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL DE ESTALAGMITAS DESARROLLADAS EN LAS GRUTAS DEL REY MARCOS, SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ”**, el cual considero llena los requisitos establecidos para su aprobación, por lo que someto a consideración de ustedes dicho informe.

Atentamente

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. Geól. Luis Alfonso Laj Hun
Docente Revisor
Carrera Geología
CUNOR





**CENTRO UNIVERSITARIO
DEL NORTE (CUNOR)
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz
PBX: 79 566 600 Ext. 209
Guatemala, C. A.
c. e.: geologiausac@gmail.com

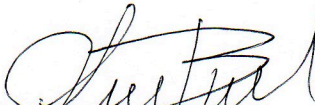
Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio remito el informe Final de Trabajo de Graduación a nivel de grado titulado: **“ESTUDIO DE LA DINÁMICA Y EVOLUCIÓN CLIMÁTICA DE MESOAMÉRICA A PARTIR DEL REGISTRO ELEMENTAL DE ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL DE ESTALAGMITAS DESARROLLADAS EN LAS GRUTAS DEL REY MARCOS, SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ”**, realizado por el T.U. GEÓL. OTTO INQUE CHAVARRÍA ROBLES, carné No. **200840405**, el cual ya fue revisado por la **COMISIÓN DE REDACCIÓN Y ESTILO** de la Carrera de Geología, quienes consideramos llena los requisitos establecidos para su aprobación.

Atentamente,

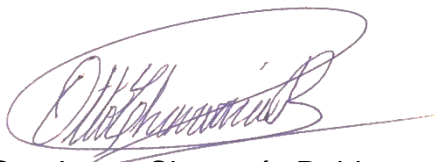
“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. **Geol. Silvia Frine Cortez Bendfeldt**
Comisión Redacción y Estilo
Carrera Geología, CUNOR



HONORABLE COMITÉ EXAMINADOR

En cumplimiento con lo establecido por los estatutos de la Universidad de San Carlos de Guatemala presento a consideración de ustedes el trabajo de graduación titulado: ESTUDIO DE LA DINÁMICA Y EVOLUCIÓN CLIMÁTICA DE MESOAMÉRICA A PARTIR DEL REGISTRO ELEMENTAL DE ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL DE ESTALAGMITAS DESARROLLADAS EN LAS GRUTAS DEL REY MARCOS, SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ, previo a optar el título profesional de Ingeniero Geólogo.



Otto Inque Chavarría Robles
Carné: 200840405

RESPONSABILIDAD

“La responsabilidad del contenido de los trabajos de graduación es: Del estudiante que opta al título, del asesor y del revisor; de la Comisión de Redacción y Estilo de cada carrera, es la responsable de la estructura y forma”.

Aprobado en punto SEGUNDO, inciso 2.4 subinciso, 2.4.1 del Acta No. 17-2012 de Sesión extraordinaria del Consejo Directivo de fecha 18 de junio de 2012.

DEDICATORIA

A DIOS

Porque su camino me ha ayudado a conseguir paso a paso cada una de las metas que me he trazado.

A MI FAMILIA

Principalmente a mis papás, Otto y Mirna, porque han sido un ejemplo de vida y he contado incondicionalmente con su amor y apoyo. A mis hermanas, Raquel y Kristal, porque nunca han dejado de apoyarme, animarme y demostrarme su amor constantemente. A mis sobrinas, Raquel y Frida, son el motivo por el que quiero ser recordado como una persona de bien. A mí cuñado, Fredy, porque se ha convertido en un apoyo importante para mi familia. A mis padrinos, Inque y Gloria, por su amor, su apoyo y por ser desde siempre mis segundos papás.

A MI MENTOR

Juan Pablo Bernal, porque ha sido mi maestro en el mundo de la ciencia e investigación científica, pero sobre todo, porque durante este tiempo me ha apoyado como a un hijo, abriéndome las puertas de su hogar y de su familia.

A MI ALMA MATER

La tricentenaria Universidad de San Carlos de Guatemala, porque ha sido la modeladora de mis ideales y pensamientos, porque es un orgullo poderme llamar Sancarlista.

A MI PAÍS

Guatemala, porque como guatemaltecos estamos obligados a enaltecer y agrandar la imagen de nuestro país, y así, contribuir con las próximas generaciones, para que tengan un mejor lugar donde vivir.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, mis abuelitos, papás, hermanos, sobrinos, tíos y primos, especialmente a mi tío Álvaro, por apoyarme siempre en mis estudios.

A la magnífica Universidad de San Carlos de Guatemala, por permitirme ser parte de los profesionales guatemaltecos formados por más de trecientos años.

Al Centro Universitario del Norte –CUNOR- y a la Carrera de Geología, pero en especial, a cada uno de los catedráticos y personal administrativo que contribuyeron en mi formación como profesional.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo en la realización de esta investigación, en especial por el financiamiento recibido del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la Universidad Nacional Autónoma de México, a través del proyecto, “Dinámica y evolución de oscilaciones climáticas y solares durante eventos de cambio climático global abrupto pasados como posibles análogos al cambio climático actual” (IN105713) y “Variabilidad de la composición isotópica de Uranio como indicador paleohidrológico en estalagmitas” (IN110615).

A los investigadores, personal administrativo y compañeros estudiantes del Centro de Geociencias de la UNAM, por brindarme su apoyo durante la estancia de investigación.

A mis amigos, que mantuvieron firme e inalienable su apoyo y cariño, a mis compinches y hermanos de TH, al mi gran equipo de trabajo y amigos, Christian, Sara, Juan, Citlaly y Carlos, a mis amigos mexicanos, Liliana, Pily, Daniela, Oswaldo y Fito, que estando lejos de mi tierra, me hicieron sentirme en casa.

A la noble Ciudad de Querétaro y su gente, que me brindaron su hospitalidad y amabilidad, enriqueciéndome de historia y cultura.

ÍNDICE GENERAL		Página
ÍNDICE DE CONTENIDOS		i
ÍNDICE DE CUADROS		iii
ÍNDICE DE FÍGURAS		iii
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS		iv
ÍNDICE DE GRÁFICAS		v
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS		vi
RESUMEN		vii
INTRODUCCIÓN		1

CAPITULO 1 MARCO TEÓRICO

1.1	Planteamiento del problema	3
1.2	Justificación	4
1.3	Hipótesis	5
1.4	Antecedentes	6
1.4.1	El clima en Guatemala y el arribo de humedad	6
1.4.2	La oscilación del sur –el Niño (ENSO) y otras oscilaciones atmósfera-océano	8
1.4.3	Evolución paleoclimática de Mesoamérica	9
1.4.4	Espeleotemas como indicadores paleoclimáticos	10
1.4.5	La incorporación de elementos traza (ET) a la estalagmita	11
1.5	Objetivos	14
1.6	Limites y Alcances de la investigación	14
1.6.1	Límites	14
1.6.2	Alcances	14
1.7	Accesos	15
1.8	Marco geológico regional	17
1.8.1	Formación Cobán	17
1.9	Contexto geográfico	19

1.10 Contexto climático	20
1.11 Grutas del Rey Marcos	21
1.11.1 Monitoreo de la Cueva	22
1.11.2 Mapa y perfil	26
1.12 Glosario	29

CAPITULO 2 METODOLOGÍA

2.1 Método	31
2.2 Metodología	31
2.2.1 Recolección de muestras	31
2.2.2 Preparación de muestras	32
2.2.3 Análisis geoquímico	33
a. Fechamiento	33
b. LA-ICPMS	34
2.2.4 Datación Isotópica	35
2.2.5 Reducción de datos de LA-ICPMS	40
2.2.6 Representación gráfica	43

CAPITULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Descripción petrográfica de la estalagmita	45
3.1.1 Muestra GRM 01	45
3.1.2 Muestra GRM 02	49
3.1.3 Muestra GRM 03	53
3.2 Fechamiento	70
3.2.1 Modelo de edades	70
3.3 Analisis de Elementos traza (ET)	76
3.3.1 Procesos geoquímicos que modulan Mg/Ca, Sr/Ca y Ba/C en el epikarst	77
a. GRM 01 y GRM 02	77
b. GRM 03	80
3.3.2 Relación Mg/Ca, Sr/Ca y Ba/Ca en las estalagmitas GRM .01 y GRM 02	82
3.3.3 Relación Mg/Ca, Sr/Ca y Ba/Ca en la estalagmita GRM 03	86
3.4 Interpretación paleoclimática preliminar	88
CONCLUSIONES	97
RECOMENDACIONES	97

BIBLIOGRAFÍA	101
ANEXOS	106

INDICE DE CUADROS

CUADRO 1.	MONITOREO DE CAVERNA (AFUERA DE LA CUEVA A LAS 12:00HRS)	24
CUADRO 2.	MONITOREO DE CAVERNA (ENTRADA CUEVA)	24
CUADRO 3.	MONITOREO DE CAVERNA (ZONA DE RECOLECCIÓN DE GRM 03 - JUNTO A LAGUNA DE PATOS)	25
CUADRO 4.	MONITOREO DE CAVERNA (CRUZANDO EL RÍO)	25
CUADRO 5.	MONITOREO DE CAVERNA (PASANDO EL SANTUARIO)	25
CUADRO 6.	MONITOREO DE CAVERNA (ZONA DE RECOLECCIÓN DE GRM 01 - EN LA PARED)	26
CUADRO 7.	MONITOREO DE CAVERNA (ZONA DE RECOLECCIÓN DE GRM 02 - RÍO, EN EL PUENTE)	26
CUADRO 8.	MONITOREO DE CAVERNA (SALIDA A LAS 17:05HRS)	26
CUADRO 9.	DATOS OBTENIDOS EN EL FECHAMIENTO DE LA MUESTRA GRM-03	73

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.	PRECIPITACIÓN PLUVIAL PROMEDIO PARA 3 ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN EL DEPARTAMENTO DE ALTA VERAPAZ	7
FIGURA 2.	MAPA DE UBICACIÓN	16
FIGURA 3.	PROVINCIAS FISIOGRÁFICAS DE LA REPÚBLICA DE GUATEMALA	19
FIGURA 4.	PRECIPITACIÓN PLUVIAL EN EL DEPARTAMENTO DE ALTA VERAPAZ	21
FIGURA 5.	SECCIONES TRANSVERSALES DE ESTALAGMITAS COLECTADAS EN LAS GRUTAS DEL REY MARCOS	23
FIGURA 6.	MAPA DE LAS GRUTAS DEL REY MARCOS	27
FIGURA 7.	PERFIL DE LAS GRUTAS DEL REY MARCOS	28
FIGURA 8.	CADENA DE DESINTEGRACIÓN DEL ²³⁸ U	36
FIGURA 9.	SOLUCIÓN GRÁFICA DE LA ECUACIÓN 1	40
FIGURA 10.	GRÁFICAS EN <i>IGOR PRO 6</i>	44
FIGURA 11.	MODELO DE EDADES	71

FIGURA 12.	MODELO DE EDADES UTILIZADO EN EL ANÁLISIS	74
FIGURA 13.	RELACIONES DE ET PARA GRM 01 Y GRM 02	79
FIGURA 14.	Mg/Ca VRS. Sr/Ca EN GRM 03	81
FIGURA 15.	Mg EN GRM 01 Y GRM 02	83
FIGURA 16.	Sr EN GRM 01 Y GRM 02	84
FIGURA 17.	Ba EN GRM 01 Y GRM 02	85
FIGURA 18.	E/Ca VRS EDAD PARA MUESTRA GRM 03	87
FIGURA 19.	COMPARACIÓN GENERAL CON GRM 03	90
FIGURA 20.	COMPARACIÓN DE <i>HENRICH 1</i> EN GRM 03	92
FIGURA 21.	COMPARACIÓN DE EVENTO 8.2 KA EN GRM 03	94

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

FOTOGRAFÍA 1.	VISTA DEL INTERIOR DE LAS GRUTAS DEL REY MARCO	22
FOTOGRAFÍA 2.	FRAGMENTOS PARA ANALIZAR DE GRM 03	33
FOTOGRAFÍA 3.	LA-ICPMS	35
FOTOGRAFÍA 4.	ESTALAGMITA GRM 01	46
FOTOGRAFÍA 5.	PUNTA DE ESTALAGMITA GRM 01-1	47
FOTOGRAFÍA 6.	CRISTALES DE CALCITA EN ESTALAGMITA GRM 01-1	48
FOTOGRAFÍA 7.	CRISTALES DE CALCITA EN LA BASE DE LA ESTALAGMITA GRM 01-1	49
FOTOGRAFÍA 8.	ESTALAGMITA GRM 02-1	50
FOTOGRAFÍA 9.	PUNTA DE LA ESTALAGMITA GRM 02-1	51
FOTOGRAFÍA 10.	CRISTALES DE CALCITA EN CRECIMIENTO GRM 02-1	52
FOTOGRAFÍA 11.	CRISTALES DE CALCITA EN CRECIMIENTO EN LA BASE DE GRM 02-1	53
FOTOGRAFÍA 12.	ESTALAGMITA GRM 03	54
FOTOGRAFÍA 13.	ESTALAGMITA GRM 03, PRIMER SEGMENTO	55
FOTOGRAFÍA 14.	ESTALAGMITA GRM 03, SEGUNDO SEGMENTO	55
FOTOGRAFÍA 15.	ESTALAGMITA GRM 03, TERCER SEGMENTO	56
FOTOGRAFÍA 16.	CRISTALES DE CALCITA CON COLORACIONES GRM 03-1	57
FOTOGRAFÍA 17.	CRISTALES DE CALCITA EN GRM 03-1	58
FOTOGRAFÍA 18.	CAMBIO AL SEGUNDO EJE DE CRECIMIENTO GRM 03-1	59

FOTOGRAFÍA 19.	POSIBLE HIATO EN CAMBIO A SEGUNDO EJE DE CRECIMIENTO, GRM 03-1	60
FOTOGRAFÍA 20.	CRISTALES DE CALCITA ATRAVESANDO BANDAS DE CRECIMIENTO GRM 03-2	61
FOTOGRAFÍA 21.	CRISTALES DE CALCITA GRM 03-2	62
FOTOGRAFÍA 22.	CAMBIO AL TERCER EJE DE CRECIMIENTO GRM 03-2	63
FOTOGRAFÍA 23.	CONTINUIDAD DE CRISTALES DE CALCITA GRM 03-2	64
FOTOGRAFÍA 24.	CRISTALES DE CALCITA GRM 03-3	65
FOTOGRAFÍA 25.	CONTINUIDAD DE CRISTALES DE CALCITA GRM 03-3	66
FOTOGRAFÍA 26.	DISOLUCIÓN DE MUESTRA GRM 03-3	67
FOTOGRAFÍA 27.	DISOLUCIÓN DE MUESTRA, SIN NICOLES CRUZADOS GRM 03-3	68
FOTOGRAFÍA 28.	POSIBLE RECRISTALIZACIÓN GRM 03-3	69
FOTOGRAFÍA 29.	PUNTA DE ESTALAGMITA GRM 03-3	70

ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 1.	PROMEDIO DE RELACIÓN DE ($^{88}\text{Sr}/^{44}\text{Ca}$) VRS. ESTÁNDAR NIST 612	41
GRÁFICA 2.	PROMEDIO DE RELACIÓN DE ($^{88}\text{Sr}/^{48}\text{Ca}$) VRS. ESTÁNDAR NIST 612	42

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

%RH	Humedad Relativa
AMO	<i>Atlantic Multidecadal Oscillation</i>
Ba	Bario
C	Carbón
Ca	Calcio
CaCO₃	Carbonato de Calcio
CO₂	Dióxido de Carbono
COPREDEH	Comisión Presidencial Coordinadora de la Política del Ejecutivo en Materia de Derechos Humanos
ENSO	El Niño – Southern Oscillation
ET	Elemento Traza
H1	Henrich 1
H₂O	Agua
HCl	Ácido clorhídrico
HF	Ácido fluorhídrico
HNO₃	Ácido nítrico
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ka	Mil años
LAICPMS	<i>Laser Ablation Inductively Coupled Mass Spectrometry</i>
MCICPMS	<i>Multicollector Inductively Coupled Mass Spectrometry</i>
Mg	Magnesio
Na	Sodio
NII	Nicoles paralelos
Nx	Nicoles cruzados
O	Oxígeno
P	Fósforo
P atm	Presión atmosférica
PCP	Precipitación previa
ppm	Partes por millón
Si	Silicio
Sr	Estroncio
Th	Torio
U	Uranio
UMG	Ultimo Máximo Glaciar
YD	<i>Younger Dryas</i>
ZITC	Zona Intertropical de Convergencia
Zn	Zinc

RESUMEN

En la actualidad la reconstrucción paleoclimática es un tema de investigación que está en auge. La comprensión de los patrones climáticos terrestres pasados es un reto grande que está asumiendo la ciencia, permite entender mejor los patrones actuales, y permite validar modelos que sugieren posibles escenarios climáticos futuros.

Las estalagmitas han sido utilizadas recientemente como registros paleoclimáticos de alta confiabilidad debido a que se genera en un sistema cerrado dentro de una caverna, por lo que se encuentran protegidas contra posibles procesos diagenéticos tales como, intemperismo, erosión, etc., y a su vez pueden ser datadas por series de U. Los archivos contenidos en los espeleotemas son considerados los de mayor confiabilidad, es por esto que juegan un papel importante en la conformación y entendimiento del paleoclima.

Las espeleotemas (estalagmitas, estalactitas, etc.,) son formaciones de minerales secundarios que crecen al interior de cavernas. Cuando estas se encuentran dentro de un terreno kárstico, la génesis de los espeleotemas resulta de la filtración de aguas meteóricas hacia cavidades kársticas donde se precipita el CaCO_3 , debido a la evaporación de H_2O y/o la desgasificación de CO_2 en el interior de la cueva. Dentro del grupo de los espeleotemas, se ha escogido a las estalagmitas para estos estudios debido a que presentan una estratigrafía cronológicamente ordenada. (*White, W.B. citado por Sasowsky y Mylroie, 2004, cap 9; Fairchild y Baker, 2012*).

Al momento del crecimiento, las estalagmitas incorporan dentro de la estructura cristalina del carbonato de calcio ciertos elementos químicos (*Fairchild y Treble, 2009*), se ha logrado demostrar que la composición de estos elementos químicos refleja la composición elemental de las aguas de las

cuales precipito la calcita (*Roberts et al., 1998; Dreybrodt, 2008*). El comportamiento de los ET nos puede indicar las características climáticas en las que fueron formados, ya que estos pueden responder a diversos factores ambientales, como la cantidad de humedad en el suelo y/o la atmósfera (*Fairchild et al., 2006; Fairchild y Treble, 2009; Fairchild y Hartland, 2010*). Bajo condiciones favorables, las estalagmitas nos pueden aportar información a escala sub-anual, marcar cambios hidrológicos recientes, como la cantidad, fuente y temporalidad de la precipitación de agua de lluvia, actuando como indicadores de condiciones paleohidrológicas. (*Roberts et al., 1998*).

La presente investigación constituye el primer registro de variabilidad climática de alta resolución realizado en Guatemala, a partir de las variaciones de elementos traza (Ca, Sr, Mg y Ba) en una estalagmita. Este análisis se llevó a cabo utilizando *LAICPMS*, con lo que se pudo establecer las variaciones elementales relativas con alta resolución espacio-temporal. Fue realizada con tres estalagmitas recolectadas en las grutas del Rey Marcos, estas se encuentran localizadas dentro de la formación litológica denominada Cobán, la cual corresponde a una gruesa secuencia de carbonatos de calcio y evaporitas del Cretácico, en su mayoría aflorando como roca caliza (*Sapper, 1899*).

Por lo tanto, el trabajo en esta tesis busca entender la dinámica y evolución climática de los últimos 23 mil años de Mesoamérica a partir del registro elemental de alta resolución espacial de estalagmitas desarrolladas en dicha caverna, comparando el cambio climático actual con lo ocurrido durante los eventos de cambio climático abrupto Heinrich 1, Younger Dryas, el último máximo glacial (UMG) y el evento 8,200.

Esta investigación es la primera en su tipo realizada por parte de la Carrera de Geología y la Universidad de San Carlos de Guatemala, se llevó a cabo con apoyo del centro de Geociencias de la Universidad Autónoma de México y busca ser un aporte significativo a la ciencia e investigación paleoclimática a nivel regional.

INTRODUCCIÓN

Los estudios de cambio y variabilidad climática pasada son de vital importancia para la construcción de modelos climáticos que permitan proponer posibles escenarios ante el cambio climático actual. El estudio detallado de cambios climáticos abruptos pasados como análogos al cambio climático actual puede aportar información valiosa sobre las posibles consecuencias del cambio climático moderno (*por ejemplo Baldini et al., 2002; Davis and Stevenson, 2007; Davis et al., 2000; LoDico et al., 2006; Tinner and Lotter, 2001; Wiersma and Renssen, 2006*). Es por esta razón, que es necesario tener registros paleoclimáticos robustos de alta resolución espacial, de tal manera que el análisis detallado de estos, nos permita esclarecer el efecto que dichos eventos tuvieron sobre los principales agentes moduladores de las condiciones climáticas, en particular, el arribo de humedad a las zonas continentales.

Aunque se cuentan con archivos paleoclimáticos regionales procedentes de otras partes de Mesoamérica, los cuales pueden ser extrapolados a Guatemala, es evidente la ausencia de archivos paleoclimáticos de alta resolución temporal para esta región, la cual es climáticamente diversa. Siendo esta la primera investigación de este tipo realizada en Guatemala, contribuirá de gran ayuda a comprender el desarrollo del clima en esta región y como ha sido afectada por fenómenos climáticos, tales como *Henrich 1, Younger Dryas, el Último Máximo Glacial (UMG) y el evento 8,200*.

A diferencia de los archivos paleoclimáticos de México, donde los eventos de cambio climático abrupto se reflejan en su mayoría, como una interrupción en el desarrollo del archivo (hiato de crecimiento), los archivos en Centroamérica pueden tener como característica mantener su crecimiento y por lo tanto, registran los cambios geoquímicos asociados.

De esta manera, el estudio detallado de estalagmitas recientes permitirá establecer la dinámica climática océano-atmósfera durante dichos eventos, aportando información vital que permita validar los actuales modelos de circulación atmósfera-océano y por lo tanto, reducir la incertidumbre a los distintos escenarios de cambio climático (*COPREDEH*, 2009) propuestos por el *IPCC* para Mesoamérica (*IPCC*, 2007).

El presente informe busca determinar la dinámica y la evolución climática de Mesoamérica durante los últimos 23 mil años a partir de la interpretación de variaciones de alta resolución en composición química de estalagmitas desarrolladas en las Grutas del Rey Marcos, esto mediante la utilización de *LAICPMS* perteneciente al Centro de Geociencias de la Universidad Autónoma de México.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Planteamiento del problema

A pesar de la existencia de archivos paleoclimáticos regionales procedentes de otras partes de Mesoamérica, cuyas implicaciones pueden ser extrapoladas a Guatemala, es evidente la ausencia de archivos paleoclimáticos de alta resolución temporal para Guatemala y Mesoamérica. Esto implica que en la actualidad no es posible saber cuáles han sido las consecuencias reales del cambio climático abrupto en Mesoamérica.

Aunque se ha propuesto el estudio de eventos climáticos abruptos, tales como *Heinrich 1* o el evento 8200, como análogos al cambio climático actual, hay ciertas limitaciones que no permiten hacer tales extrapolaciones. Por ejemplo, no es claro aún si durante *el Último Máximo Glacial* y *el evento Heinrich 1*, *ENSO* y *AMO* tuvieron un papel preponderante, y si fuese el caso, cuál fue su dinámica bajo condiciones atmosféricas con niveles de CO₂ menores a los actuales (180-200 ppm vs. 390 ppm en la actualidad). Por otra parte, aunque el evento 8200 se llevó a cabo bajo condiciones atmosféricas similares a las pre-industriales (es decir, CO₂ atmosférico = 280 ppm), se sabe que *ENSO* se estableció tan sólo hace 4200 años (Bernal et al., 2011; Conroy et al., 2008; Moy et al., 2002), por lo que el Holoceno temprano no es un buen análogo a las condiciones climáticas actuales.

Por otra parte, la denominada “pequeña edad de hielo” (*Mann, 2002*), puede resultar un evento clave para entender las posibles implicaciones del cambio climático actual. Comprendida entre los siglos XVI y XIX de nuestra era, la pequeña edad de hielo resultó en una disminución significativa en la precipitación en Mesoamérica (*Lozano-García et al., 2007*), posiblemente ligado a cambios en las corrientes termohalinas del Atlántico u oscilaciones solares, se llevó en condiciones de insolación y atmosféricas muy similares a las actuales, por lo que es un “candidato” idóneo para caracterizar la dinámica de *ENSO*, *AMO*, etc., durante dicho periodo. De esta manera, las estalagmitas recientes provenientes de zonas tropicales representan una oportunidad excepcional para comprender dicha dinámica.

Lo anterior se resume en la siguiente pregunta:

¿Cómo ha evolucionado el clima y cuál ha sido el papel de las oscilaciones climáticas durante los últimos milenios en Mesoamérica?

1.2 Justificación

Es necesario contar con registros paleoclimáticos robustos de alta resolución espacial, cuyo análisis detallado permita dilucidar el efecto que dichos eventos tuvieron sobre los principales agentes moduladores de las condiciones climáticas, en particular, el arribo de humedad a las zonas continentales. El estudio detallado de cambios climáticos abruptos pasados como análogos al cambio climático actual puede aportar información valiosa sobre las posibles consecuencias del cambio climático moderno (por ejemplo *Davis et al., 2000; Tinner y Lotter, 2001; Baldini et al., 2002; LoDico et al., 2006; Wiersma y Renssen, 2006; Davis y Stevenson, 2007*).

Aunque se cuentan con registros paleoclimáticos regionales procedentes de México, Costa Rica o de otras zonas de Mesoamérica

que pudiesen ser extrapolados a Guatemala, es necesario contar con archivos paleoclimáticos de alta resolución para Guatemala y Mesoamérica.

A diferencia de los archivos paleoclimáticos de México, donde los eventos de cambio climático abrupto se reflejan en su mayoría, como una interrupción en el desarrollo del archivo (hiato de crecimiento), los archivos en Centroamérica se caracterizan por mantener su crecimiento y por lo tanto, registran los cambios geoquímicos asociados. De esta manera, el estudio detallado de estalagmitas recientes permitirá establecer la dinámica climática océano-atmósfera durante dichos eventos, aportando información vital que permita validar los actuales modelos de circulación atmósfera-océano y por lo tanto, reducir la incertidumbre a los distintos escenarios de cambio climático (COPREDEH, 2009) propuestos por el *IPCC* para Mesoamérica (*IPCC*, 2007).

Este tipo de investigación es de suma importancia realizarla en Guatemala y será el primero en ser ejecutado por la carrera de Geología de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en colaboración con el Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México. La importancia de este se debe a que se obtendrán registros de la evolución climática de Mesoamérica que pueden proveer información vital para el establecimiento de planes de mitigación ante el cambio climático, al tiempo que se podrá reducir la incertidumbre asociada con los actuales escenarios de cambio climático (COPREDEH, 2009).

1.3 Hipótesis

La composición elemental de estalagmitas procedentes de las Grutas del Rey Marcos responde a variaciones en las condiciones climáticas imperantes al momento de precipitación del CaCO_3 . Las condiciones climáticas de Alta Verapaz presentan un comportamiento

oscilatorio complejo resultado de la interacción de distintas oscilaciones atmósfera-océano, por lo tanto la variación en la composición elemental de estalagmitas recientes, pueden ser empatadas con archivos instrumentales de precipitación pluvial del departamento de Alta Verapaz.

1.4 Antecedentes

1.4.1 El clima en Guatemala y el arribo de humedad

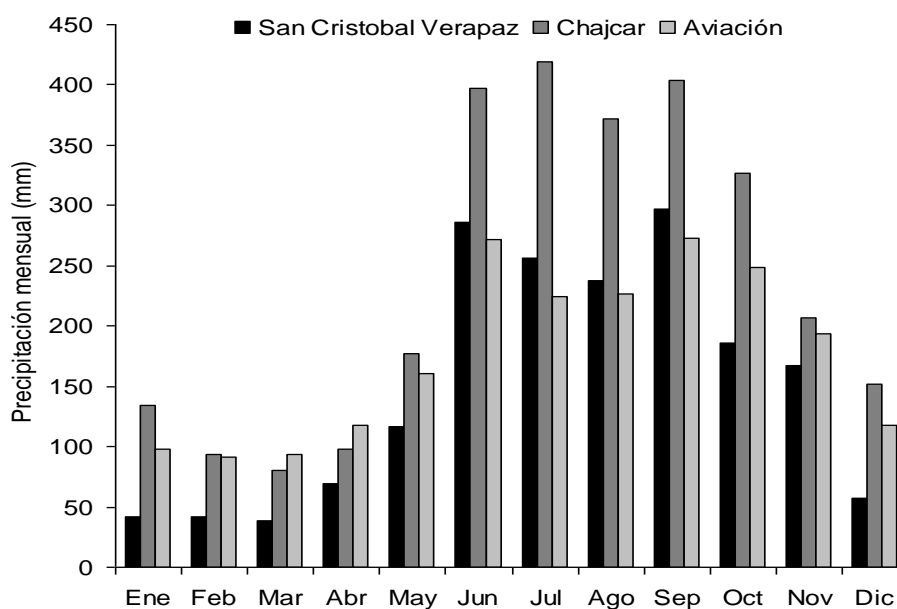
Son diversos los factores que modulan el arribo de humedad y por lo tanto, el clima en Guatemala. El clima de Guatemala es húmedo y tropical con variaciones de acuerdo a la posición geográfica. La zona de Alta Verapaz está influenciada por la celda de alta presión del Atlántico (*Wang and Enfield, 2003*). De manera general, la circulación atmosférica está dominada por los vientos alisios y la zona intertropical de convergencia (ZITC) durante el verano boreal.

Importantes diferencias en la precipitación pluvial entre verano e invierno establecen el patrón estacional para Alta Verapaz, y en general para Guatemala (figura 1), con un periodo de lluvias comprendido entre los meses de Mayo y Noviembre, y una estación semi-seca entre diciembre y abril, resultado de la influencia directa de la migración de la ZITC, y en menor grado la influencia de incursiones polares invernales (nortes).

La época de lluvias presenta una sequía de verano (canícula) similar a la descrita para el sur de México (Magaña et al., 1999), y que es el resultado de fluctuaciones en la intensidad y localización de la ZITC en su sector oriental y es paralelo a cambios en la temperatura del mar en el Pacífico, que puede afectar la actividad ciclónica en el área. Cabe mencionar que, a pesar de las diferencias en cantidad de precipitación total anual

que se observa entre algunas localidades en Guatemala (INSIVUMEH, 2012), la distribución general de lluvia a lo largo del año es similar en todo el país, lo que implica que a pesar de la influencia que pueden tener los microclimas en la cantidad de lluvia, los patrones generales de lluvia se encuentran modulados por los procesos arriba mencionados.

FIGURA 1
PRECIPITACIÓN PLUVIAL PROMEDIO PARA 3
ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN EL
DEPARTAMENTO DE ALTA VERAPAZ



Fuente: Vásquez Hernández, Osmín J. *Análisis de datos hidrometeorológicos de Alta Verapaz para la elaboración de un modelo de Cambio Climático*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, 2004.

En la Figura 1 se muestran los promedios que se obtuvieron de estaciones meteorológicas con al menos 20 años continuos de datos.

1.4.2 La oscilación del sur –el Niño (*ENSO*) y otras oscilaciones atmósfera-océano

La oscilación del sur –el Niño (*ENSO*) corresponde al estado climático en el que la temperatura de la superficie del mar en la región conocida como “Niño 3” (4°N-4°S, 150°W-90°W), frente a las costas de Perú, está 0.5°C o más por encima de la media del periodo 1950-1979, por al menos seis meses consecutivos (Magaña et al., 2003). De acuerdo a esta definición, desde 1960 ha habido 22 eventos El Niño, con consecuencias en el clima Global.

Al igual que el resto de Mesoamérica, existe una correlación negativa entre la cantidad de precipitación y la Oscilación del Sur – El Niño (*ENSO –El Niño Southern Oscillation*) (Magaña et al., 2003), lo cual se refleja en niveles bajos en el lago Izabal (Medina et al., 2008), al igual que el lago Gatún en Panamá (*Lachniet et al., 2004b*). Debido a que *ENSO* presenta una frecuencia de 3 a 7 años (*Wang and Fiedler, 2006*), dichos efectos son recurrentes y lo han sido desde que se estableció *ENSO* hace ~4200 años (*Bernal et al., 2011; Caffrey et al., 2011; Conroy et al., 2008; Moy et al., 2002*).

Cabe mencionar que, a pesar de que hay estudios incipientes que sugieren una baja influencia de *ENSO* sobre el departamento de Alta Verapaz y en general en el oriente de Guatemala, (Pedreros et al., 2010), evidencia basada en isótopos de C de estalagmitas procedentes de Belice indican una influencia evidente de *ENSO* (*Frappier et al., 2002*), lo que sugiere que la baja correlación entre *ENSO* y precipitación pluvial para la zona de Alta Verapaz pueda estar afectada por la falta de datos instrumentales robustos, o los efectos de *ENSO* son simplemente más sutiles en el registro instrumental, pero sus consecuencias ambientales más evidentes. Esto último parece estar respaldado

por las variaciones en el nivel del lago Izabal, las cuales están forzadas por *ENSO* (Medina et al., 2008).

A pesar de que no hay estudios que lo corroboren, es de esperar que el arribo de humedad a Guatemala y en general en Mesoamérica, este también afectada por la Oscilación Multidecadal del Atlántico, de manera semejante a lo observado en el sur de México (*Lachniet et al., 2012*) y establecido por los diferentes modelos de circulación océano-atmósfera (*Dima and Lohmann, 2007; Feng et al., 2010; Hu and Feng, 2008; Knight et al., 2005; Knight et al., 2006*).

1.4.3 Evolución paleoclimática de Mesoamérica

En general han sido pocas las reconstrucciones paleoclimáticas realizadas en Mesoamérica y en particular Guatemala. (*Hodell et al 2008*) y (*Bush et al 2009*) han permitido establecer las variaciones climáticas para Mesoamérica durante los últimos 85 ka, a partir del estudio de un núcleo de sedimentos extraído del lago de Petén Itzá, cuyas repercusiones e interpretaciones para el último máximo glacial coinciden con las observadas en suroeste de México a partir de análisis de una estalagmita (*Lachniet, M.S., Asmerom, Y., Bernal, J.P., Polyak, V.J., Vazquez-Selem, L., 2013*) y (*Lachniet et al, 2013*).

Ambos estudios han establecido que durante el Último Máximo Glacial, la intensidad del monzón era semejante al actual, pero hace 18 ka, durante el evento *Heinrich 1* (*Heinrich, 1988*) dichas condiciones se colapsaron de manera abrupta llevando a un clima significativamente menos húmedo. Por otra parte, el estudio de una estalagmita de Costa Rica permite establecer las condiciones climáticas en los trópicos durante el evento 8200

(*Lachniet et al., 2004a*), los cuales son congruentes con los observados en el suroeste de México (*Bernal et al., 2011*). En ambos casos se ha determinado que en un periodo de aproximadamente 300 años, reinaron condiciones de aridez en el sur de México y menor precipitación pluvial en Centroamérica como resultado de los drenes de los lagos proglaciales de Norteamérica al Atlántico Norte (*Alley and Ágústsdóttir, 2005*).

De igual manera, a partir del estudio de estalagmitas de Belice (*Webster et al., 2007*) y Panamá (*Lachniet et al., 2004b*), ha sido posible estimar las condiciones climáticas prevalecientes durante el colapso Maya las cuales han sido corroboradas por el estudio de estalagmitas de la península de Yucatán (*Medina-Elizalde et al., 2010*).

Los ejemplos aquí mencionados buscan establecer que el uso de estalagmitas u otros archivos paleoclimáticos, de una zona tienen el potencial de poder establecer condiciones paleoambientales a nivel regional, ya que las condiciones climáticas locales son siempre el resultado de los procesos de interacción océano-atmósfera a nivel regional y global.

1.4.4 Espeleotemas como indicadores paleoclimáticos

Las estalagmitas cálcicas son uno de los archivos de condiciones paleohidrológicas y paleoambientales continentales más robustos con los que se cuenta en la actualidad (*Fairchild et al., 2006; Lachniet, 2009*), esto debido a la relativa facilidad y alta precisión con la que pueden ser fechados (*Richards and Dorale, 2003*), la capacidad de permanecer como archivos cerrados por largos periodos de tiempo (*Ayliffe et al., 1998; Wang et al., 2001; Winograd et al., 1992*), así como la posibilidad de ofrecer

información paleoclimática con resolución sub-estacional (*Borsato et al., 2007; Fairchild et al., 2001; Treble et al., 2003*).

A partir de las variaciones en la composición isotópica de O y C en el carbonato de la estalagmita, es posible inferir variaciones en el origen y cantidad de la precipitación pluvial, como el resultado de la variabilidad climática durante el periodo de crecimiento de la estalagmita (*Lachniet, 2009*). Por otra parte, variaciones en la composición de algunos elementos traza (Mg, Sr, Ba, Si, P, U) en la estalagmita han sido utilizados como trazadores de los procesos pedológicos e hidrológicos que ocurren en el epikarst, los cuales también son resultado de las condiciones ambientales imperantes a nivel regional al tiempo de la deposición de la calcita (*Aliaga-Campuzano et al., 2009; Apóstegui et al., 2010; Baldini et al., 2002; Bernal et al., 2006; Fairchild et al., 2001; Fairchild and Treble, 2009; Hernández-Mendiola et al., 2007; Huang et al., 2001; Treble et al., 2003*).

1.4.5 La incorporación de elementos traza (ET) a la estalagmita

Los elementos traza son incorporados a la estructura del CaCO_3 durante el crecimiento de la estalagmita (*Fairchild y Treble, 2009*), este proceso se puede llevar a cabo mediante tres mecanismos principales:

1. Transporte e incorporación de partículas detríticas finas o por coloides (*Fairchild y Treble, 2009*) (*Fairchild et al 2007*).
2. Adsorción sobre la superficie del cristal en crecimiento (*Gascoyne, 1983*).
3. La sustitución isomórfica de Ca^{2+} por otros iones disueltos (Mg^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , etc.) (*Gascoyne et al., 1983*).

Entendiendo lo anterior, las variaciones en la composición de algunos elementos traza incompatibles con la calcita tales como, Mg, Sr, Ba, Si, P, U, etc., pueden ser utilizados como trazadores de los procesos e hidrológicos que ocurren en el epikarst, ya que estos son resultados de las condiciones imperantes a nivel regional al tiempo de la precipitación de la calcita. (*Aliaga-Campuzano et al., 2009; Apóstegui et al., 2010; Baldini et al., 2002; Bernal et al., 2006; Fairchild et al., 2001; Fairchild and Treble, 2009; Hernández-Mendiola et al., 2007; Huang et al., 2001; Treble et al., 2003*).

Es trascendental entender que los elementos traza pueden incorporarse selectivamente a la calcita, por lo que es necesario utilizar un coeficiente de partición (K_D) que describa la distribución de los ET entre las diferentes fases (sólido/líquido), con esto se puede determinar si un elemento es compatible o no a una fase cristalina (Ecuación 1, *Rollinson, 1993*).

$$K_D = \left(\frac{(E/Ca)_{sólido(mineral)}}{(E/Ca)_{líquido}} \right) \quad (1)$$

La incorporación de los ET en la calcita está controlada por varios factores como, temperatura, fuerza iónica, salinidad, tasa de precipitación y morfología del cristal, radio iónico, potencial iónico (*Fairchild y Treble, 2009*).

Como explican también *Fairchild y Treble* en 2009 y *Fairchild* en 2000, la variabilidad en la relación E/Ca en el agua y por lo tanto, en la precipitación de la calcita está relacionada a diversas causas:

- Precipitación previa de la calcita, es un proceso que genera un aumento en las proporciones de Mg/Ca, Sr/Ca y Ba/Ca en el agua y por ende en la calcita que precipita subsecuentemente.
- Mayor disolución de la dolomita, cuando hay mayor tiempo de residencia del agua en la roca madre, es decir flujo lento (condiciones de baja humedad), aumenta la disolución de la fracción dolomítica, eso nos da como resultado que la proporción de Mg/Ca aumente.
- La disolución incongruente de la dolomita, proceso que se genera en la superficie de la dolomita, donde se retiran preferentemente los iones Ca^{2+} en comparación al resto.
- Lixiviación preferente de Mg y Sr con respecto al Ca, esto ocurre si hay un exceso de los dos ET desde minerales no carbonatados y si el ion Ca^{2+} es atrapado en el carbonato.
- Mezclado de dos o más fuentes con distinta relación E/Ca

Para esta investigación se utilizará principalmente los ET, Mg y Sr. El Magnesio es uno de los elementos que ha cobrado más importancia en este tipo de estudios, ya que es un indicador de la precipitación previa del CaCO_3 y sus variaciones nos indican cambios estacionales (*Huang y Fairchild, 2001; Roberts y col., 1998*). Mientras tanto la presencia de Estroncio puede ser relacionada con la tasa de crecimiento de la estalagmita y de sus cristales de CaCO_3 , al igual que sus datos isotópicos pueden mostrar cambios en el material eólico y variaciones en la lixiviación de los suelos (*Huang y Fairchild, 2001*). También la variación isotópica en este nos refleja si su procedencia es de fuentes carbonatadas o silicatos (*Fairchild y Treble, 2009*).

1.5 Objetivos

General

Determinar la dinámica y la evolución climática de Mesoamérica durante los últimos 23 mil años, a partir de la interpretación de variaciones de alta resolución en la composición química de estalagmitas.

Específicos

- Analizar estalagmitas guatemaltecas utilizando *LAICPMS* y las variaciones en la composición elemental relativa al Ca a nivel microescala.
- Identificar si la relación ET/Ca es modulada por condiciones hidrológicas en el epikarst.
- Interpretar el primer registro de variabilidad climática de alta resolución temporal para el norte de Guatemala, a partir de las variaciones de elementos traza en tres estalagmitas que idealmente cubrirá el último milenio.

1.6 Límites y Alcances de la investigación

1.6.1 Límites

El área donde se realizó este estudio fue en las Grutas del Rey Marcos, ubicadas en el municipio de San Juan Chamelco, Alta Verapaz, en las coordenadas: 15p 0791871 y 1707490. Los resultados de este proyecto permitieron hacer una reconstrucción paleoclimática a nivel regional que abarca desde el Sur de México hasta Costa Rica. Sin embargo, la comparación con otros registros paleoambientales contemporáneos provenientes de otras partes del mundo permitirá poner la reconstrucción en un contexto global.

1.6.2 Alcances

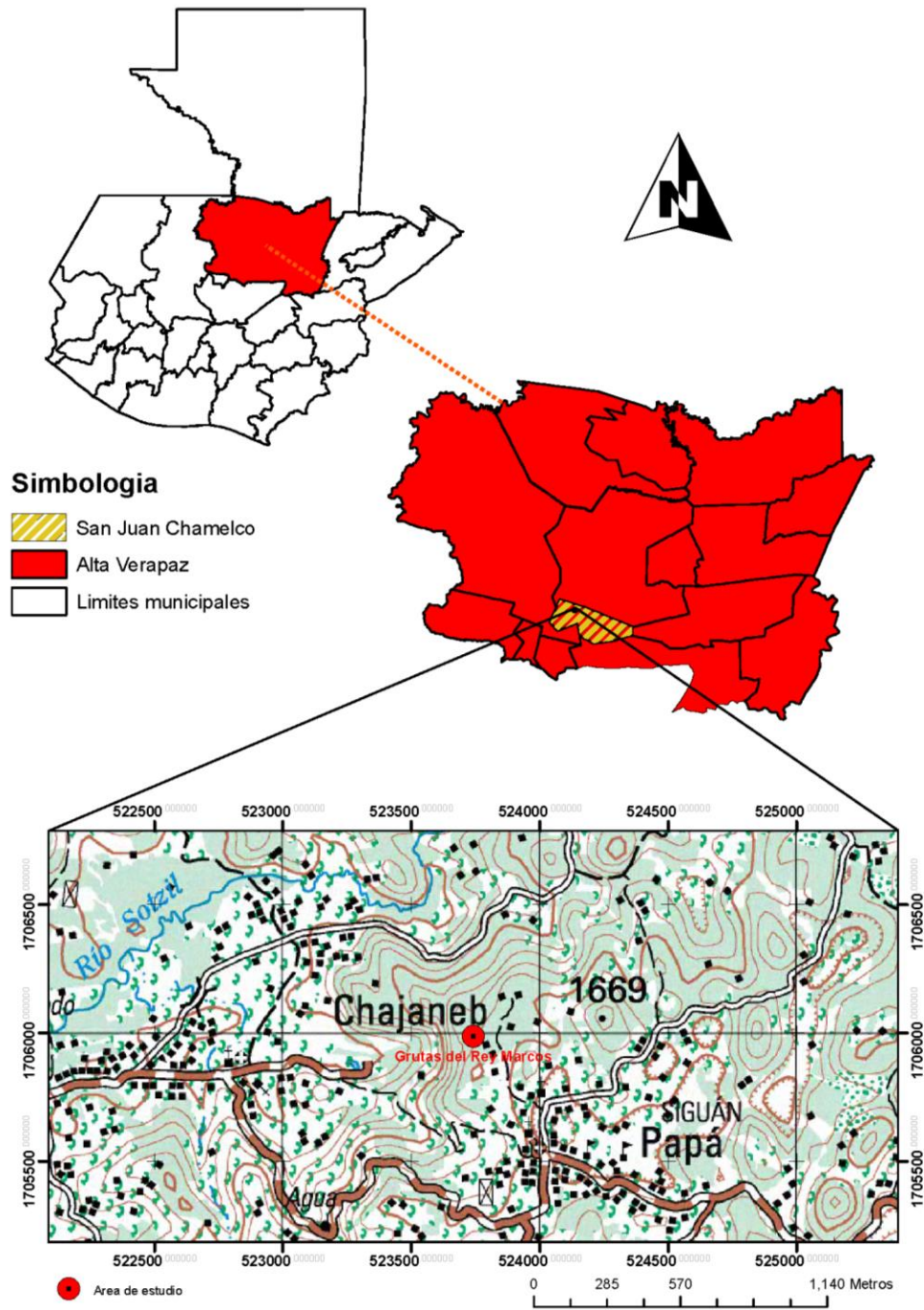
La ejecución de este proyecto de investigación contribuye con los estudios de cambio climático que se han realizado en el

país, marcando un precedente con la metodología empleada, ya que el uso de estalagmitas para determinar las condiciones paleohidrológicas y paleoclimáticas de la región, nunca se había llevado a cabo por parte de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

1.7 Accesos

San Juan Chamelco se encuentra a 220 km de distancia de la ciudad capital (Figura 2). Para llegar a las Grutas del Rey Marcos se toma la carretera CA-14, que parte de la ciudad de Guatemala consecutivamente, hasta llegar al municipio de Cobán, A.V. (aproximadamente 212km), continuando por la carretera que conduce entre el municipio de Cobán y el municipio de San Juan Chamelco, dentro del municipio de San Juan Chamelco que conduce a la aldea Chamil, en dicha carretera se avanza 7 km hasta llegar a las Grutas del Rey Marcos.

**FIGURA 2
MAPA DE UBICACIÓN**



Fuente: Elaboración de campo, 2012.

La figura 2 nos muestra el mapa de ubicación de las Grutas del Rey Marcos (dentro del cuadro rojo), haciendo referencia de su ubicación en un contexto nacional.

1.8 Marco Geológico Regional

La geología de Guatemala se encuentra caracterizada por cuatro provincias geológicas siendo las siguientes: a) Una provincia sedimentaria en la planicie de la costa del Pacífico que corresponde a depósitos cuaternarios siendo resultado de una planicie de inundación. b) La provincia Volcánica que se encuentra alineada con la costa del Océano Pacífico y se encuentra asociado a la evolución de un arco de islas que es producto del proceso de subducción. c) La provincia del Cinturón Metamórfico que se ubica en el centro del país, producto del rozamiento de la placa del Caribe con la de Norte América. d) La provincia de sedimentos profundos o someros ubicados al Norte del país (Cosillo, 2008).

El principal tipo de roca del área de Alta Verapaz es roca sedimentaria caliza, proveniente de ambiente profundo carbonatado, de origen marino que presenta fósiles muy característicos de esta zona y microfósiles que identifican a cada tipo de unidad o formación litológica. Cada formación de estas rocas se ha clasificado por su contenido fosilífero y edades. Las Grutas del Rey Marcos se encuentran asentadas dentro de una unidad litológica en particular, denominada Formación Cobán (Sapper, 1899).

1.8.1 Formación Cobán

La formación Cobán, es una gruesa secuencia de carbonatos y evaporitas del Cretácico ocurrentes cerca de Cobán, A.V. (Sapper, 1899). En algunas áreas, la Fm. Cobán cubre disconformemente a la Fm. Todos Santos del Neocomiano al Turoniano. La parte evaporítica de la unidad esta probablemente restringida al Comancheano o Cretácico Inferior (Vinson, 1962).

El contacto superior de la Cobán es conformable y gradual hacia la Formación Campur, que se distingue por su contenido de

microfósiles, estratificación más delgada y lisa, textura fina y comúnmente sublitográfica y tipo de meteorización (*Vinson, 1962*).

Litológicamente está compuesta de calizas, dolomitas y capas frecuentes de brecha de caliza y dolomita. La estratificación es generalmente masiva pero la presencia de una zona de estratos delgados de calizas (*Walper, 1960*).

Posteriormente esta formación fue dividida por *Fourcade et.al (1994)* en dos miembros:

- Miembro dolomítico inferior, el cual está compuesto por dolomías de tonalidades oscuras, en ocasiones cristalinas y por caliza dolomíticas con presencia de miliólidos. También se pueden presentar algunas capas de calizas y/o brechas calcáreas, ambas de génesis evaporítica, con espesores métricos a decamétricos (*Fourcade, 1994*).
- Miembro de caliza superior, conformada por lodolitas, pudiendo ser reconocidas como *wackeston* o *packestone* dentro de la clasificación de *Dunham*. También pueden presentarse en intercalaciones con dolomías y/o brechas con clastos de hasta 20 cm de tamaño, estas últimas se presentan con elementos litológicos idénticos a la roca madre (*Fourcade, 1994*).

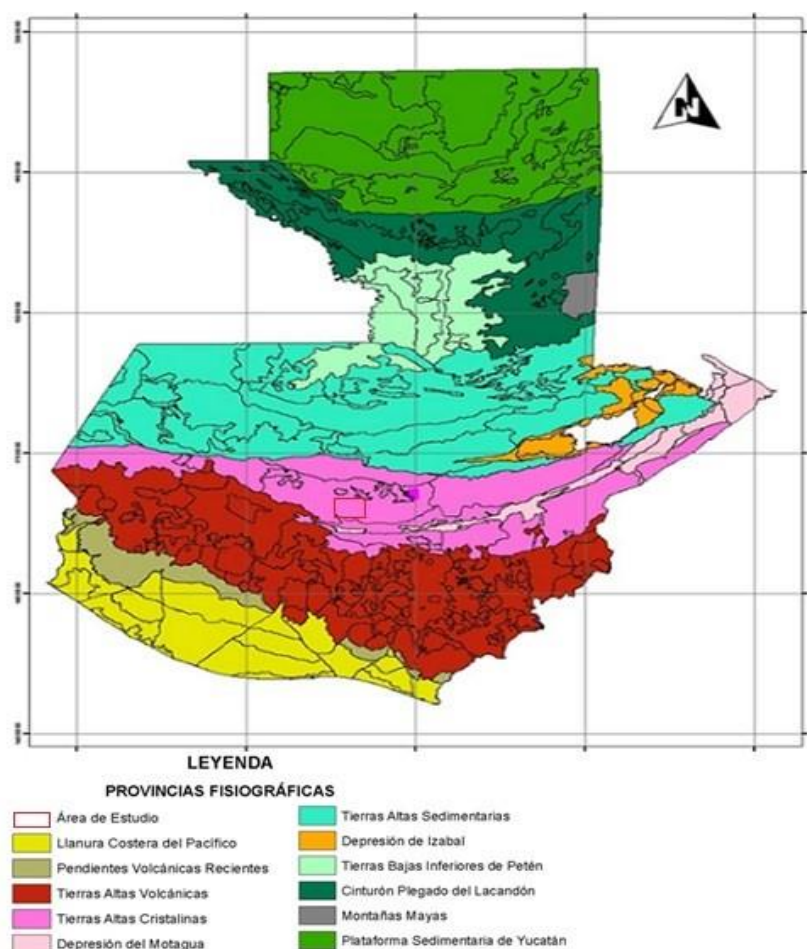
La parte superior de este miembro está compuesta por calizas de color claro con fósiles rudistas y foraminíferos grandes (*Fourcade, 1994*).

1.9 Contexto geográfico

Las Grutas del Rey Marcos se encuentran en el municipio de San Juan Chamelco, Alta Verapaz. Dicho municipio se encuentra contenido en la región fisiográfica denominada tierras altas sedimentarias (figura 3).

Esta unidad fisiográfica corresponde a diversas formas, destacando la sierra de Chamá provista de diversidad de pliegues, fallas y procesos erosivos que han modificado el paisaje dando origen a la topografía kárstica, anticlinales, sinclinales y colinas paralelas.

FIGURA 3
PROVINCIAS FISIGRÁFICAS DE LA REPÚBLICA DE
GUATEMALA



FUENTE: Ministerio de agricultura Ganadería y alimentación (MAGA).

Es importante mencionar que, en el Departamento de Alta Verapaz están representadas las divisiones fisiográficas de los Cerros de Caliza y las tierras bajas del Petén-Caribe. (Simmons, 1959). El área bajo estudio presenta una fisiografía altamente alterada por procesos kársticos.

1.10 Contexto Climático

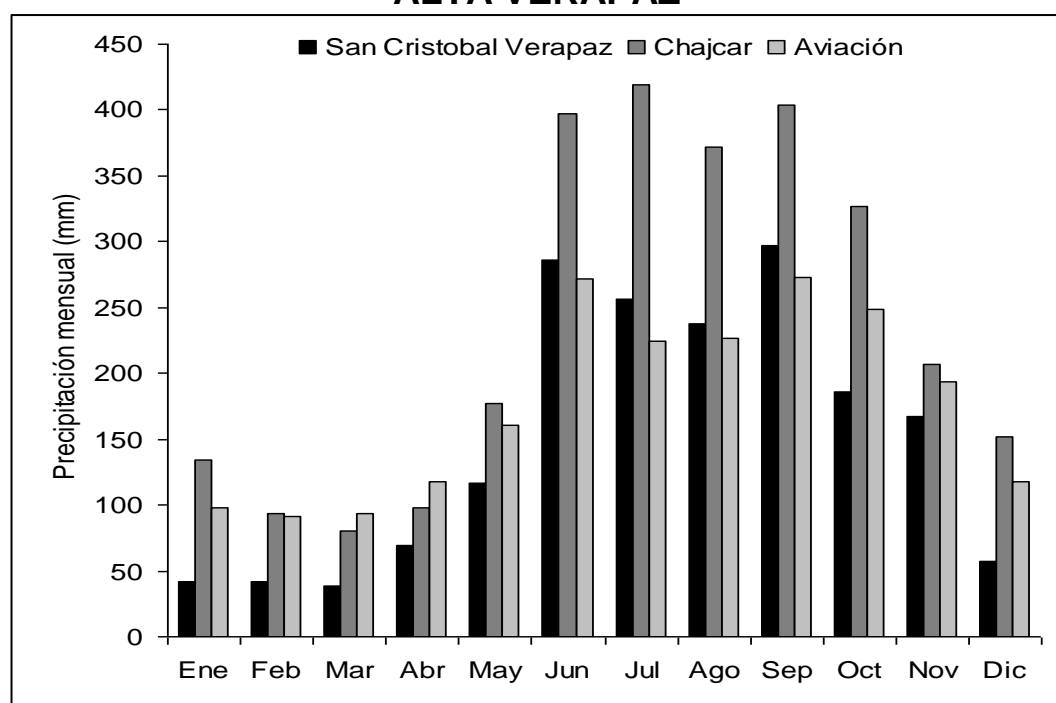
El clima de Guatemala es húmedo y tropical con variaciones de acuerdo a la posición geográfica. La zona de Alta Verapaz está influenciada por la celda de alta presión del Atlántico (*Wang and Enfield, 2003*). De manera general, la circulación atmosférica está dominada por los vientos alisios y la zona intertropical de convergencia (ZITC) durante el verano boreal. Son diversos los factores que modulan el arribo de humedad y por lo tanto, el clima en Guatemala.

Importantes diferencias en la precipitación pluvial entre verano e invierno establecen el patrón estacional para Alta Verapaz, y en general para Guatemala (figura 4), con un periodo de lluvias comprendido entre los meses de Mayo y Noviembre, y una estación semi-seca entre diciembre y abril, resultado de la influencia directa de la migración de la ZITC y en menor grado, la influencia de incursiones polares invernales (nortes).

La época de lluvias presenta una sequía de verano (canícula) similar a la descrita para el sur de México (*Magaña et al., 1999*), que es el resultado de fluctuaciones en la intensidad y localización de la ZITC en su sector oriental, y es paralelo a cambios en la temperatura del mar en el Pacífico, pudiendo afectar la actividad ciclónica en el área. Cabe mencionar que, a pesar de las diferencias en cantidad de precipitación total anual que se observa entre algunas localidades en Guatemala (*INSIVUMEH, 2012*), la distribución general de lluvia a lo largo del año es similar en todo el país, lo que implica que a pesar de la influencia que

pueden tener los microclimas en la cantidad de lluvia, los patrones generales de lluvia se encuentran modulados por los procesos arriba mencionados.

FIGURA 4
PRECIPITACIÓN PLUVIAL EN EL DEPARTAMENTO DE ALTA VERAPAZ



Fuente: Vásquez Hernández, Osmin J. *Análisis de datos hidrometeorológicos de Alta Verapaz para la elaboración de un modelo de Cambio Climático*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala, 2004.

1.11 Grutas del Rey Marcos

La cueva del Rey Marcos se localiza dentro de la formación de roca caliza denominada Cobán, estas son una red de cavidades kársticas que se forma debido a la interacción de agua meteórica con este tipo de roca. Las Grutas del Rey Marcos como se le llama turísticamente, son descubiertas alrededor del año 1998. La interacción humana en la caverna con agentes externos como la luz, contaminación, etc, afectando de esta forma al sistema cerrado al cual se debe formar una estalagmita

adecuada para este tipo de estudios. En la fotografía 1 se observa el interior de la caverna, en una zona de formación de espeleotemas.

FOTOGRAFÍA 1

VISTA DEL INTERIOR DE LAS GRUTAS DEL REY MARCOS



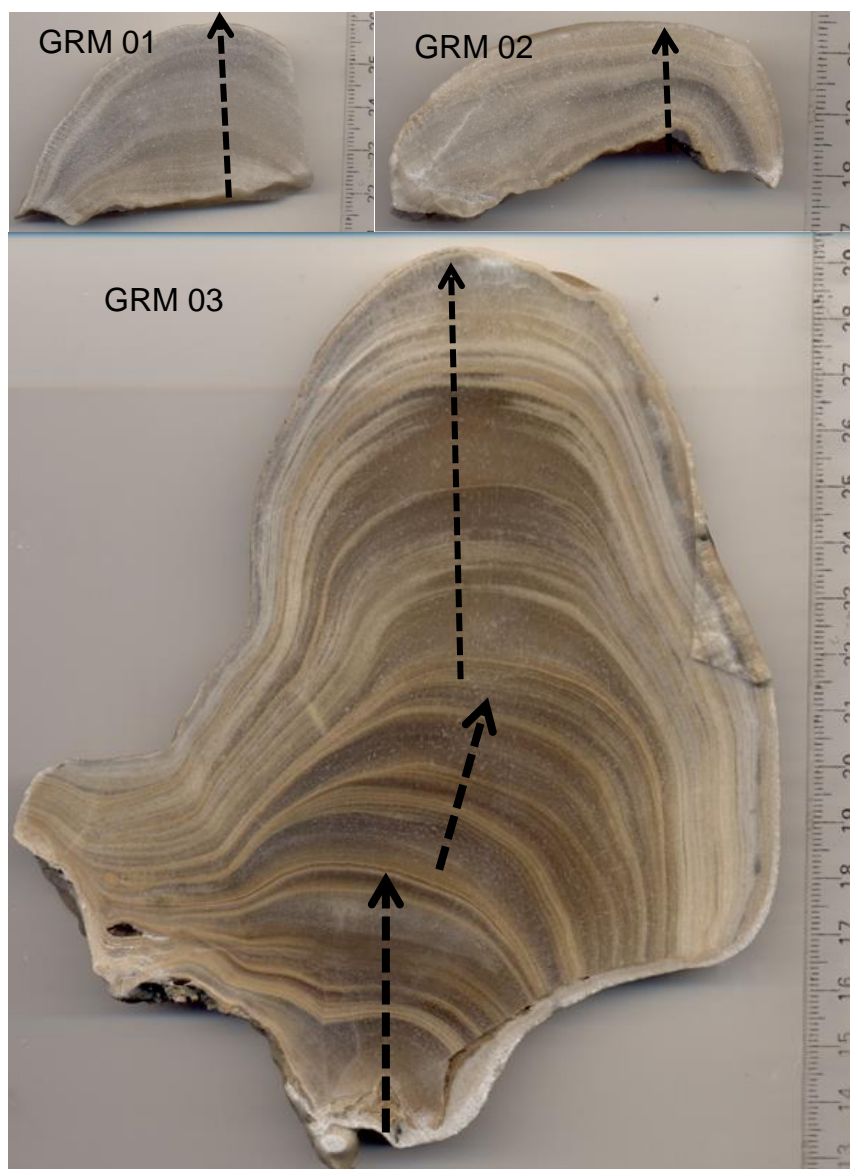
Tomada por: Otto Chavarría, junio de 2016.

1.11.1 Monitoreo de la cueva

En agosto del 2011 se colectaron 3 estalagmitas de las grutas del Rey Marcos, las cuales presentan las características adecuadas para realizar una reconstrucción paleoclimática de alta resolución temporal. Dichas muestras (figura 5) presentan una textura interna que sugiere la presencia de un bandeo anual; un factor importante para el estudio de eventos climáticos de alta frecuencia. Todas las muestras se han analizado por ICPMS por su contenido de U y Th y los resultados indican que pueden ser datadas por el método U/Th (Hernández-Mendiola et al., 2011; van Calsteren and Thomas, 2006) en el centro de Geociencias de la UNAM por tener contenidos bajos de ^{232}Th detrítico. Las muestras GRM 01 y GRM 02 fueron recolectadas en posición de crecimiento,

mientras que la muestra GRM 03 no estaba en crecimiento durante su recolección.

FIGURA 5 SECCIONES TRANSVERSALES DE ESTALAGMITAS COLECTADAS EN LAS GRUTAS DEL REY MARCOS



Fuente: Investigación de campo, 2012.

En la Figura 5 se exponen las secciones de las muestras colectadas en las grutas del Rey Marcos, las flechas ilustran los ejes de crecimiento de cada estalagmita.

Durante la colección de las muestras, se realizó un monitoreo de la cueva, en 8 distintas zonas de la misma, las cuales se seleccionaron según las distintas características que habían en la caverna, como por ejemplo, generación de espeleotemas, mayor goteo, etc., al igual se seleccionaron las zonas de muestreo de estalagmitas.

Se tomaron distintos parámetros de referencia CO₂, temperatura porcentaje de humedad relativa (%RH) y presión atmosférica (P_{atm}), los cuales sirven para tener una idea del comportamiento del clima de la caverna y las variaciones que hay dentro de esta, dichos datos son presentados en los cuadros 1 al 8.

CUADRO 1
MONITOREO DE CAVERNA (AFUERA DE LA
CUEVA A LAS 12:00HRS)

Afuera de la cueva a las 12:00hrs	
CO ₂	280ppm
Temperatura	29,4 °C
%RH	68.4%
P atm	862 HPa

Fuente: Investigación de campo, 2013.

CUADRO 2
MONITOREO DE CAVERNA (ENTRADA CUEVA)

Entrada cueva	
CO ₂	998 ppm
Temperatura	24.9 °C
%RH	68.4
P atm	862 HPa

Fuente: Investigación de campo, 2013.

CUADRO 3
MONITOREO DE CAVERNA (ZONA DE
RECOLECCIÓN DE GRM 03 - JUNTO A LAGUNA DE
PATOS)

Junto a laguna de patos	
CO ₂	1622 ppm
Temperatura	21.5 °C
%RH	75%
P atm	860 HPa

Fuente: Investigación de campo, 2013.

CUADRO 4
MONITOREO DE CAVERNA (CRUZANDO EL RÍO)

Cruzando el río	
CO ₂	1230 ppm
Temperatura	20.7 °C
%RH	79.6 %
P atm	860 HPa

Fuente: Investigación de campo, 2013.

CUADRO 5
MONITOREO DE CAVERNA (PASANDO EL
SANTUARIO)

Pasando el santuario	
CO ₂	1309 ppm
Temperatura	22.5 °C
%RH	72.6 %
P atm	859 HPa

Fuente: Investigación de campo, 2013.

CUADRO 6
MONITOREO DE CAVERNA (ZONA DE
RECOLECCIÓN DE GRM 01 - EN LA PARED)

G1 (en la pared)	
CO ₂	1498 ppm
Temperatura	19.5 °C
%RH	85.9 %
P atm	858 HPa

Fuente: Investigación de campo, 2013.

CUADRO 7
MONITOREO DE CAVERNA (ZONA DE
RECOLECCIÓN DE GRM 02 - RÍO, EN EL PUENTE)

G2 (Río, en el puente)	
CO ₂	1694 ppm
Temperatura	17.7 °C
%RH	96.8 %
P atm	858 Hpa

Fuente: Investigación de campo, 2013.

CUADRO 8
MONITOREO DE CAVERNA (SALIDA A LAS
17:05HRS)

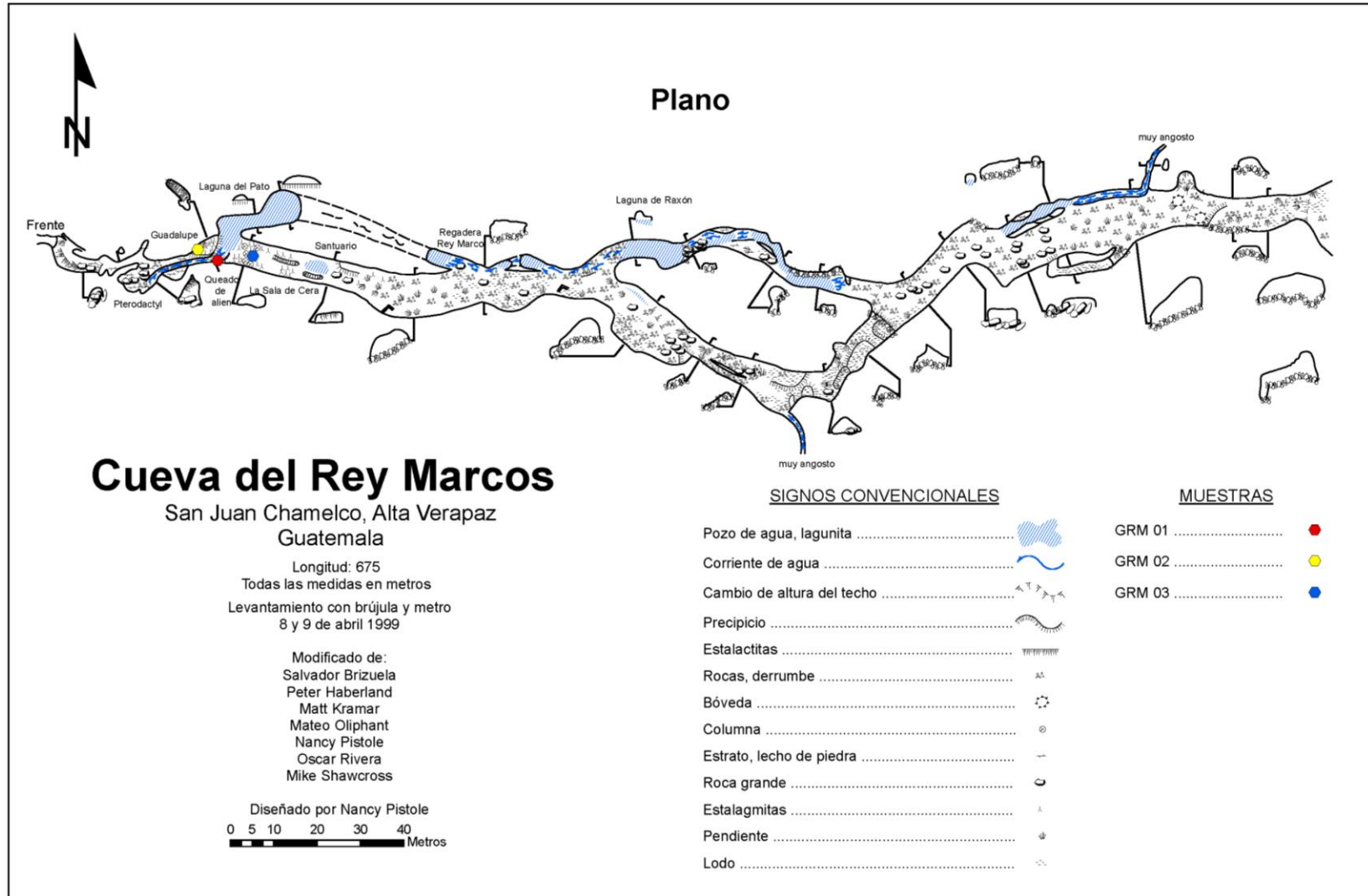
Salida a las 17:05hrs	
CO ₂	
Temperatura	21.4 °C
%RH	83.4 %
P atm	860 HPa

Fuente: Investigación de campo, 2013.

1.11.2 Mapa y perfil

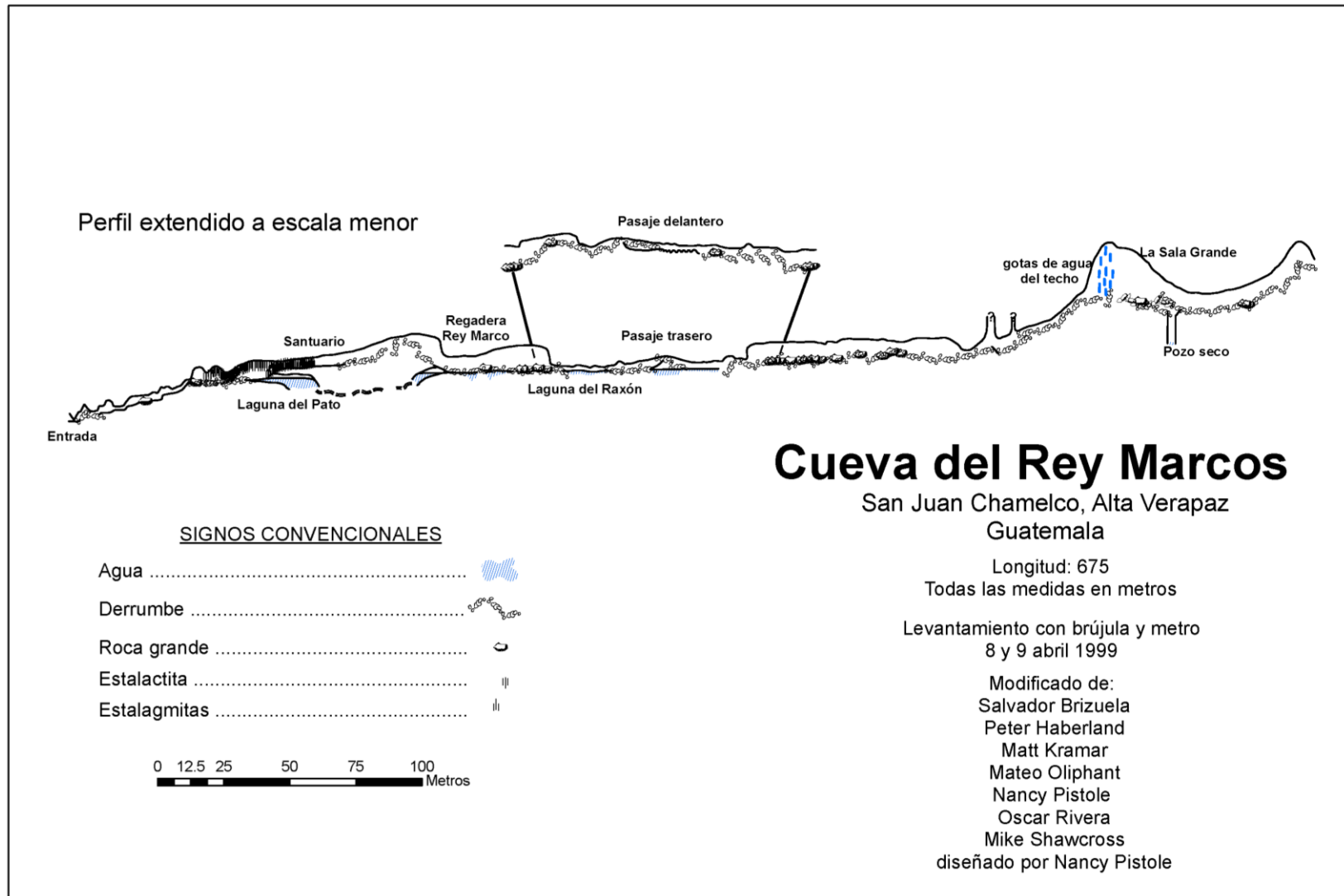
En las figuras 6 y 7 se muestra el mapa de la caverna y el perfil de la misma (en anexos se adjuntan ambos planos a mayor detalle).

FIGURA 6
MAPA DE LAS GRUTAS DEL REY MARCOS



Fuente: Modificado de Nancy Pistole, 1999.

FIGURA 7
PERFIL DE LAS GRUTAS DEL REY MARCOS



Fuente: Modificado de Nancy Pistole, 1999.

1.12 Glosario

- ESTALAGMITA: espeleotema que crece bajo un goteo en el interior de una cueva y que tiene la característica de ser la única espeleotema que crece de abajo hacia arriba, por lo que cuenta con una estratigrafía ordenada y pocas veces alterada.

Las estalagmitas cálcicas son uno de los archivos de condiciones paleohidrológicas y paleoambientales continentales más robustos con los que se cuenta en la actualidad (*Fairchild et al., 2006; Lachniet, 2009*), esto debido a la relativa facilidad y alta precisión con la que pueden ser fechados (*Richards and Dorale, 2003*), la capacidad de permanecer como archivos cerrados por largos periodos de tiempo (*Ayliffe et al., 1998; Wang et al., 2001; Winograd et al., 1992*), así como la posibilidad de ofrecer información paleoclimática con resolución sub-estacional (*Borsato et al., 2007; Fairchild et al., 2001; Treble et al., 2003*).

A partir de las variaciones en la composición isotópica de O y C en el carbonato de la estalagmita, es posible inferir variaciones en el origen y cantidad de la precipitación pluvial, como el resultado de la variabilidad climática durante el periodo de crecimiento de la estalagmita (*Lachniet, 2009*).

Por otra parte, variaciones en la composición de algunos elementos traza (Mg, Sr, Ba, Si, P, U) en la estalagmita han sido utilizados como trazadores de los procesos pedológicos e hidrológicos que ocurren en el epikarst, los cuales también son resultado de las condiciones ambientales imperantes a nivel regional al tiempo de la deposición de la calcita (*Aliaga-Campuzano et al., 2009; Apóstegui et al., 2010; Baldini et al., 2002; Bernal et al., 2006; Fairchild et al., 2001; Fairchild and Treble, 2009; Hernández-Mendiola et al., 2007; Huang et al., 2001; Treble et al., 2003*)

- *LA-ICPMS*: La ablación láser como sistema de introducción de muestra a la espectrometría de masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo (*LA-ICP-MS*), técnica analítica que permite el análisis elemental de muestras sólidas con alta resolución espacial ($\sim 5 \mu\text{m}$) y con altos niveles de sensibilidad. Debido a esto permite identificar variaciones en composición elemental bajo un contexto textural y espacial con alta resolución y por lo tanto, permite entender procesos a microescala de distribución de elementos traza e isótopos.
- *Paleoclimatología*: La palabra paleoclimatología se deriva de la raíz griega “paleo” que significa antiguo y del término clima. Busca realizar reconstrucciones de escenarios climáticos pasados basados en sus consecuencias biogeoquímicas y en ocasiones calibrados al comparar con los archivos instrumentales recientes. Dichas reconstrucciones se realizan a partir del estudio de indicadores biogeoquímicos de condiciones ambientales archivados en núcleos de sedimento marino o lacustre, núcleos de hielo, anillos de árbol, suelos, fósiles y estalagmitas.
- *Paleoambiente*: El principio de actualismo exige que las leyes físicas que rigen el medio ambiente en la actualidad son los mismos que en el entorno geológico regularon el pasado. Para paleoambiente significa entonces una reconstrucción, en términos de actualismo, un ambiente que existió en un pasado geológico en el lugar en cuestión. Los fósiles, así como nos da información básica sobre la edad de las rocas, también indican el tipo de entorno en el que se dejó la roca que contiene el propio fósil. Esta información, junto con el tipo de roca que se origina a partir de un sedimento disuelto fácilmente identificable, no es suficiente para reconstruir con buena precisión el paleoambiente en el momento de la deposición de sedimento en sí.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

2.1 Método

Las estalagmitas colectadas fueron fechadas por series U en el laboratorio de estudios isotópicos del Centro de Geociencias, UNAM, con lo que se construyó un modelo de edades que permite establecer una relación matemática entre la distancia desde la punta y la edad de cada punto sobre el eje de crecimiento.

Asimismo, las estalagmitas fueron seccionadas y se obtuvieron bloques alrededor del eje de crecimiento. Dichos bloques (de aproximadamente 7 x 2.5 cm), fueron analizados a lo largo del eje de crecimiento utilizando LAICPMS (fotografía 2). Se analizaron las variaciones en Mg/Ca, Sr/Ca, Ba/Ca, U/Ca, P/Ca, Th/Ca, Zn/Ca, Na/Ca, entre otros, utilizando un haz de laser de 20 μm con una frecuencia de 5 Hz.

A partir del modelo de edades se construyeron series de tiempo de la variabilidad de las relaciones elementales arriba mencionadas, fueron comparados con otros archivos paleoclimáticos, como se describe en los siguientes apartados.

2.2 Metodología

2.2.1 Recolección de muestras

Para la obtención de estas es necesario seguir un proceso, primero se debe ubicar una caverna, que cumpla con características específicas, como que la entrada no sea de grandes

dimensiones, el lugar de recolección de la estalagmita no sufra de inundaciones y que la caverna se encuentre en formación de estalagmitas, es decir con la capacidad de permanecer como archivos cerrados por largos periodos de tiempo (*Ayliffe et al., 1998; Wang et al., 2001; Winograd et al., 1992*)

La estalagmita recolectada tiene que ser revisada, ya que no puede presentar muestras evidentes de diagénesis, bioturbación, intemperismo, erosión, etc, esto alteraría la información paleoclimática contenida en ella.

2.2.2 Preparación de muestras

Para esta fase, se cortaron a la mitad las estalagmitas de forma longitudinal, a una de las mitades se extrajo una rebanada de 1.5 cm de espesor. Cada una de las rebanadas se cortaron en pedazos que tuvieran una dimensión adecuadas para poder ser analizadas en el *LA-ICPMS*, dichas medidas son: 4 cm de largo, 1 cm de ancho y 0.5 cm de grosor, sobre el eje de crecimiento de cada una. Para las estalagmitas GRM 01 y GRM 02, se cubrieron con un solo fragmento por cada una, mientras que para la GRM 03, fue necesaria dividirla en 7 pedazos debido al tamaño de la misma, los tramos fueron denominados de la letra "A" hasta la "E".

En la Fotografía 2 se muestran como ejemplo, 3 de los 7 fragmentos utilizados para el análisis de GRM 03.

FOTOGRAFÍA 2 FRAGMENTOS PARA ANALIZAR DE GRM 03



Tomada por: Otto Chavarría, 2013.

En cuanto a las muestras que se prepararon para la datación, se llevó un procedimiento diferente, inicialmente se recolecta la muestra mediante microtaladro con fresa de carburo de tungsteno. En cambios de textura y cambio en la orientación del eje de crecimiento, se seleccionaron bandas de crecimiento en las cuales se muestreo a lo largo de estas 200 mg de calcita por cada punto, se inicia dicha recolección desde la base a la punta de la estalagmita.

2.2.3 Análisis geoquímico

a. Datación

Para realizar la datación se utilizó la metodología propuesta por *McCulloch & Mortimer* et al (2008), la cual consiste básicamente en disolver el carbonato en HNO_3

seguido de la adición de un estándar interno de ^{229}Th - ^{233}U de concentración y composición isotópica conocida.

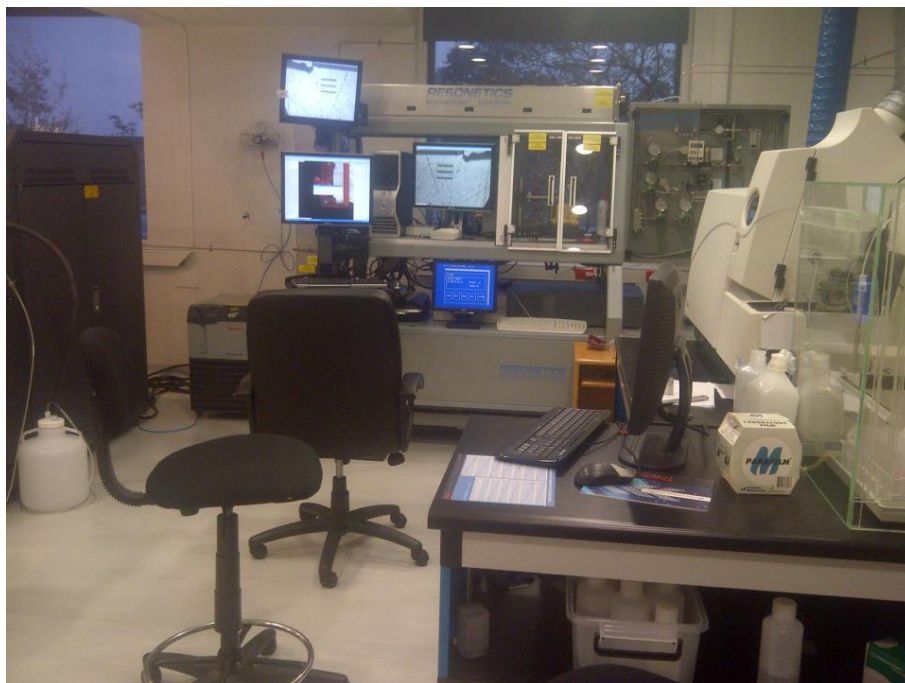
Las fracciones de Th y U son extraídas y casi completamente separadas usando, una columna de intercambio iónico específica *TRU SPEC* con una combinación de 0.1 M HCl para coleccionar la fracción de Th, seguido por 0.1 M HCl + 0.3 M HF para coleccionar la fracción de U. Las distintas fracciones se llevaron a sequedad y se redisolviéron en HNO_3 al 2% antes de ser introducidas al *MCICPMS*. (McCulloch & Mortimer, 2008).

Las muestras al ser analizadas por *MCICPMS*, se logra cuantificar por dilución isotópica ^{230}Th , ^{234}U y ^{238}U . Las edades se calcularán a partir de las relaciones de actividad isotópica [$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$] y [$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$] utilizando las ecuaciones generales de desequilibrio. La metodología en general se detalla en publicaciones internacionales (Hernández-Mendiola et al., 2011).

b. LA-ICPMS

Luego de tener las muestras listas, se procedió con el análisis el cual se llevó a cabo con el sistema *LA-ICPMS*, el funcionamiento de este equipo es detallado en el apartado 1.12. En la fotografía 3 se observa el laboratorio donde se encuentra instalado el *LA-ICPMS*.

FOTOGRAFÍA 3 LA-ICPMS



Tomada por: Otto Chavarría, 2013.

Para analizar las muestras se utilizó una metodología con la cual se asegura la fidelidad de los datos, esta consistía en colocar dos estándares antes y después de cada fragmento a analizar (Fairchild et al., 2006; Lachniet, 2009). También es importante mencionar que en cada muestra se analiza de la punta o lo más cercano a la punta hacia la base o más cercano a la base.

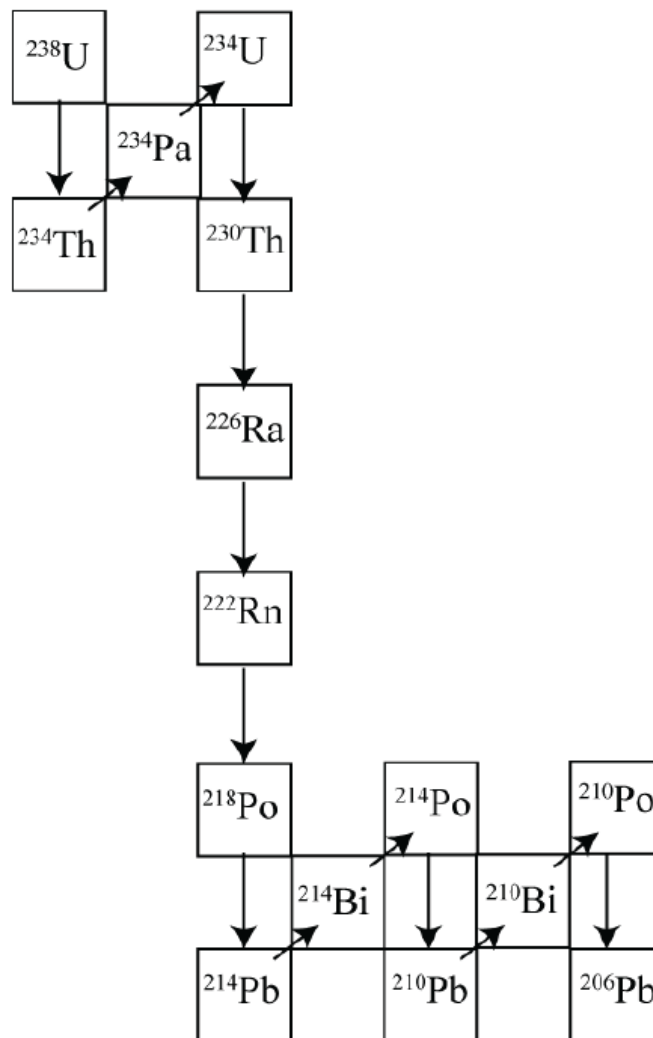
2.2.4 Datación Isotópica

Para conocer las edades de la estalagmita GRM 03, se analizó isótopos radioactivos de la serie radiactiva del ^{238}U con un espectrómetro de masas. Dicho análisis consiste en evaluar la cantidad de ^{238}U , ^{234}U y ^{230}Th presentes en los espeleotemas. Se debe hacer la suposición de que todo el ^{230}Th proviene de la desintegración radiactiva del ^{234}U incorporado en las rocas,

podemos inferir la edad absoluta de la fase mineral (Bernal et al., 2010).

En la figura 8, se muestra la cadena de desintegración del ^{238}U , las flechas en vertical indican una desintegración α las flechas que apuntan hacia la esquina superior derecha, indican un decaimiento en β^+ .

FIGURA 8
CADENA DE DESINTEGRACIÓN DEL ^{238}U



Fuente: Bernal, Juan P., Revisión a algunos geocronómetros radiométricos aplicables al Cuaternario. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 62: 305-323.

Esta suposición se puede hacer cuando se trate de un sistema de baja temperatura, ya que en este tipo de sistemas la diferencia de solubilidad del U y Th es muy grande, el U presenta una solubilidad alta mientras que el Th tiene una solubilidad baja, por lo tanto esto nos indica que es muy fácil la incorporación del U y muy difícil la incorporación del Th (Bernal et al., 2010).

También se debe considerar la incorporación de material detrítico a la estalagmita, dicho material acarrea materia orgánica y arcillas, estas a su vez pueden contener isótopos de Th, siendo el más común el ^{232}Th , que es progenitor de otra serie radiactiva natural. La presencia de este isótopo nos indica contaminación en la fase mineral y probablemente este acompañado de ^{230}Th (Bernal et al., 2010).

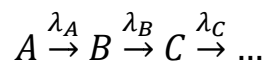
Por lo anterior, hay que tomar en cuenta que no todo el ^{230}Th presente en la muestra es producto de la desintegración del ^{234}U y aunque pueden realizarse correcciones, es preferible fechar muestras sin contaminación de Th (Bernal et al., 2010).

La datación de las estalagmitas, se realizó en el laboratorio de estudios isotópicos del centro de Geociencias de la UNAM y la datación estuvo a cargo el *PhD.* Juan Pablo Bernal Uruchurtu; siguiendo la siguiente metodología tanto para la preparación, como para el respectivo análisis isotópico:

- Se muelen 10 mg de muestra y seguidamente se disuelve en ácido nítrico al 10%.
- Se lleva a sequedad, se añade peróxido para destruir cualquier rastro de materia orgánica y se lleva nuevamente a sequedad.

- Se le añaden cantidades conocidas de los isótopos ^{233}U y ^{229}Th que funcionan como trazadores.
- La muestra se pasa por columnas de intercambio iónico donde se purifica el U y Th, posteriormente se separan en fracciones distintas.
- Estas fracciones se analizan con espectrometría de masas con plasma *MC-ICPMS* en un equipo *Neptune Plus Thermo-Finnigan* donde el ^{234}U y el ^{230}Th se miden con multiplicador de electrones, los otros isótopos, ^{238}U , ^{233}U , ^{232}Th y ^{229}Th , se miden con copas de Faraday.
- Para el cálculo de las edades se utilizan constantes de decaimiento de Cheng (2013).

Para describir de una forma más sencilla el decaimiento radioactivo de las series de ^{238}U - ^{234}U - ^{230}Th , se utilizan las siguientes expresiones matemáticas (Bernal et al., 2010):



Donde A, B y C son los isótopos ^{238}U , ^{234}U y ^{230}Th respectivamente y λ la constante de decaimiento.

La tasa de decaimiento de A esta dada por:

$$-\frac{dN_A}{dt} = \lambda_A N_A$$

Donde λ_A es la constante de decaimiento de A y N_A el número de átomos de A al tiempo de t. La resolución de esta ecuación en función del tiempo $N_A=f(t)$ es:

$$N_A = N_A^0 e^{-\lambda_A t}$$

Seguendo este principio y luego de hacer las sustituciones tanto de los isótopos de B como de C, y resolver las ecuaciones diferenciales correspondientes, se llega a la siguiente ecuación (Bernal et al., 2010):

$$\left[\frac{^{230}\text{Th}}{^{238}\text{U}} \right] = 1 e^{\lambda_{230} t} + \frac{\lambda_{230}}{\lambda_{230} - \lambda_{234}} * \left(\frac{\delta^{234}\text{U}}{1000} \right) * (1 - e^{-(\lambda_{234} - \lambda_{230}) t})$$

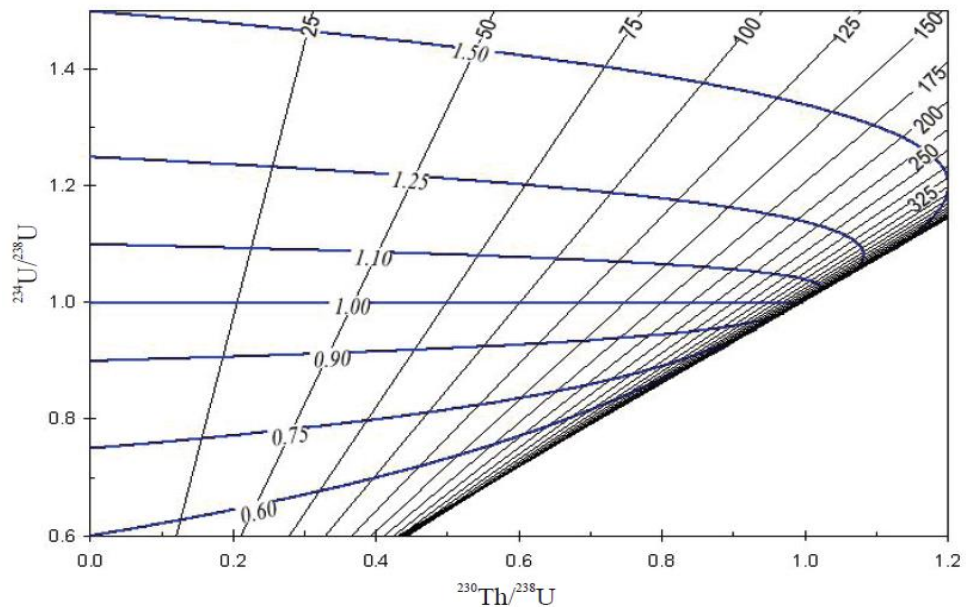
Ecuación 1

Esta ecuación calcula el tiempo (t) desde que comenzó a decaer el isótopo B, es decir la edad desde que se comenzó a fraccionar el isótopo ^{234}U y por lo tanto la edad de cristalización de nuestra fase mineral.

De la anterior ecuación no es posible despejar el tiempo (t), por lo que se aplican modelos numéricos que asignan valores al tiempo (t) hasta que se cumple la igualdad de dicha ecuación y de esta manera obtener la edad de la muestra.

También se puede utilizar otro método, el cual consiste en obtener una edad aproximada de la muestra utilizando una solución gráfica de la ecuación anterior (figura 9). Esta corresponde a una solución gráfica de la ecuación 1. Las líneas verticales y semi-verticales representan isócronas mientras que las curvas representan la evolución de la relación $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ respecto al tiempo y a la relación $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ (Bernal et al., 2010).

FIGURA 9
SOLUCIÓN GRÁFICA DE LA ECUACIÓN 1



Fuente: Bernal, Juan P., *Revisión a algunos gocronómetros radiométricos aplicables al Cuaternario*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 62. (03/2010): pag. 305-323.

2.2.5 Reducción de datos de LA-ICPMS

Luego de analizar las muestras, se continúa a procesar los datos dados por el LA-ICPMS, estos son dados en la dimensional CPS (cuentas por segundo). El primer paso que se hace, es eliminar al ruido instrumental *background*, comprendido por los primeros y últimos 20 segundos aproximadamente, donde el espectrómetro de masas no está analizando la muestra; al realizar este proceso se asegura que con los datos con los que trabajemos van a ser únicamente los producidos por la ablación de la muestra.

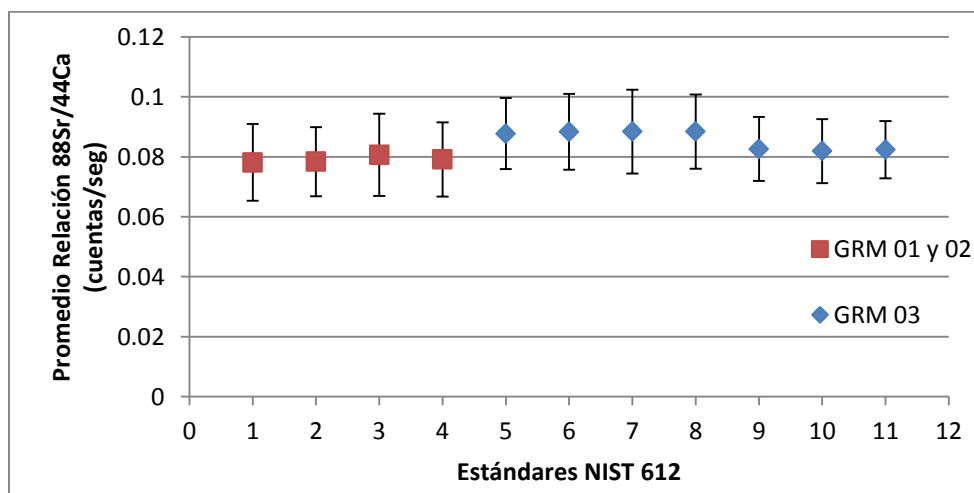
El siguiente paso que se realizó fue obtener la relación elemental contra cada uno de los isótopos de calcio analizados (^{44}Ca , ^{46}Ca y ^{48}Ca) para los dos estándares NIST 612 y 614, se

procedió a obtener la desviación estándar por cada vez que se midieron los estándares en cada análisis, seguidamente se realizó una gráfica del promedio de relación E/Ca vrs. las veces que el espectrómetro analizó los estándares, y, utilizando las desviaciones estándares de cada material de referencia como barras de error.

Lo anterior se hizo con el fin de saber la intensidad y/o diferencia de intensidad con la que está midiendo el *LA-ICPMS*, cada vez que se cambia de muestra. De igual forma, dichas gráficas se utilizaron para comparar los distintos comportamientos de las relaciones de los elementos con los distintos isótopos de calcio analizados y con esto poder determinar el isótopo que se utilizaría para los siguientes análisis.

A continuación, se presenta en la gráfica 1 la intensidad de ^{88}Sr relativa al ^{44}Ca en 11 mediciones independientes del material de referencia NIST SRM 612.

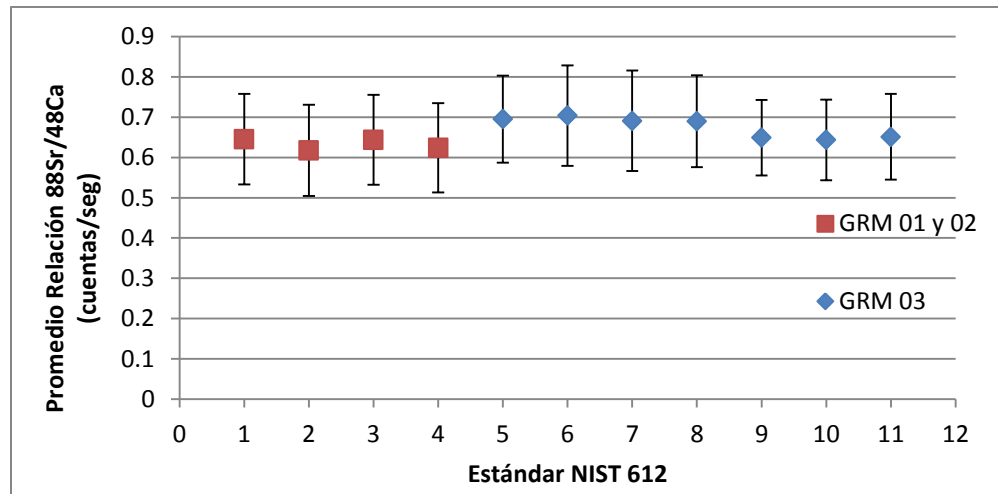
GRÁFICA 1
PROMEDIO DE RELACIÓN DE ($^{88}\text{Sr}/^{44}\text{Ca}$) VRS.
ESTÁNDAR NIST 612



Elaboración propia: Otto Chavarría, 2013.

Mientras que en la gráfica 2 se muestra también la relación del ^{88}Sr pero ahora contra ^{48}Ca .

GRÁFICA 2
PROMEDIO DE RELACIÓN DE (^{88}Sr ^{48}Ca) VRS.
ESTÁNDAR NIST 612



Elaboración propia: Otto Chavarria, 2013.

Las gráficas anteriores (1 y 2) se realizaron para cada estándar y cada relación de elementos traza con los elementos de calcio, determinándose utilizar la relación con ^{44}Ca , ya que al comparar el comportamiento de las barras de error de cada uno de los calcios, las empleadas en las gráficas del ^{44}Ca , nos arrojaron un grado de incertidumbre menor al que obtuvimos en el resto de isótopos.

Una vez establecido el isótopo de calcio más adecuado, se procedió a hacer la relación con cada elemento de cada muestra.

El siguiente paso realizado consistía en convertir la dimensional de las relaciones con calcio a mmol/mmol, para este paso fue necesario la utilización de los valores de los estándares (material de referencia), los cuales se encuentran en el *NIST SRM 610*, para realizar la conversión se utilizó la siguiente fórmula:

$$\left(\frac{E}{Ca}\right) = \frac{(E/Ca)_{atm}^{STD} * (E/Ca)_{señal}^M}{(E/Ca)_{señal}^{STD}}$$

- E: elemento traza
- Ca: calcio
- STD: estándar
- M: muestra
- atm: material de referencia
- señal: resultados obtenidos en análisis

Luego de tener las relaciones en mmol/mol para cada muestra, se realiza la conversión para cada punto.

Asimismo, el tiempo de adquisición se convierte en distancia tomando en cuenta una velocidad de barrido de 0.5 mm/min (el valor pertenece a *scan rate* del análisis), es decir se multiplican los minutos transcurridos desde iniciado el análisis por el factor de conversión, este proceso se realiza para cada muestra. Luego de tener las distancias para cada estalagmita, se sustituyen por la edad obtenida y las gráficas finalmente quedarán: en el eje “y” las relaciones molares de los elementos traza con el calcio y en el eje “x” las edades correspondientes para ese segmento en el espeleotema.

2.2.6 Representación gráfica

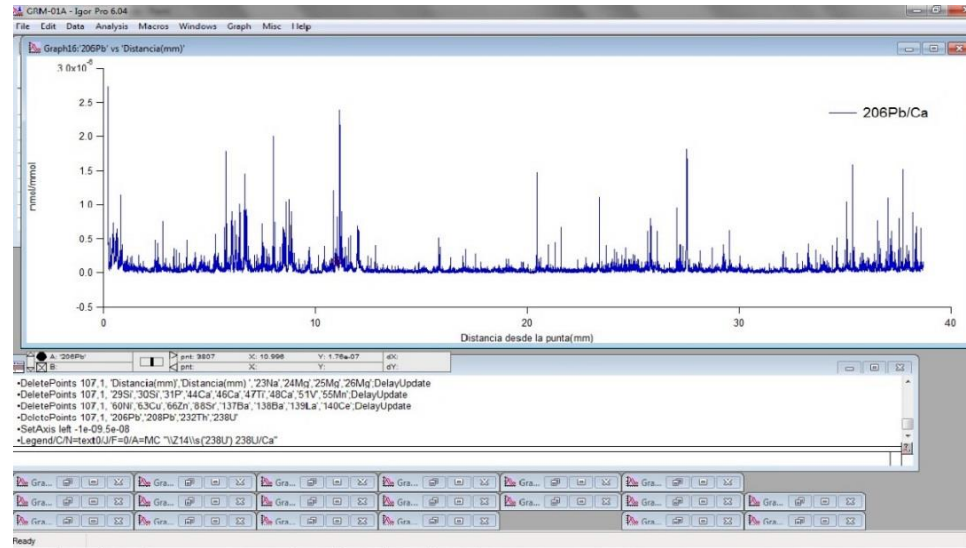
Al contar con todos los valores depurados, el siguiente paso realizado consistía en representar gráficamente cada relación de elementos para cada estalagmita, utilizando el software especializado *IGOR Pro 6*.

Debido a que durante el análisis fue necesario fragmentar las estalagmitas, la implementación de dicho software fue indispensable para correlacionar los datos obtenidos y de esta

forma generar una sola gráfica de cada relación E/Ca por por estalagmita.

En la figura 10 se muestra una vista interior del programa *IGOR Pro 6*.

FIGURA 10
GRÁFICAS EN IGOR PRO 6



Elaboración propia: Otto Chavarría, 2013.

CAPITULO 3

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Descripción petrográfica de la estalagmita

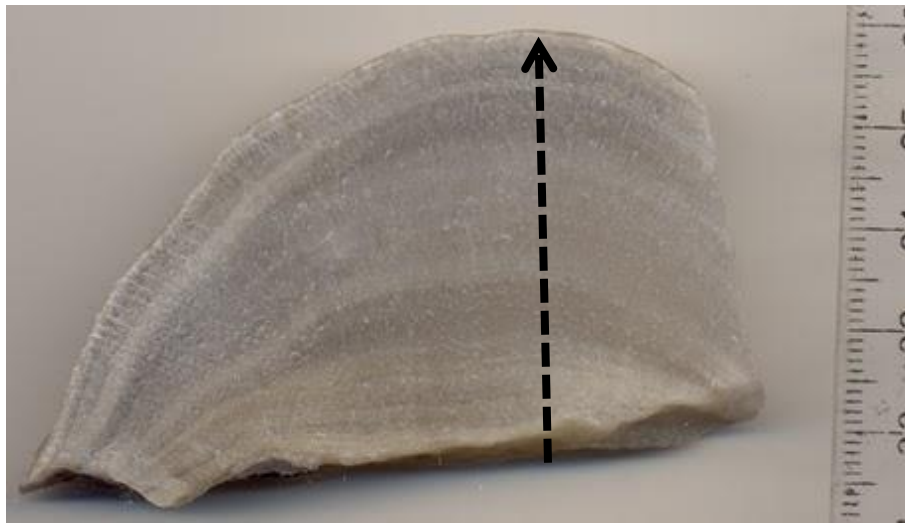
En el siguiente apartado se presenta la descripción macroscópica y microscópica de cada una de las estalagmitas recolectadas.

3.1.1 Muestra GRM 01

Esta muestra fue recolectada en posición de crecimiento, mide 3.9 cm de longitud sobre su eje de crecimiento. Macroscópicamente la estalagmita presenta coloraciones que van de blanco a gris oscuro, con un bandamiento continuo, el eje de crecimiento tiene una sola dirección, es decir no presenta cambios de orientación; no son notorios rasgos de hiatus o de disolución.

Son perceptibles a simple vista, los cristales de calcita que atraviesan las bandas de crecimiento, esto nos indica que el desarrollo de la estalagmita es continuo (fotografía 4).

FOTOGRAFÍA 4 ESTALAGMITA GRM 01

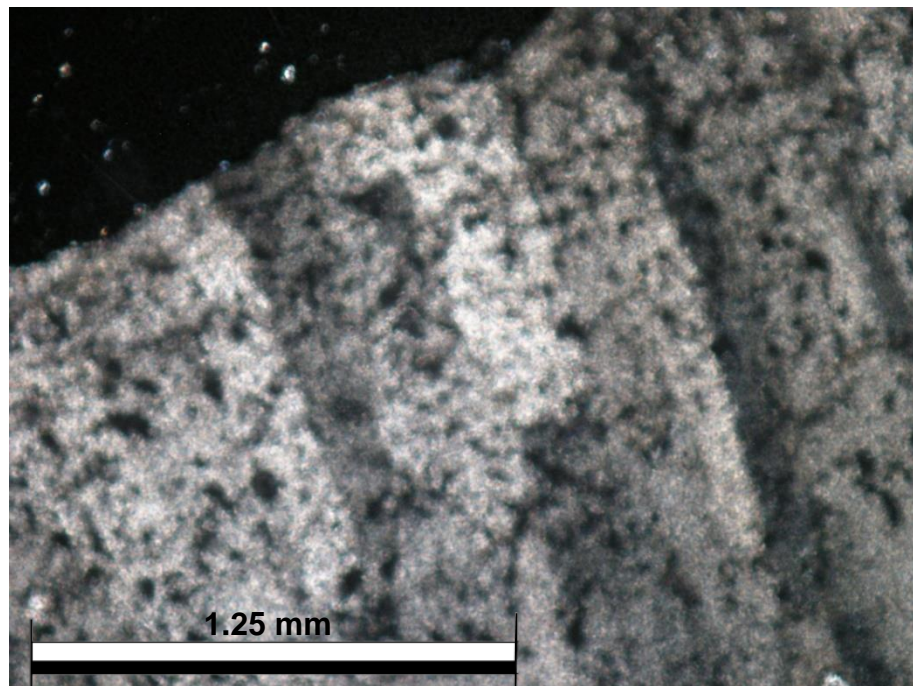


Tomada por: PhD. Juan Pablo Bernal, 2012.

Para el análisis microscópico de esta fue necesaria la realización de una sección delgada la cual se denominó GRM 01-1, en esta se observaron los rasgos más significativos y los cuales son de importancia para el tipo de estudio que se realizó.

En la fotografía 5 podemos observar la punta de la estalagmita en sección delgada, se destacó esta parte debido a que presenta cambios tanto en la morfología de las bandas de crecimiento como en los cristales de calcita, estos últimos se acortan de manera drástica aunque algunos siguieron creciendo hasta el final, la textura nos pudiera estar indicando que la muestra pudo haber sufrido disolución en los últimos años de formación.

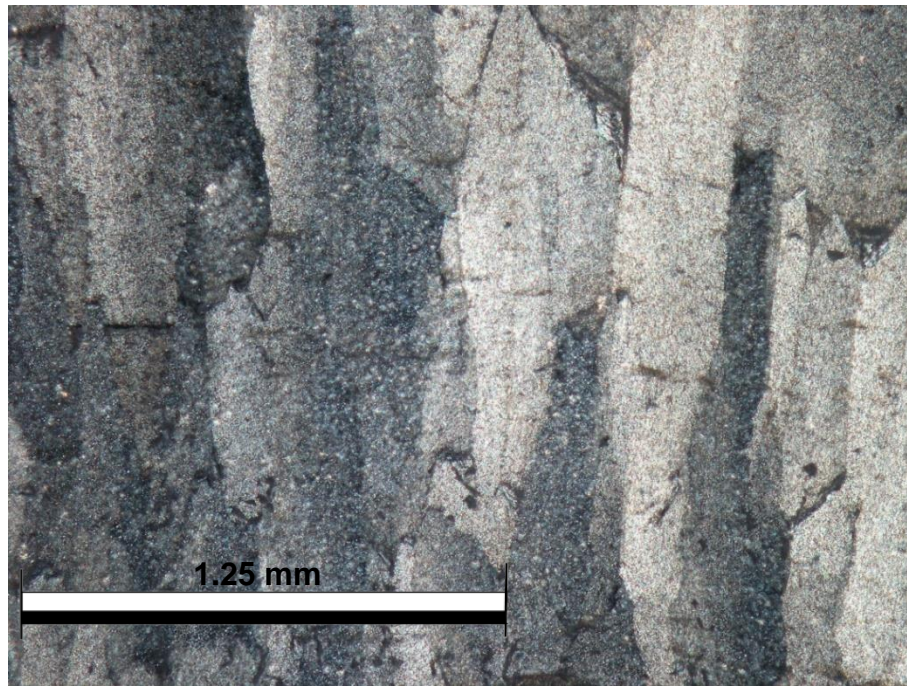
FOTOGRAFÍA 5
PUNTA DE ESTALAGMITA GRM 01-01



Tomada por: Otto Chavarría, 2013. Aumento: 4x. Con Nícoles cruzados (NX).

En la fotografía 6 se logran observar la prolongación de los cristales de calcita, este es un buen indicativo que el crecimiento de la muestra fue continuo.

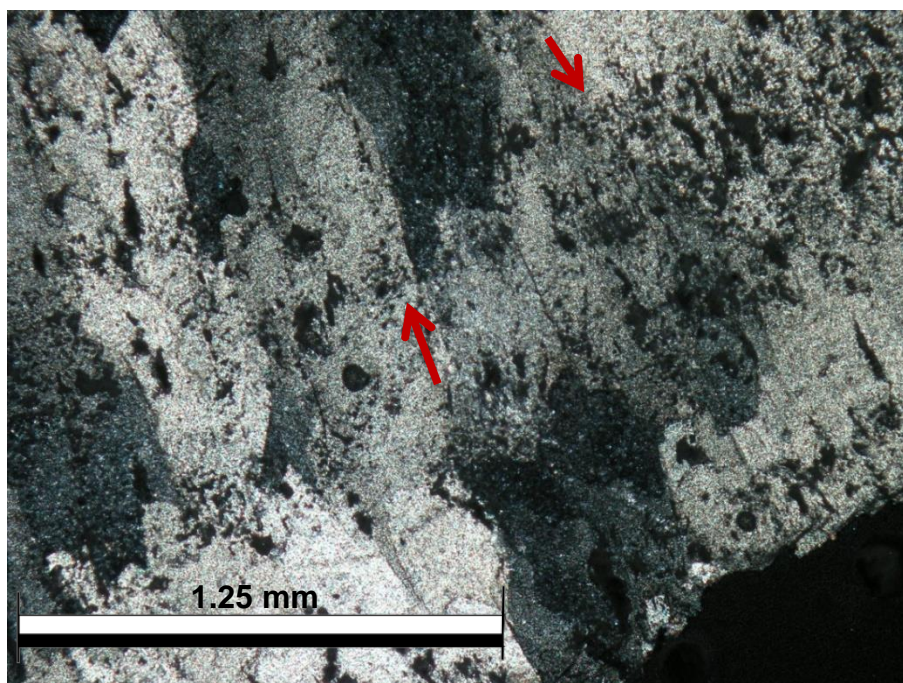
FOTOGRAFÍA 6 CRISTALES DE CALCITA EN ESTALAGMITA GRM 01



Tomada por: Otto Chavarría, 2013. Aumento: 4x. Con Nícoles cruzados (NX).

La base de la estalagmita GRM 01 muestra crecimiento de cristales de calcita desde el inicio, como se muestra en la fotografía 7, las bandas de crecimiento son visibles en la misma (flecha roja).

FOTOGRAFÍA 7 CRISTALES DE CALCITA EN LA BASE DE LA ESTALAGMITA GRM 01



Tomada por: Otto Chavarría, 2013. Aumento: 4x. Con Nícoles cruzados (NX).

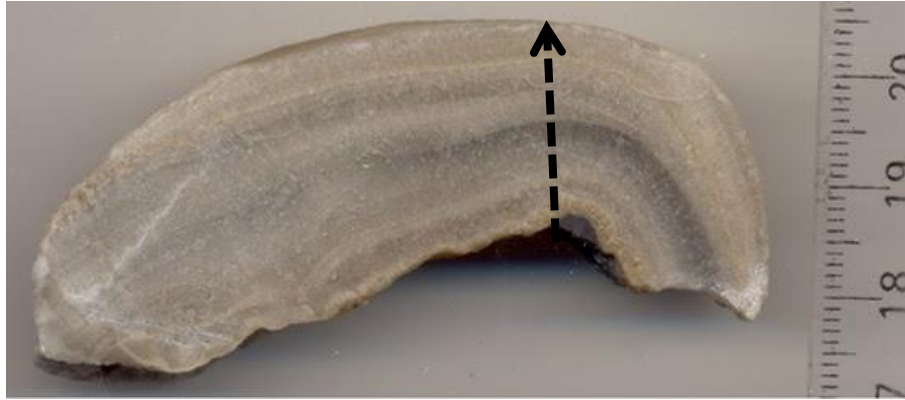
3.1.2 Muestra GRM 02

Esta muestra al igual que la anterior fue recolectada en posición de desarrollo, mide 2 cm de longitud en su eje de crecimiento, es decir la muestra más pequeña de las 3 recolectadas.

Como se observa en la fotografía 8, en la descripción macroscópica se logran apreciar coloraciones que van de blanco a gris oscuro, por los rasgos que presenta el bandeamiento, está tuvo desarrollo continuo, el eje de crecimiento al igual que la muestra anterior no presenta cambios en su dirección, tampoco se aprecia que haya sufrido disolución o que exista algún hiatus. Son perceptibles a simple vista los cristales de calcita que atraviesan

las bandas de crecimiento, esto nos indica que el progreso de la estalagmita fue continuo.

FOTOGRAFÍA 8 ESTALAGMITA GRM 02



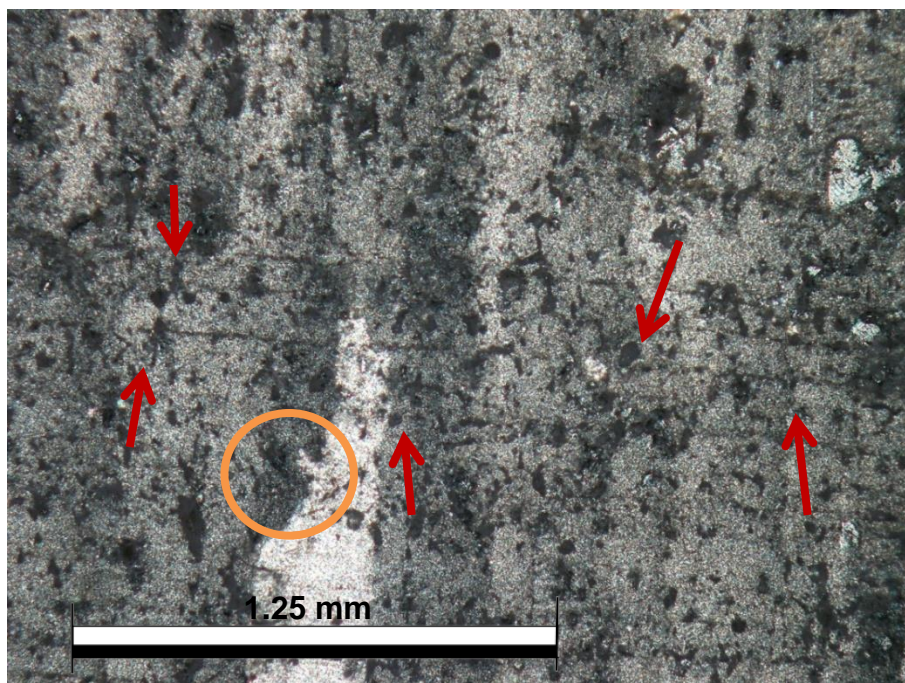
Tomada por: PhD. Juan Pablo Bernal, 2012.

Para la descripción microscópica de esta estalagmita se realizó una sección delgada la cual fue nombrada GRM 02-1, en dicho análisis se describen los rasgos más significativos para este tipo de investigación.

La fotografía 9 fue tomada en la punta de la estalagmita, se puede observar que los cristales de calcita presentan una morfología distinta al crecimiento que llevaban notándose en los límites de los cristales son irregulares (círculo naranja), con lo cual se puede considerar que pudo sufrir de algún proceso químico que la alterara, posiblemente sería disolución.

Con flechas de color rojo se señalan las líneas de crecimiento, estas se encuentran muy continuas, presentan una apariencia de compresión (no muy clara), lo cual nos podría indicar que la muestra pudo haber estado expuesta a disolución.

FOTOGRAFÍA 9 PUNTA DE LA ESTALAGMITA GRM 02-1

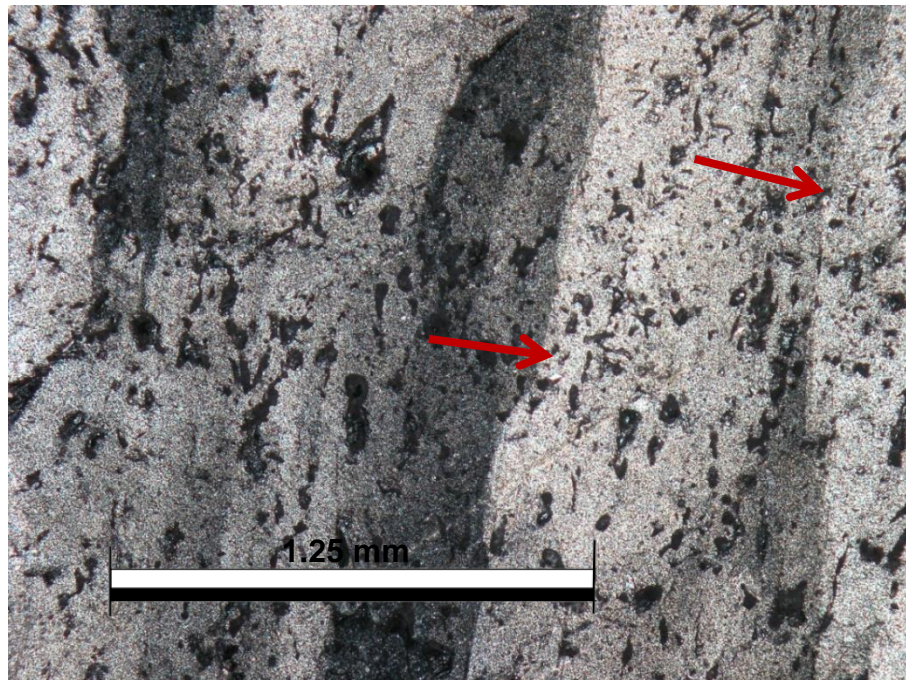


Tomada por: Otto Chavarría, 2013. Aumento: 4x. Con Nícoles cruzados (NX).

En la fotografía 10 se aprecian cristales de calcita atravesando las bandas de crecimiento, estos presentan un buen tamaño y una progresión continua, esto indica que el desarrollo de la muestra fue constante. Se pueden apreciar casi en toda la muestra exceptuando la punta y la base de la misma, donde la morfología de éstos cambió.

En la fotografía 10, con flechas rojas se señalan los límites de algunos cristales de calcita, los cuales nos indican que el crecimiento de los cristales es continuo sin haber sido afectados por algún otro procesos químico como disolución.

FOTOGRAFÍA 10 CRISTALES DE CALCITA EN CRECIMIENTO GRM 02- 1

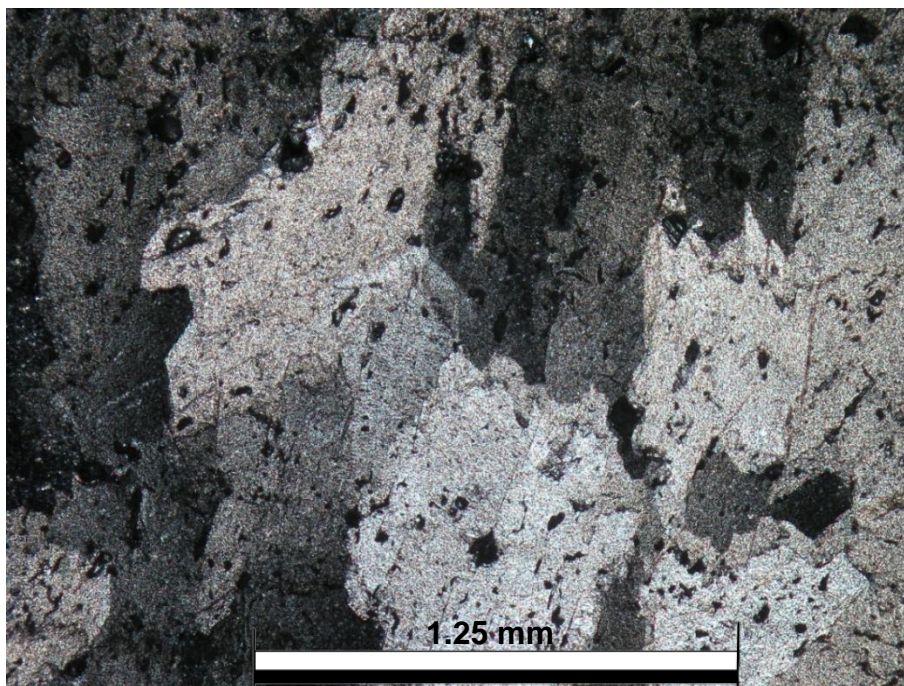


Tomada por: Otto Chavarría, 2013. Aumento: 4x. Con Nícoles cruzados (NX).

La fotografía 11 fue tomada a la base de la estalagmita, esta nos presenta rasgos distintos a los descritos anteriormente en la misma muestra.

Son muy fáciles de apreciar los cristales de calcita, aunque estos no presentan una forma alargada como en la imagen anterior pero si se denota una dirección preferencial en su crecimiento. Estos en la mayoría de sus lados son irregulares por lo cual se percibe que se encuentran en una forma desordenada.

FOTOGRAFÍA 11 CRISTALES DE CALCITA EN CRECIMIENTO EN LA BASE DE GRM 02



Tomada por: Otto Chavarría, 2013. Aumento: 4x. Con Nícoles cruzados (NX).

3.1.3 Muestra GRM 03

Esta muestra cuando fue recolectada no se encontraba in situ, es decir, no se encontraba en posición de crecimiento, su longitud es de 16.2 cm desde la base hasta la punta.

Macroscópicamente la estalagmita presenta las siguientes coloraciones, de blanco a gris oscuro y de café a amarillo, esta estalagmita si presenta cambios en la dirección de su eje de crecimiento, en 3 ocasiones se logran apreciar cristales de calcita que atraviesan las bandas de desarrollo, aunque cabe mencionar que en algunas partes no son tan claros de ver, tal como se puede apreciar en la fotografía 12.

**FOTOGRAFÍA 12
ESTALAGMITA GRM 03**



Tomada por: PhD. Juan Pablo Bernal, 2012.

Para obtener un mejor análisis macroscópico se dividió la descripción en segmentos, que son presentados a continuación:

FOTOGRAFÍA 13 ESTALAGMITA GRM 03, PRIMER SEGMENTO



Tomada por: PhD. Juan Pablo Bernal, 2012.

En la fotografía 13 se señala con un círculo rojo la zona del cambio en el eje de crecimiento, es muy notorio dicho cambio debido a que fue muy abrupto.

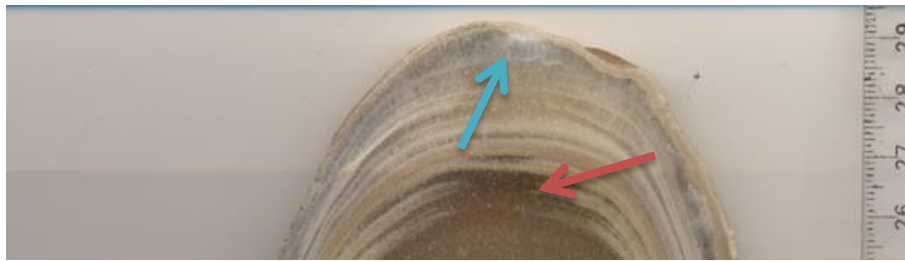
FOTOGRAFÍA 14 ESTALAGMITA GRM 03, SEGUNDO SEGMENTO



Tomada por: PhD. Juan Pablo Bernal, 2012.

El círculo rojo en la fotografía 14 nos señala el segundo cambio en el eje de crecimiento de la estalagmita, la tercera dirección en el eje es muy similar a la primera orientación. El círculo azul nos identifica una zona donde los cristales de calcita no son muy claros de apreciar, este tipo de rasgos pueden ser indicativo de un posible hiato.

FOTOGRAFÍA 15 ESTALAGMITA GRM 03, TERCER SEGMENTO



Fotografía tomada por: PhD. Juan Pablo Bernal, 2012.

En el segmento observado en la fotografía 15 se muestran 2 rasgos significativos, el que es señalado con una flecha roja es una posible zona de hiato o disolución, ya que es muy difícil ver los cristales de calcita que atraviesan las bandas de crecimiento. La flecha de color azul lo que nos señala es la punta de la estalagmita, ya que no es muy claro observar si las bandas son normales o tienen alguna anomalía.

Para el análisis microscópico de esta estalagmita fue necesario realizar 3 secciones delgadas las cuales fueron denominadas GRM 03-1, GRM 03-2 y GRM 03-3, se tuvieron que hacer varias secciones delgadas debido a que la muestra es de mayor tamaño y con esto lograr una descripción detallada sobre sus ejes de crecimiento.

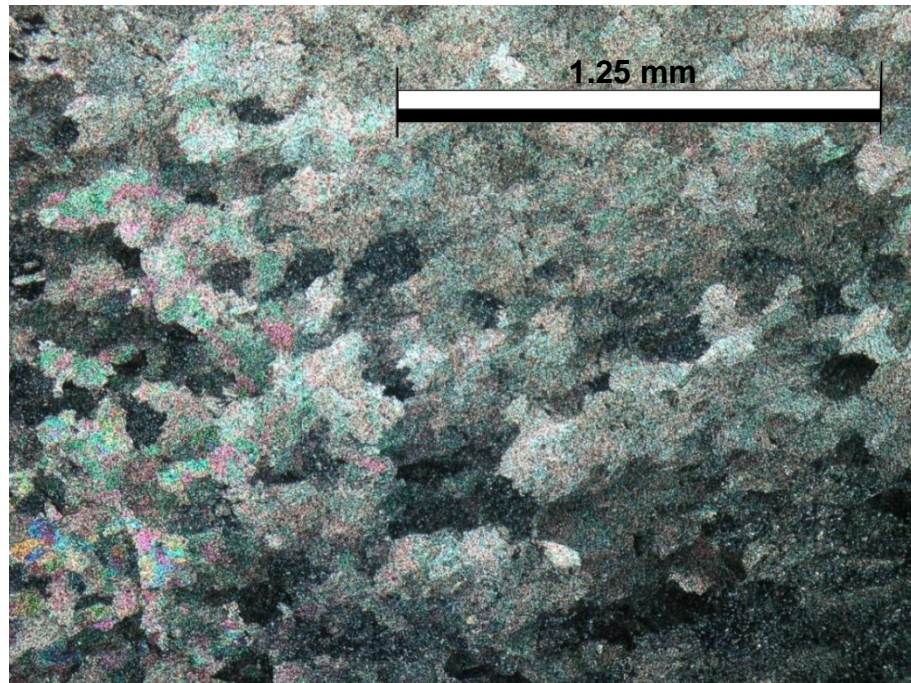
A continuación se describe la sección delgada GRM 03-1, la cual fue hecha de la base a la parte media, en esta se encuentran 2 ejes de crecimiento, predomina el primero que tuvo la estalagmita.

En la fotografía 16 se observa que la base de la estalagmita, esta es muy similar a la de GRM 02, con la diferencia que esta presenta coloraciones, estas se pueden deber a que los

cristales bien formados presentan estos colores, ya que la birrefringencia de la calcita es de 0.172.

Es muy importante observar que aunque los cristales de calcita no presenten un alargamiento extenso su crecimiento tiene una dirección preferencial (sobre el eje de crecimiento).

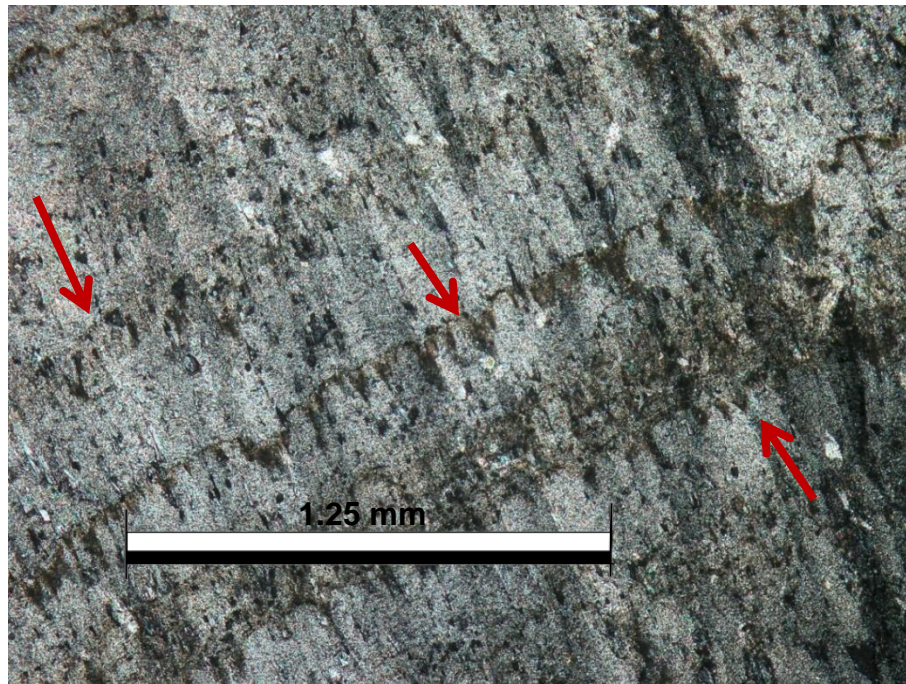
FOTOGRAFÍA 16 CRISTALES DE CALCITA CON COLORACIONES GRM 03-1



Tomada por: Otto Chavarría, 2013. Aumento: 4x. Con Nícoles cruzados (NX).

La fotografía 17, presenta una clara evidencia de cristales de calcita atravesando las bandas de crecimiento (señaladas con flechas rojas), esto indica que el desarrollo de la muestra fue continuo sin sufrir ningún tipo de proceso que lo alterase. Es muy evidente observar una fábrica columnar entre los cristales de calcita.

FOTOGRAFÍA 17 CRISTALES DE CALCITA EN GRM 03-1

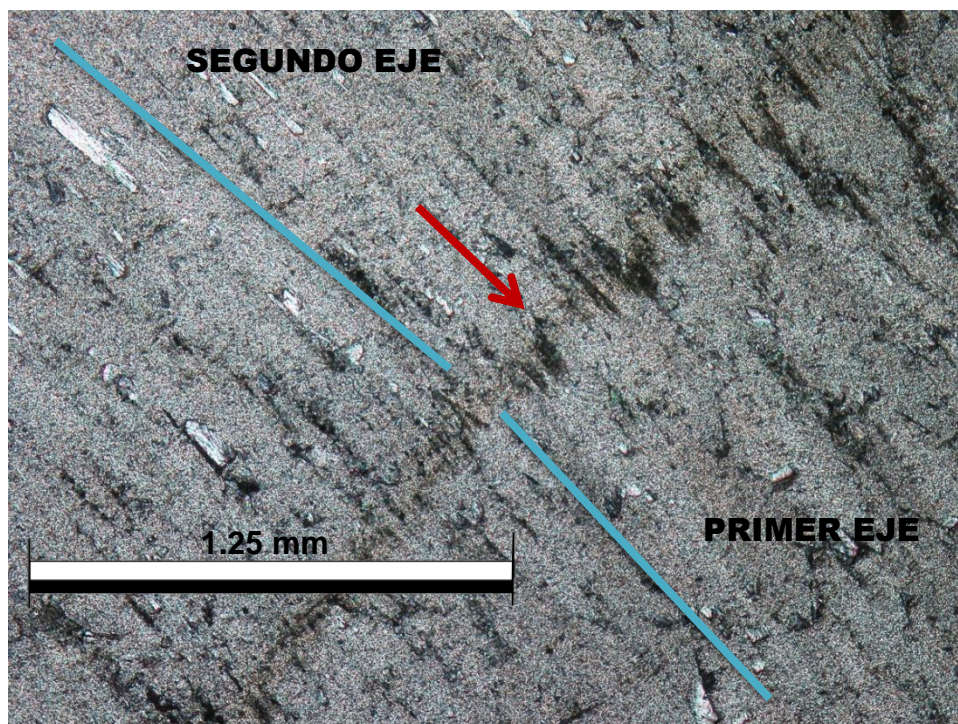


Tomada por: Otto Chavarría, 2013. Aumento: 4x. Con Nícoles cruzados (NX).

La fotografía 18, que se observa a continuación es muy importante, ya que fue tomada en el primer cambio del eje de crecimiento, con una flecha roja se señala justamente la banda de crecimiento donde ocurre el cambio, los cristales de calcita sufren un ligero cambio de orientación en el desarrollo de la segunda fase.

El rasgo que es muy importante resaltar es, el hecho de que los cristales a pesar de sufrir un cambio en su dirección (líneas azules) continuaron con su crecimiento y este es un muy buen indicativo para el tipo de estudio que se realizó. Este cambio de dirección nos sugiere que posiblemente hubo un movimiento sísmico que desplazó la estalagmita.

FOTOGRAFÍA 18 CAMBIO AL SEGUNDO EJE DE CRECIMIENTO GRM 03-1

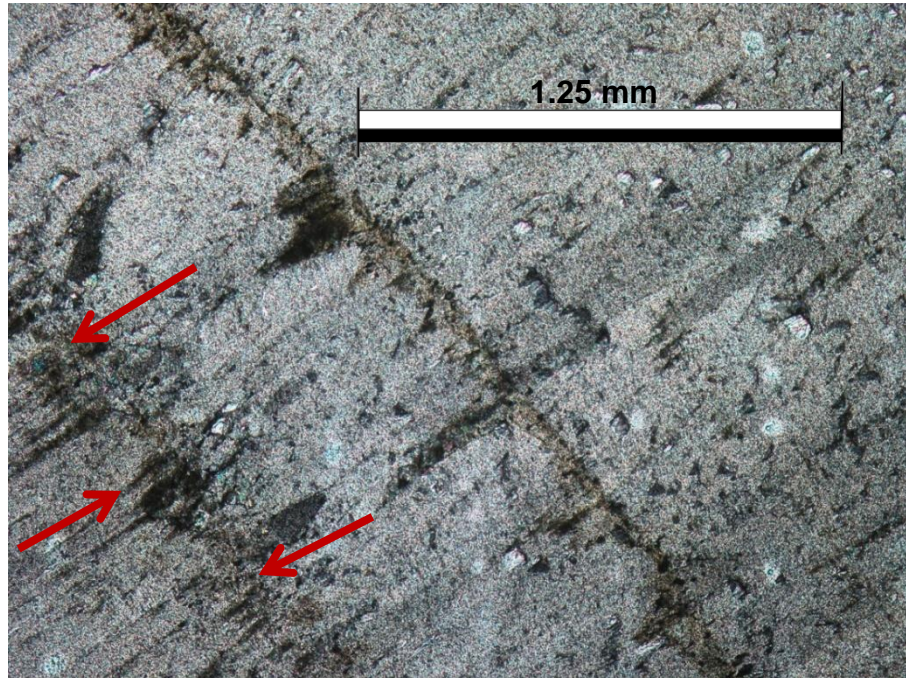


Fotografía tomada por: Otto Chavarría, 2013. Aumento: 4x. Con Nícoles cruzados (NX).

La fotografía 19 denota rasgos de que la muestra pudo presentarnos un posible hiato de crecimiento, aunque los cristales de calcita atraviesan esta zona esto se corroborara en las pruebas químicas a las cuales fue sometida la muestra.

Se cree que este podría ser un hiato debido a que su forma nos indica que las bandas de crecimiento se encuentran muy continuas, y en unas partes pareciera que sufrieron una especie de compresión, también debido a que hay unos cristales de calcita que no logran atravesar esta zona, se cortan abruptamente, es señalado con flechas rojas.

FOTOGRAFÍA 19
POSIBLE HIATO EN CAMBIO A SEGUNDO EJE DE
CRECIMIENTO, GRM 03-1

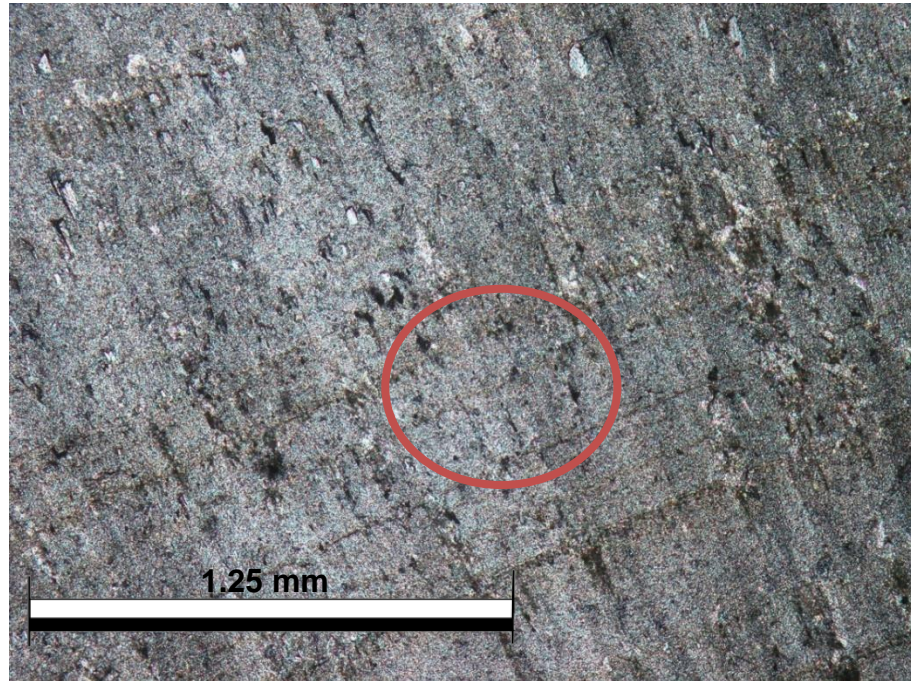


Tomada por: Otto Chavarría, 2013. Aumento: 4x. Con Nícoles cruzados (NX).

Para la segunda parte de la estalagmita se realizó la segunda sección la cual fue denominada GRM 03-2, en esta se encuentra el segundo cambio en el eje de crecimiento.

En la fotografía 20 se pueden observar cristales de calcita atravesando las bandas de crecimiento (círculo rojo), esta zona en la descripción macroscópica se caracterizó porque no era clara a simple vista los cristales de calcita en crecimiento, pero queda despejado con esta imagen que estos tuvieron un desarrollo continuo, lo cual es muy importante para los análisis de laboratorio.

FOTOGRAFÍA 20 CRISTALES DE CALCITA ATRAVESANDO BANDAS DE CRECIMIENTO GRM 03-2

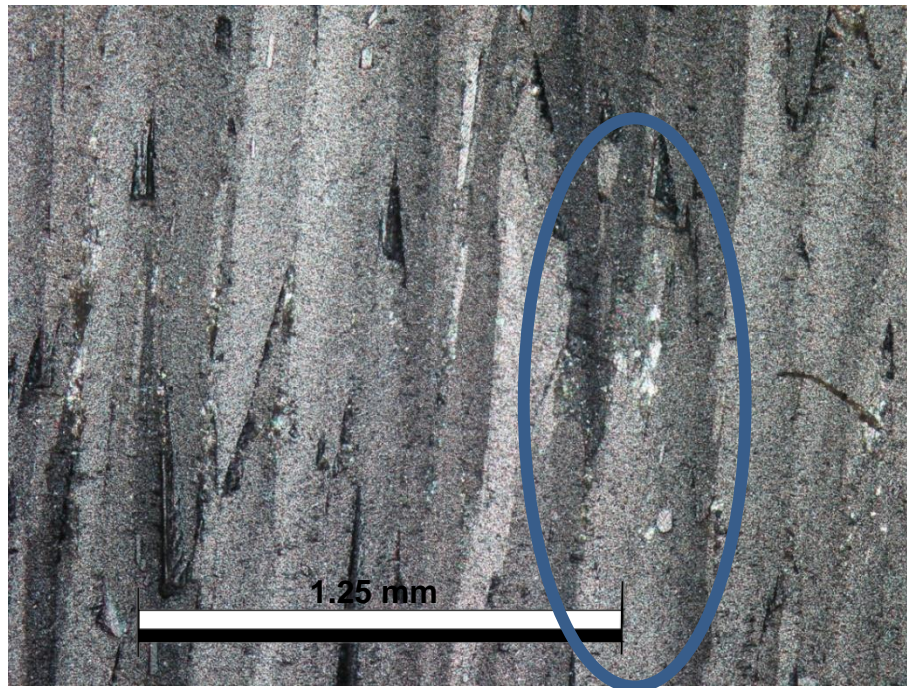


Tomada por: Otto Chavarría, 2013. Aumento: 4x. Con Nícoles cruzados (NX).

En la fotografía 21 se lograron observar cristales de calcita muy bien definidos y con una buena continuidad de crecimiento, esta imagen se resaltó debido a que nos indica que en la parte media y en el segundo eje de crecimiento de la estalagmita hubo un crecimiento continuo, como cristal que se observa dentro del óvalo azul.

También se puede mencionar que la fábrica que presentan los cristales de calcita es de tipo columnar, debido a la forma que presentan.

FOTOGRAFÍA 21 CRISTALES DE CALCITA GRM 03-2

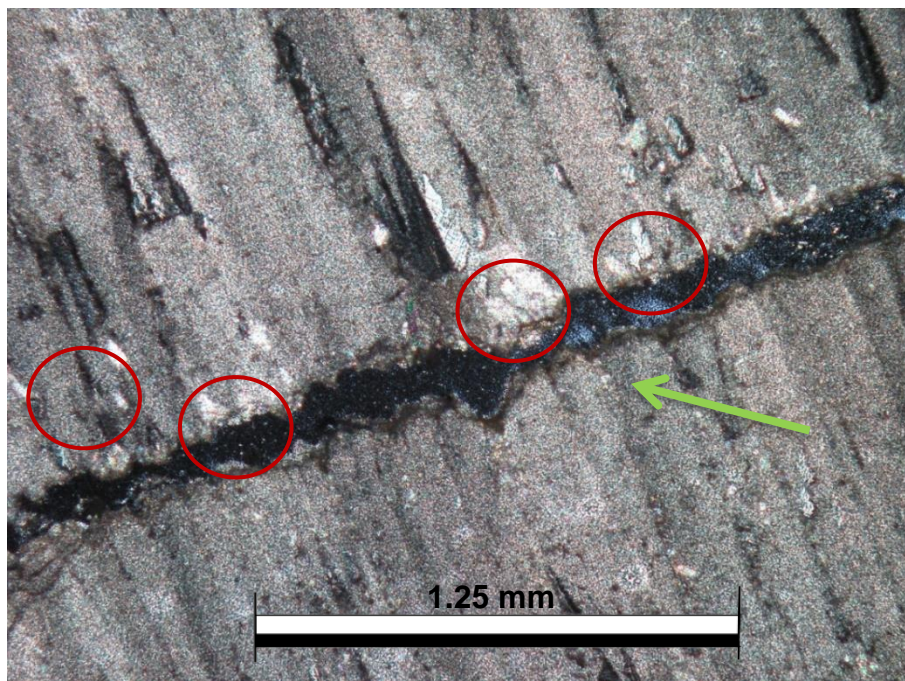


Tomada por: Otto Chavarría, 2013. Aumento: 4x. Con Nícoles cruzados (NX).

Para el siguiente fragmento de la sección (fotografía 22), se observa el segundo cambio en el eje de crecimiento. Es muy importante mencionar que durante la elaboración de la sección delgada esta se quebró, justamente sobre el cambio de dirección del eje (señalado con flecha verde).

Los cristales de calcita logran atravesar las bandas de crecimiento y en especial en el cambio de orientación que existió, también se logra apreciar en la imagen la presencia de pequeños cristales de calcita que pueden ser asociados a una posible recristalización (círculos rojos), es significativo ver que estos solo se presentan en la tercera dirección del eje.

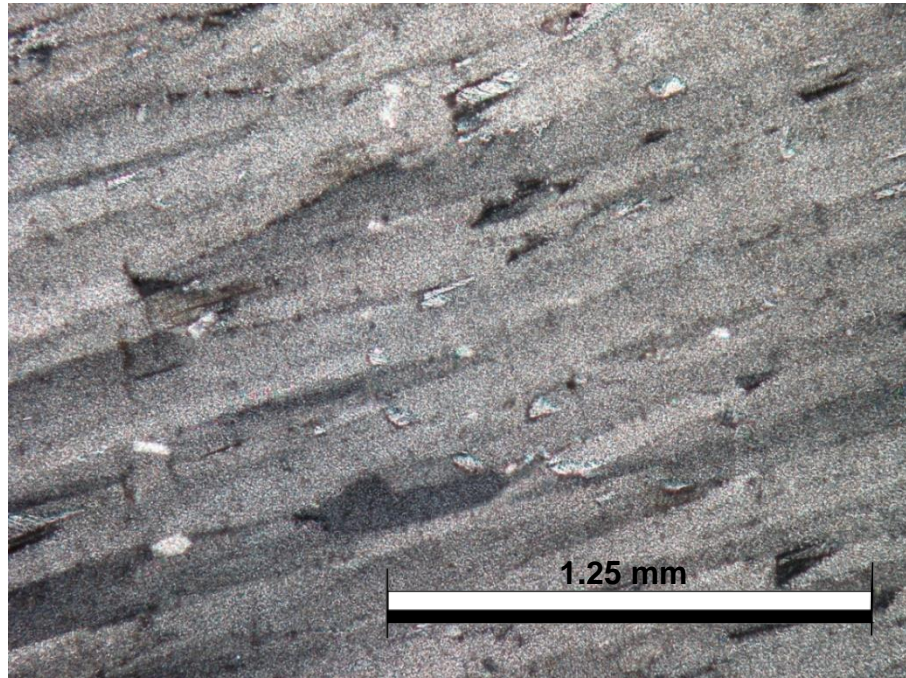
FOTOGRAFÍA 22 CAMBIO AL TERCER EJE DE CRECIMIENTO GRM 03- 2



Tomada por: Otto Chavarría, 2013. Aumento: 4x. Con Nícoles cruzados (NX).

La fotografía 23 se presenta debido a que cuando esta misma parte se analizó macroscópicamente, no era muy fácil de apreciar a simple vista los cristales de calcita, pero cuando se hizo de manera microscópica se pudo comprobar la continuidad de estos y que a su vez atraviesan las bandas de desarrollo.

FOTOGRAFÍA 23
CONTINUIDAD DE CRISTALES DE CALCITA GRM 03-2

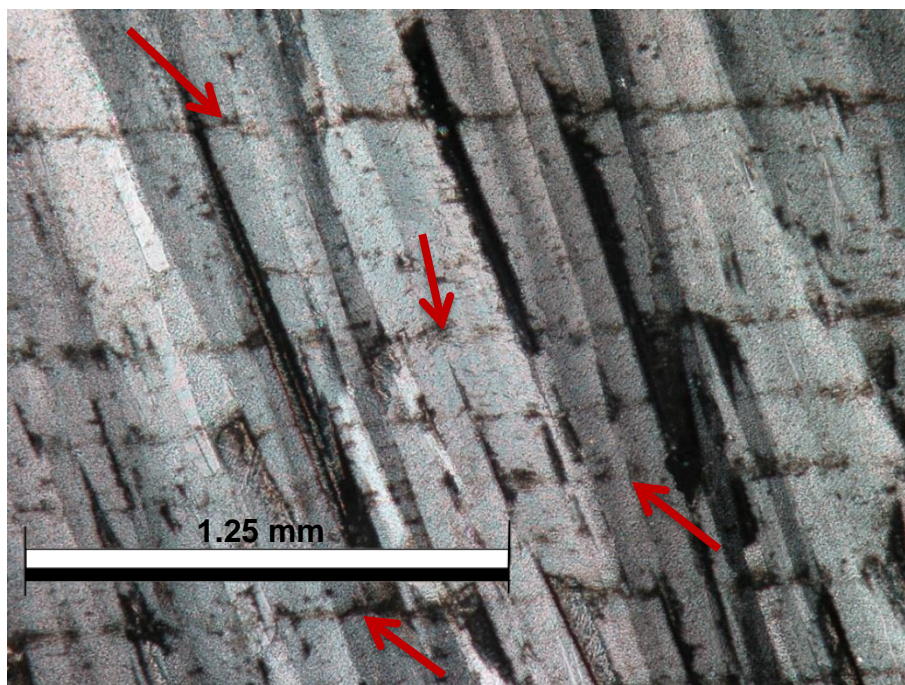


Tomada por: Otto Chavarría, 2013. Aumento: 4x. Con Nícoles cruzados (NX).

La última sección que se realizó para esta muestra es la GRM 03-3, la cual contiene únicamente la tercera fase de crecimiento de la estalagmita.

En la fotografía 24, podemos observar cristales de calcita muy bien formados, los cuales muy claramente atraviesan bandas de crecimiento (flechas rojas). Esta zona de la estalagmita es donde se puede apreciar una mejor formación de los cristales de calcita.

FOTOGRAFÍA 24 CRISTALES DE CALCITA GRM 03-3



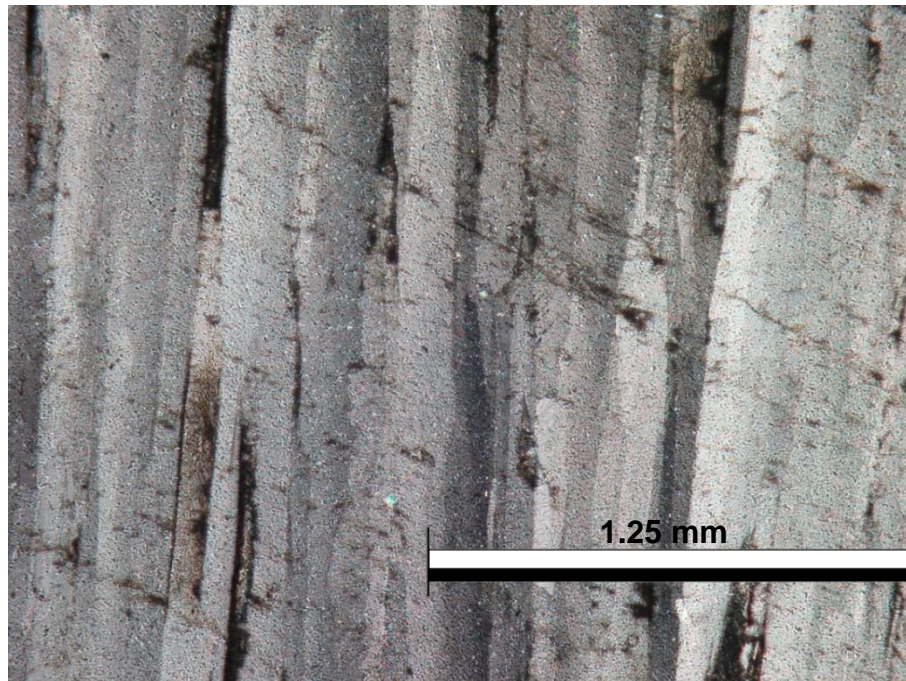
Tomada por: Otto Chavarría, 2013. Aumento: 4x. Con Nícoles cruzados (NX).

La sección que se analiza en la fotografía 25, es muy importante debido a que esta zona prácticamente no se observaron cristales de calcita en la descripción macroscópica.

En la imagen se logró ver que los cristales tienen una continuidad en su desarrollo y se encuentran atravesando las bandas de crecimiento, con lo cual podemos verificar que el análisis de laboratorio se puede hacer en esta parte.

FOTOGRAFÍA 25

Continuidad de cristales de calcita GRM 03-3

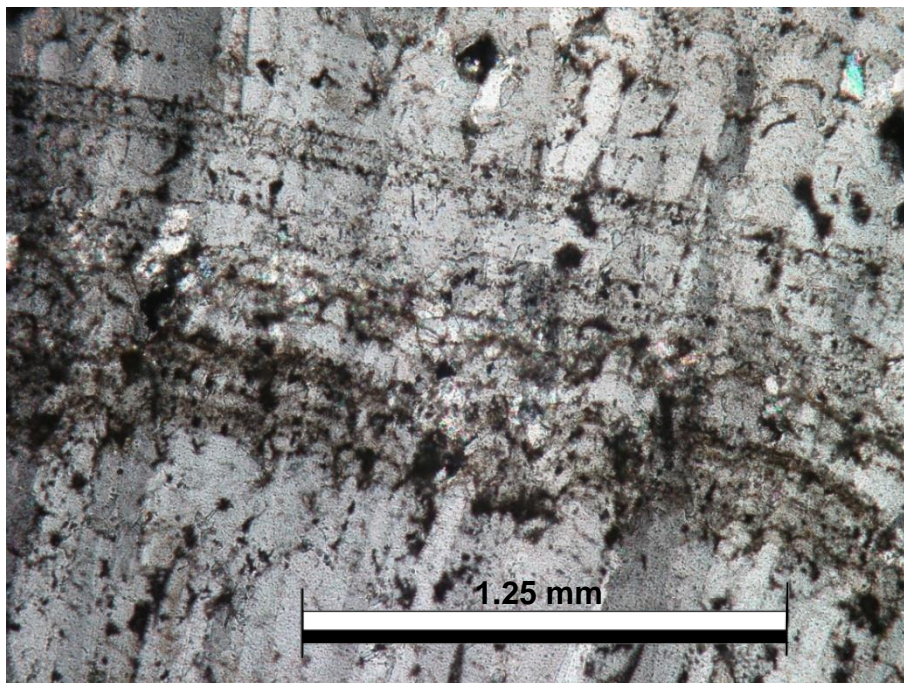


Tomada por: Otto Chavarría, 2013. Aumento: 4x. Con Nícoles cruzados (NX).

En la fotografía 26 podemos apreciar una zona que presenta rasgos que se pueden atribuir a una disolución, por lo que se logra apreciar en la imagen fue muy fuerte, ya que los cristales de calcita cortaron drásticamente su crecimiento.

La morfología que nos presenta es muy peculiar, ya que las bandas de crecimiento aparentan haber sufrido una compresión debido a que se encuentran muy juntas, pero esto se debe a que probablemente durante esta etapa, el desarrollo de la estalagmita no fue constante, creciendo por un tiempo, posteriormente ocurría disolución y así sucesivamente se pudo haber dado el proceso.

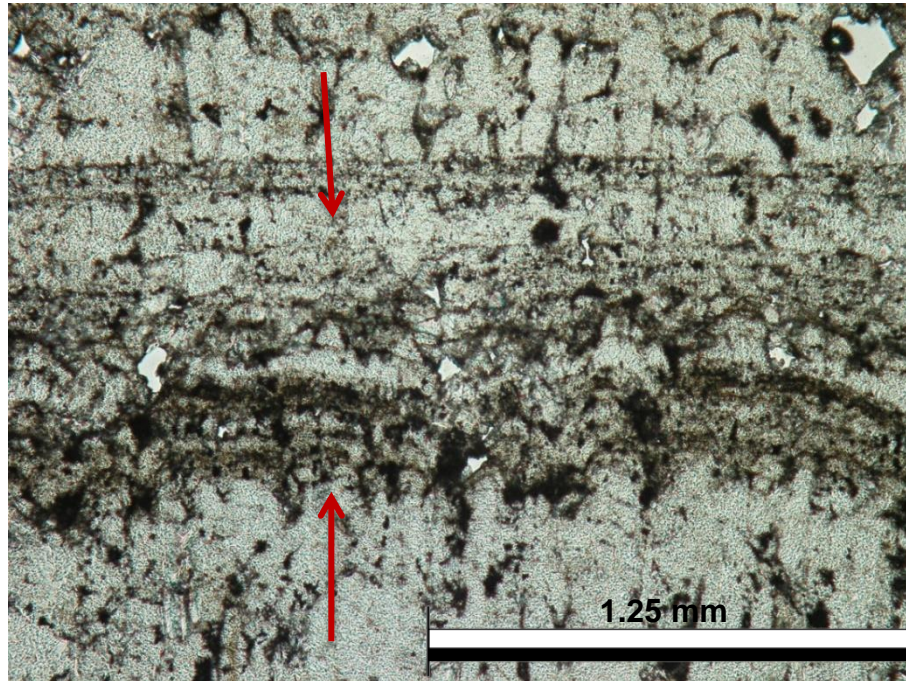
FOTOGRAFÍA 26 DISOLUCIÓN DE MUESTRA GRM 03-3



Tomada por: Otto Chavarría, 2013. Aumento: 4x. Con Nicoles cruzados (NX).

La fotografía 27 fue tomada en la misma zona descrita arriba (sin nicoles cruzados), en esta se puede observar de mejor manera el proceso de disolución que sufrió la estalagmita, ya que se logró apreciar como las bandas de crecimiento se encuentran casi unidas aparentando una compresión (flechas rojas).

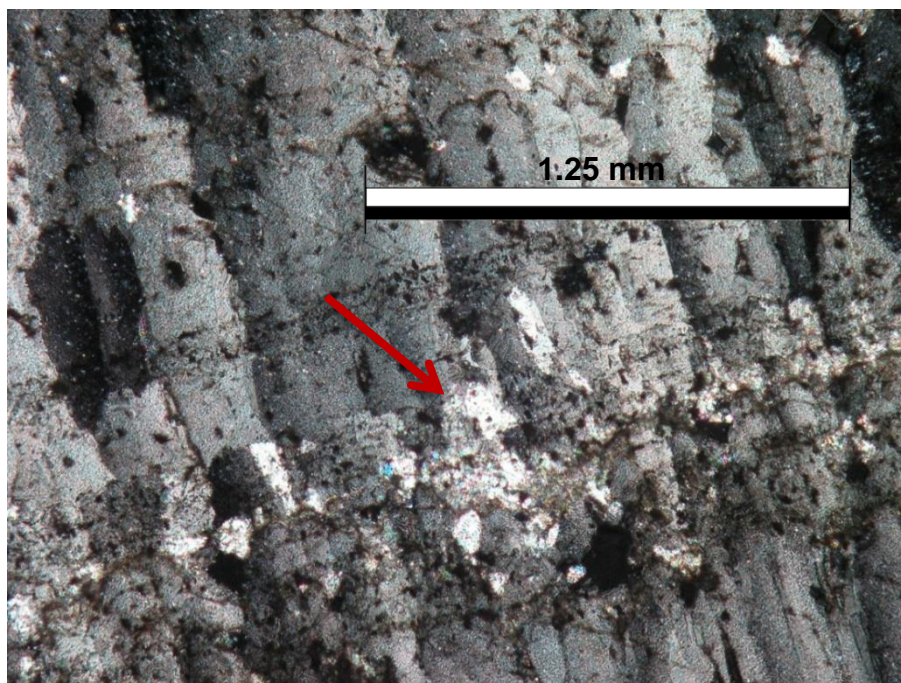
FOTOGRAFÍA 27
DISOLUCIÓN DE MUESTRA, SIN NICOLES
CRUZADOS GRM 03-3



Tomada por: Otto Chavarría, 2013. Aumento: 4x. Con Nicoleles paralelos (NII).

En la fotografía 28 se describe una posible recristalización de calcita (flecha roja), la cual es muy cerca de la zona de disolución descrita antes. Para este tipo de estudio no es bueno tener este fenómeno, debido a que si está existiese se pierde el registro almacenado de algún tiempo específico.

FOTOGRAFÍA 28 POSIBLE RECRISTALIZACIÓN GRM 03-3

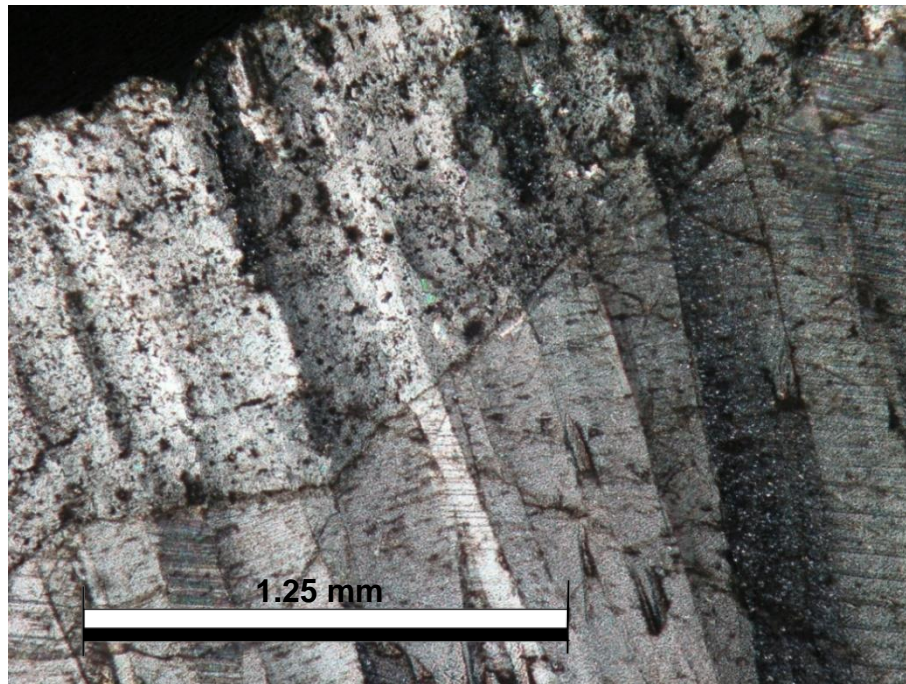


Tomada por: Otto Chavarría, 2013. Aumento: 4x. Con Nícoles cruzados (NX).

En la última parte de este análisis se observó la punta de la estalagmita (fotografía 29), para ver si esta no habría sufrido algún tipo de proceso que afectara a este estudio, esto debido a que dicha muestra no fue recolectada en posición de crecimiento y es por esto que se le dio mayor interés que a las otras dos.

El rasgo más significativo fue la pérdida abrupta de la continuidad de los cristales de calcita como se aprecia en la fotografía 29, con lo cual se puede sugerir que la muestra si sufrió algún tipo de proceso de disolución, esto hará que sea muy difícil obtener registros paleoclimáticos de esta parte de la muestra, esto se verificara y determina con los análisis de laboratorio.

FOTOGRAFÍA 29 PUNTA DE ESTALAGMITA GRM 03-3



Tomada por: Otto Chavarría, 2013. Aumento: 4x. Con Nícoles cruzados (NX).

3.2 Datación

Luego de haber determinado de una forma visual mediante el análisis macroscópico y microscópico que la estalagmita GRM 03, presenta señales de haber tenido un crecimiento continuo, se procedió a realizar la datación mediante series de Uranio. Se extrajeron 15 muestras de calcita perpendiculares al eje de crecimiento, utilizando un microtaladro con fresa de carburo de tungsteno. Cada muestra fue almacenada en un tubo *ependorf* de polipropileno previamente lavado y tratada de acuerdo al procedimiento detallado en el Capítulo 2.

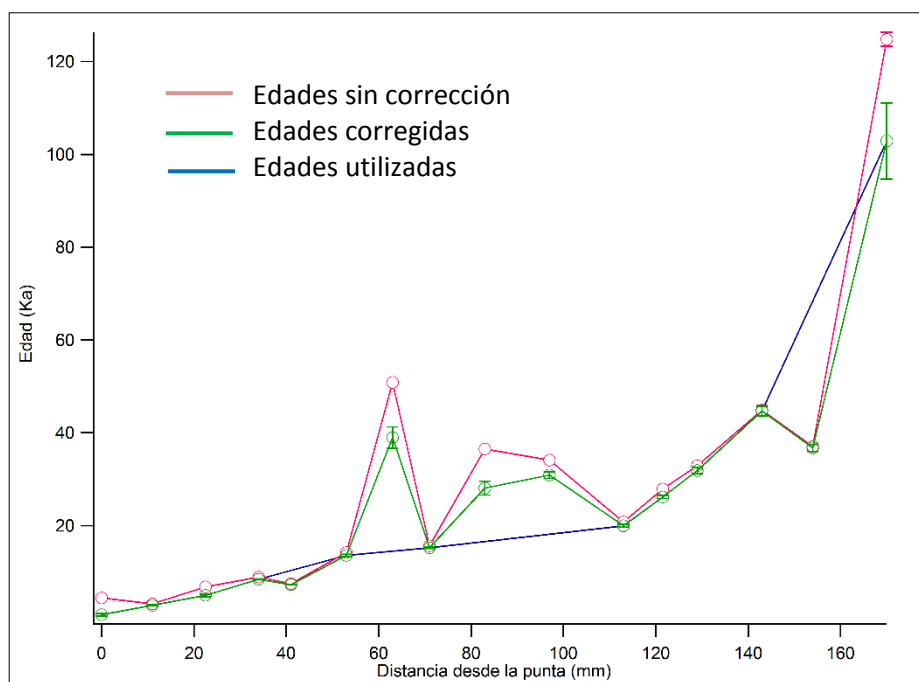
3.2.1 Modelo de edades

Luego de realizar la metodología descrita en el Capítulo III, se procesaron los datos arrojados por el *MC-ICPMS* como se observa en el cuadro 9, con esto se formó el modelo de edades a

partir de 11 de los 15 puntos muestreados en la estalagmita. Se tomó la decisión de eliminar 4 puntos debido al alto contenido de Th detrítico en ellos, y cuya inclusión causaba que las edades fueran inversas en estas zonas, como se puede constatar en la figura 11; estos cuatro puntos corresponden a los numerales 6, 8, 9 y 14.

Con la utilización de los 11 puntos antes mencionados, se logra obtener una curva de crecimiento continua, las edades están en orden estratigráfico y el ritmo de crecimiento es continuo tal como se puede apreciar en la figura 11.

FIGURA 11
MODELO DE EDADES



Elaboración propia: Otto Chavarría, 2015.

En la figura 11 se observa la curva formada por las edades de la muestra GRM 03, en el eje X se grafica la distancia desde la punta de la estalagmita, mientras que en el eje Y, se grafican 3 curvas, en rosa se grafican las edades sin corrección por Th detrítico, en color verde se grafican las edades corregidas y en azul las edades omitiendo los puntos con alto contenido de Th detrítico, en todos los puntos de cada una de ellas se colocan las barras de error, a partir de las incertidumbres obtenidas.

CUADRO 9

DATOS OBTENIDOS EN EL FECHAMIENTO DE LA MUESTRA GRM-03

No.	Clave Muestra	Distancia desde la punta (mm)	U (µg/g)	+/-	Th (ng/g)	+/-	$\delta^{234}\text{U}$ (‰)	+/-	($^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$)	+/-	($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$)	+/-	^{230}Th -age _{raw} (ka)	+/-	^{230}Th -age _{corr} (ka)	+/-	$\delta^{234}\text{U}_0$ (‰)	+/-	ρ
1	00-02	0	0.16839	0.00006	26.75	0.25	3020	72	0.0524	0.0005	0.1604	0.0078	4.4	0.2	3.2	0.3	3186.43	58.70	-0.3
2	11-14	11	0.1654	0.0001	2.448	0.005	550	11	0.004881	0.000011	0.04388	0.0008	3.119	0.065	2.834	0.076	556.25	4.06	-0.3
3	21-24	22.5	0.14523	0.00009	24.82	0.15	1799	30	0.05633	0.00035	0.17020	0.0023	6.78	0.12	4.96	0.29	1914.09	21.97	-0.3
4	33-35	34	0.16534	0.00008	3.81	0.03	359	4	0.007374	0.000014	0.10719	0.0008	8.90	0.07	8.41	0.10	370.42	1.02	-0.2
5	52-54	53	0.21321	0.00014	6.31	0.03	1314	30	0.009763	0.000056	0.17918	0.0025	14.18	0.21	13.58	0.23	478.37	0.56	0.1
6	62-64	63	0.27213	0.00012	13.34	0.07	2672	48	0.1777	0.0005	0.52487	0.0031	50.9	0.4	39.0	2.3	496.43	6.65	-0.3
7	70-72	71	0.22082	0.00005	5.60	0.05	618	9	0.007945	0.000028	0.21842	0.0016	15.63	0.15	15.20	0.16	649.12	3.49	-0.5
8	82-84	83	0.16497	0.00005	62.56	0.17	376	2	0.12635	0.00023	0.39783	0.0017	36.52	0.19	28.09	1.48	454.71	4.21	-0.3
9	96-98	97	0.16245	0.00008	25.05	0.06	1477	47	0.05083	0.00013	0.38510	0.0042	34.10	0.43	30.87	0.70	468.89	1.64	-0.2
10	113	113	0.218580	0.000047	11.09	0.04	845	18	0.016734	0.000064	0.32491	0.0035	20.8	0.3	20.0	0.3	906.98	8.80	-0.6
11	B40-42	121.5	0.23262	0.00012	19.43	0.03	930	18	0.027815	0.000067	0.32513	0.0021	27.9	0.2	26.2	0.4	463.27	0.94	-0.2
12	B29-31	129	0.20572	0.00010	10.20	0.01	1216	40	0.016350	0.000027	0.37379	0.0067	32.9	0.7	31.9	0.7	458.14	0.76	0.3
13	B15-17	143	0.23257	0.00013	2.55	0.02	700	13	0.003618	0.000023	0.5895	0.0104	44.9	1.0	44.7	1.0	797.31	5.99	-0.2
14	B7.5-10	154	0.233253	0.000079	4.36	0.01	646	13	0.006164	0.000014	0.4849	0.0073	37.1	0.7	36.7	0.7	720.45	5.89	-0.4
15	base	170	0.238541	0.000089	173.9	0.4	369	4	0.3302	0.0010	0.97499	0.0057	124.8	1.5	102.9	8.2	682.01	20.04	-0.4

Edades calculadas utilizando las vidas medias de decaimiento radioactivo para $^{230}\text{Th} = 75,584 \pm 110$ y para $^{234}\text{U} = 245,620 \pm 260$ (Cheng et al 2013)

Los valores entre () corresponden a relaciones de actividad calculadas a partir de las abundancias absolutas y las constantes de decaimiento de Chent et al 2013, Jaffey et al 1971, Audi (2003)

$\delta^{234}\text{U}$ (‰) calculado como desviación de equilibrio secular considerando $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}_{\text{eq}} = (54.970 \pm 0.019) \times 10^{-6}$ (Cheng et al 2013)

Edades ^{230}Th corregidas por la presencia de material detrítico utilizando una isócrona de dos puntos (Ludwig & Paces, 2002) y con la composición isotópica de la corteza terrestre promedio ($^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$) = 1.2 +/- 0.6 (Sun & McDonough, 1995) y en equilibrio secular ($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$) = ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) = 1.0 +/- 0.1

$\delta^{234}\text{U}$ (‰)₀ calculado a partir de $\delta^{234}\text{U}$ (‰) y la ecuación $\delta^{234}\text{U}$ (‰)₀ = $\delta^{234}\text{U}$ (‰) $e^{-\lambda^{234}t}$ donde λ^{234} = constante de decaimiento de ^{234}U y t es la edad de la muestra correspondiente

Muestras en letras *italicas* no fueron consideradas en el establecimiento del modelo de edades por contener altas concentraciones de Th detrítico, por lo que la corrección no fue aceptable

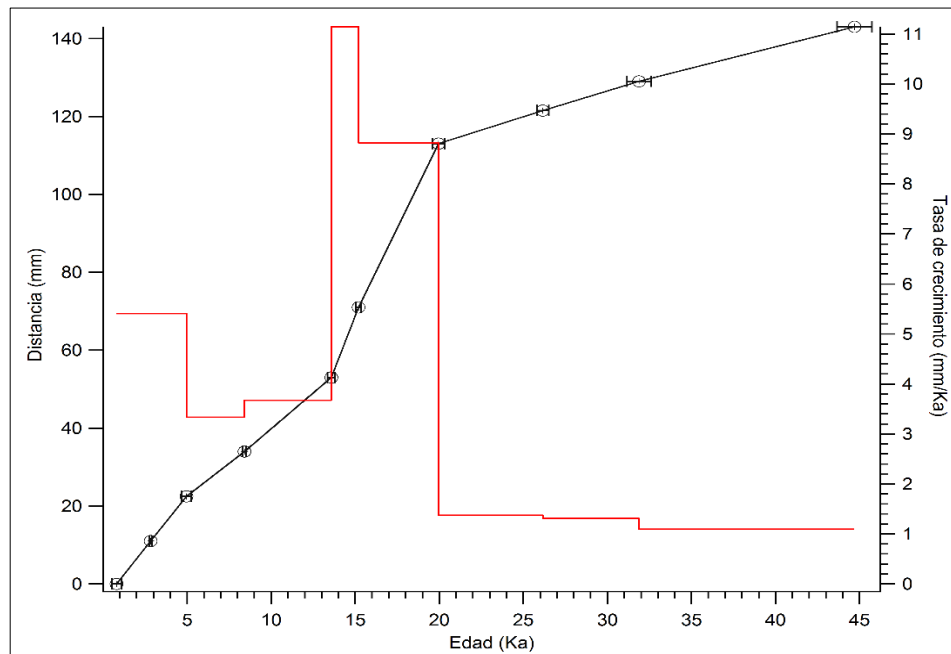
Elaboración propia: Otto Chavarría, 2015.

Como se observa en el cuadro 9, al hacer las correcciones a cada uno de los puntos, los que no fueron utilizados identificados en los incisos 6, 8, 9 y 14 siguen mostrando inversión de edades.

La estalagmita GRM 03 logra alcanzar en el punto no. 15 que corresponde a la base de la misma, una edad de 102.9 ± 8.2 Ka, pero para el análisis descrito en este informe únicamente se utilizaron 10 de los 11 puntos utilizados para la realización del modelo de edades, omitiendo el punto no. 15 ya que se consideró poco fiable la diferencia significativa entre la edad cruda y la edad corregida

Por lo tanto el modelo de edades que se utilizó llega a la edad de 44.7 ± 1.0 Ka. La curva para el mismo queda de la siguiente manera (figura 12), graficando las 10 edades obtenidas.

FIGURA 12
MODELO DE EDADES UTILIZADO EN EL ANÁLISIS



Elaboración propia: Otto Chavarría, 2015.

En la figura 12, se sobreponen dos gráficas, Edad (Ka) vs Distancia desde la punta que corresponde al modelo de edades, y la gráfica de barras de Edad (Ka) vs. Tasa de crecimiento (mm/Ka). Como se puede observar, la curva de edades presenta diferentes pendientes, las cuales corresponden a la tasa de crecimiento anual de la estalagmita.

En el eje X se grafican las edades obtenidas con barras de error a partir de las incertidumbres obtenidas. En el eje “Y-izquierda” se gráfica la distancia desde la punta de la estalagmita, con lo cual obtenemos el modelo de edades. En el eje “Y-derecha” se grafican las distintas tasas de crecimiento en la estalagmita, estas corresponden a la pendiente de la línea entre cada punto.

Como se puede observar en la figura 12 hay 8 distintas tasas de crecimiento a lo largo de vida de la estalagmita, de los 44.69 Ka a los 26.16 Ka la tasa de crecimiento fue de 1.09 mm/Ka; de 26.16 a 19.96 Ka se ve un leve incremento en la tasa de crecimiento siendo de 1.31 mm/Ka; de 19.96 Ka a 15.19 Ka la tasa de crecimiento aumento considerablemente ya que alanzo los 8.82 mm/Ka; de los 15.19 Ka a los 13.58 Ka la tasa de crecimiento siguió en aumento, aunque no de forma abrupta, siendo de 11.14 mm/Ka; de 13.58 Ka a 8.41 Ka la tasa de crecimiento cae considerablemente a 3.67 mm/Ka; luego de los 8.41 Ka a los 4.96 Ka tiene una leve baja a 3.33 mm/Ka; y finalmente de 4.96 Ka a 0.79 Ka la tasa de crecimiento aumento a 5.41 mm/Ka.

Según los datos anteriores de los 44.69 Ka a los 19.95 Ka, unos 24.74 Ka la estalagmita únicamente creció 30 mm, es decir un 20.97% del total de la muestra, comparado que entre los 19.95 Ka a los 13.58 Ka, unos 6.37 Ka la estalagmita creció el doble (60

mm) un 41.95% del total del tamaño de esta, siendo esta etapa en la que el crecimiento de la estalagmita fue mayor casi un 50% del total de la muestra. Luego de esta etapa nuevamente la tasa de crecimiento vuelve a bajar alcanzando valores similares a las edades más antiguas. Por último, los valores correspondientes a la punta de la estalagmita sufren un nuevo incremento en la tasa de crecimiento, alcanzando en los últimos 4.17 Ka, 22.5 mm que corresponden a un 15.73%.

Las tasas de crecimiento de la estalagmita pueden estar controladas por varios factores tales como, 1) el grado de desgasificación de CO₂ del agua de percolación al momento de arribar a la cueva, 2) cantidad de lluvia y por ende, mayor disolución de la roca y 3) eventos tectónicos que promuevan el fallamiento de la roca caliza, así como la posible conexión/desconexión de acuíferos cercanos a la caverna.

3.3 Análisis de elementos traza (ET)

Los datos que se presentan a continuación sobre los elementos traza analizados (Mg, Sr y Ba), como la relación de estos con el Ca, nos ayudarán a determinar si la variabilidad observada responde o no a condiciones paleoclimáticas.

Por el contrario, los ET (Mg, Sr y Ba) son elementos que han sido estudiados en distintos espeleotemas y que su comportamiento siempre es similar, siempre que exista una relación entre estos a lo largo de la estalagmita, así comprobando el proceso de precipitación previa (*Tremaine & Froelich, 2013*). Ya que la incorporación de estos puede estar controlada por otros mecanismos (tales como disolución incongruente de calcita-magnesita y/o dolomita, mezcla de dos o más componentes) independientes de las condiciones climáticas imperantes.

También es importante mencionar que, para poder relacionar con el modelo de edades explicado en el apartado anterior, el análisis de elemento traza se realizó a lo largo del eje de crecimiento. Ya que de esta forma podemos relacionar la distancia desde la punta de la estalagmita con los puntos específicos del modelo de edades.

El análisis de los elementos traza fue llevado a cabo en las 3 muestras recolectas, ya que esto nos ayuda a poder interpretar de una mejor forma la incorporación de los ET en la caverna, aunque las muestras GRM 01 y GRM 02 no fueron fechadas.

3.3.1 Procesos geoquímicos que modulan Mg/Ca, Sr/Ca y Ba/Ca en el epikarst

Es fundamental determinar los procesos geoquímicos que controlaron la incorporación de elementos traza en la estalagmita, ya que de esta forma podemos saber si estamos obteniendo un archivo paleoclimático válido. Se ha determinado que si las relaciones de Mg/Ca, Sr/Ca y Ba/Ca, se han relacionado con precipitación previa, entonces estas co-variaran de manera congruente, de manera que habrá una correlación lineal positiva entre ellas (*Tremaine & Froelich 2013*).

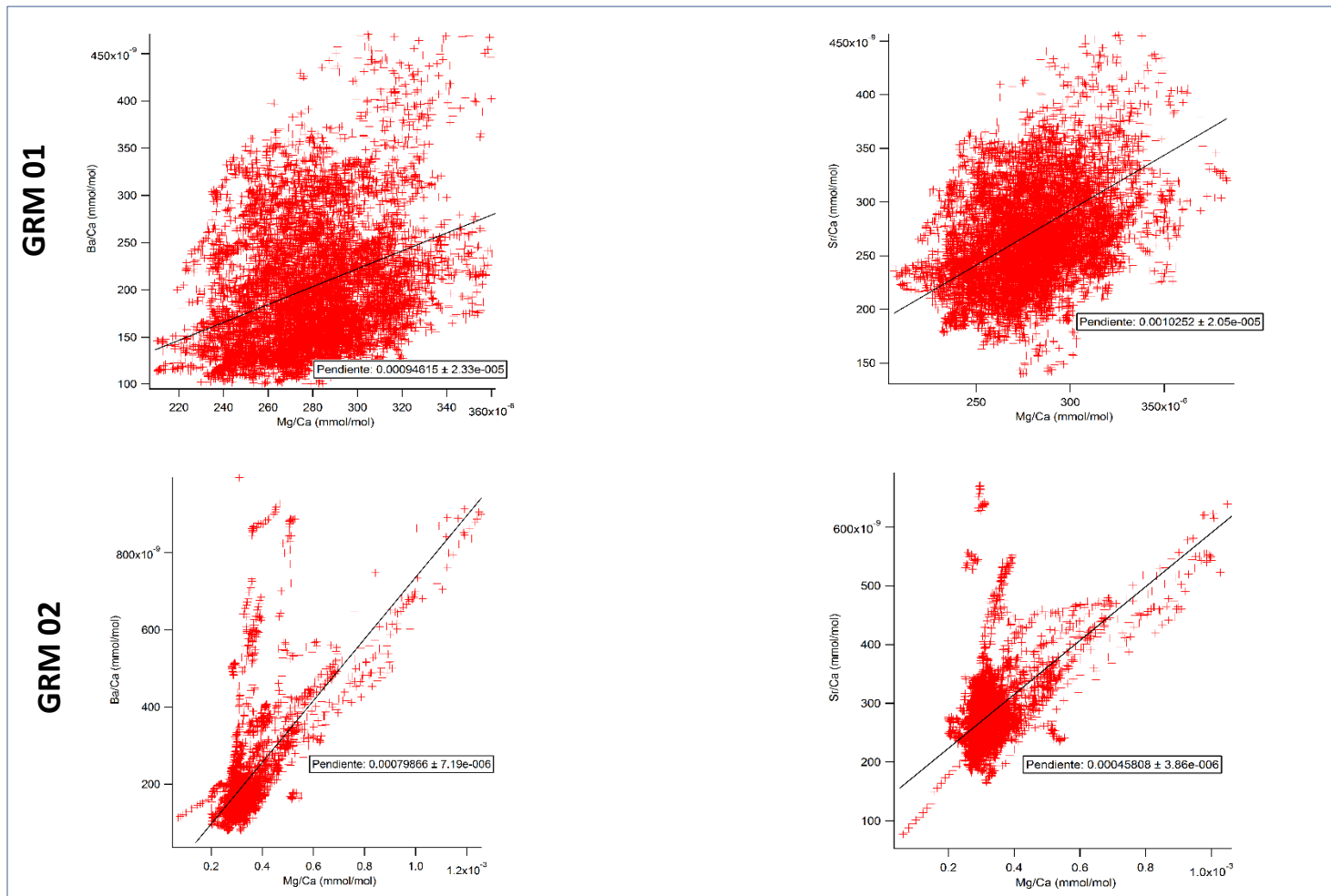
A continuación, se presentan las comprobaciones de las relaciones entre los ET en estudio, para cada una de las muestras:

a. GRM 01 y GRM 02

Por cada estalagmita se realizaron 2 graficas, en las cuales se muestra la relación existente entre los ET que estamos analizando.

En la figura 13, se observan y comparan las 4 gráficas realizadas para las 2 muestras, en la parte superior se aprecian las correspondientes a GRM 01 y en la parte inferior las correspondientes a GRM 02. Para ambos casos, se grafica en la abscisa la relación Mg/Ca, vs Sr/Ca ó Ba/Ca. La línea negra indica la regresión lineal entre dichos puntos, con pendiente positiva.

FIGURA 13
RELACIONES DE ET PARA GRM 01 Y GRM 02



Elaboración propia: Otto Chavarría, 2015.

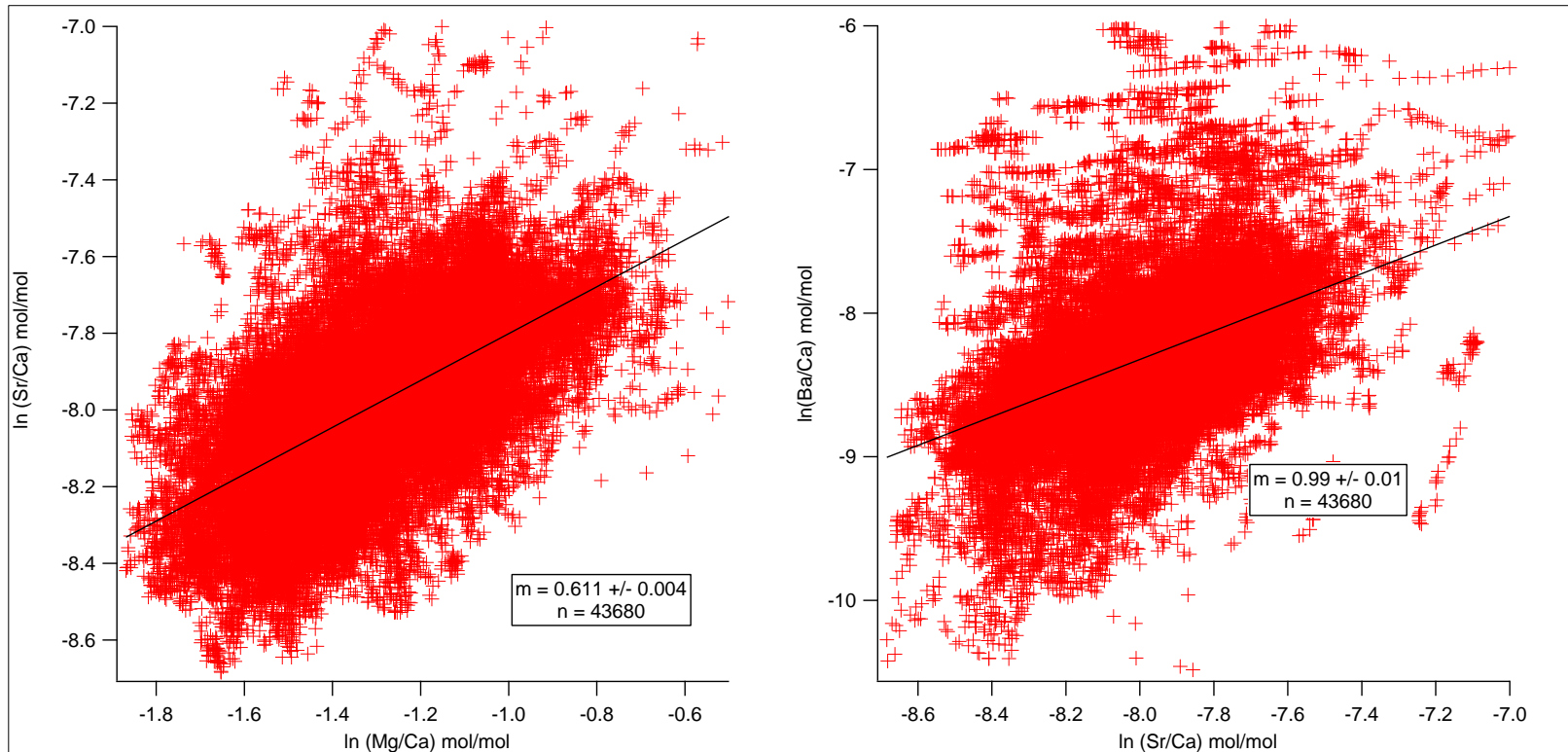
Como se puede observar en las gráficas de la figura 13, sugieren que, sobre la gran variabilidad observada, es posible detectar que Mg/Ca vs Sr/Ca y Mg/Ca vs Ba/Ca están correlacionados de manera positiva. Por lo tanto se puede asumir que uno de los procesos que modula la variabilidad en la relación E/Ca en la muestra es la precipitación previa, aunque este no es el principal, ya que también pueden estar representando el mezclado de dos reservorios.

b. GRM 03

Para la muestra GRM 03 también se analizó la relación existente entre los ET que se están estudiando, al igual como se hizo con las dos muestras anteriores.

En la figura 14, se observan y comparan las 2 gráficas realizadas sobre la relación existente entre los ET correspondientes a GRM 03. Se grafica en la abscisa la relación Mg/Ca, vs Sr/Ca ó Ba/Ca. La línea negra indica la regresión lineal entre dichos puntos, con pendiente positiva.

FIGURA 14
Mg/Ca VRS. Sr/Ca EN GRM 03



Elaboración propia: Otto Chavarría, 2015.

Las gráficas en la figura 14 muestran la relación logarítmica entre Mg/Ca vs Sr/Ca y Sr/Ca vs Ba/Ca. Se ha demostrado recientemente que si la variabilidad de Mg/Ca y Sr/Ca están controlados principalmente por PCP, entonces la relación logarítmica de estas tendrá una pendiente positiva e igual a 0.88 ± 0.013 (Sinclair, 2011).

En el caso de GRM 03, es posible notar que la pendiente de 0.611 revela que otros procesos, aparte de PCP, están modulando la variabilidad de estos elementos. Recientemente se ha demostrado que si Ba/Ca y Sr/Ca están modulados por PCP, entonces co-varian de manera positiva con una pendiente = 1.02 ± 0.08 (Bernal et-al 2016). La figura 14 muestra que estas dos variables en GRM 03, efectivamente, co-varian de manera positiva y con pendiente = 0.99, es decir, indicativa de que la variabilidad de estas dos relaciones elementales es modulada principalmente por PCP y, por lo tanto, pueden ser utilizados como indicadores de la humedad del epikarst.

3.3.2 Relación Mg/Ca, Sr/Ca y Ba/Ca en las estalagmitas GRM 01 y GRM 02

Aunque para las muestras GMR 01 y GRM 02 no se realizó fechamiento, es importante saber el comportamiento de los elementos traza en cada una de ellas y a la vez comparándolas entre ellas. Esto servirá con un indicador del comportamiento de la caverna y de los procesos geoquímicos que la controlan.

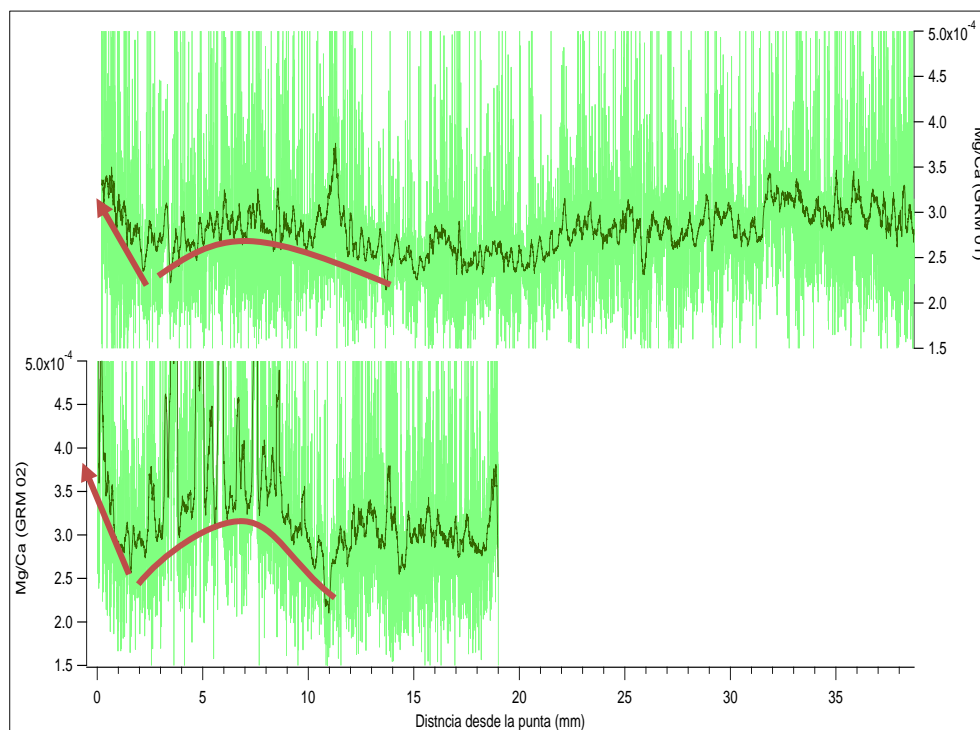
Con la finalidad de eliminar el ruido en los registros de Mg/Ca y Sr/Ca, estos se “suavizaron” a partir de un promedio móvil de ventana cuadrada de 50 puntos. Esto simplifica la comparación de las series de tiempo y registros al disminuir el ruido en la señal,

ya que, dependiendo del tamaño de ventana, se definen mejor las características principales de cada registro.

Las gráficas son presentadas en las Figuras 18, 19 y 20.

En la figura 15, se gráfica en el eje X la distancia desde la punta para ambas estalagmitas, en el eje “Y-izquierda” las la relación Mg/Ca (mmol/mol) de la muestra GRM 02 y en el eje “Y-derecha” la relación Mg/Ca (mmol/mol) de la muestra GRM 01, la línea roja indica la tendencia de crecimiento en la gráfica, es decir una mayor proporción de Mg.

FIGURA 15
Mg EN GRM 01 Y GRM 02

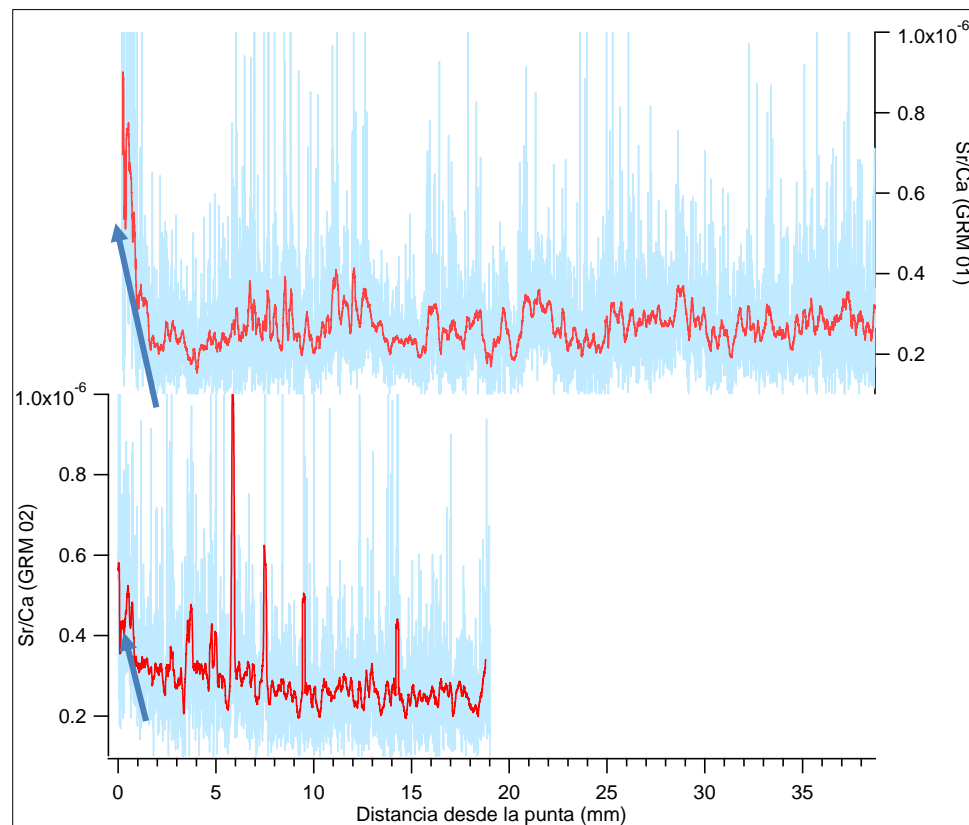


Elaboración propia: Otto Chavarría, 2015.

En la figura 16, se gráfica en el eje X la distancia desde la punta para ambas estalagmitas, en el eje “Y-izquierda” las la relación Sr/Ca (mmol/mol) de la muestra GRM 02 y en el eje “Y-

derecha” la relación Sr/Ca (mmol/mol) de la muestra GRM 01, la línea azul representa la tendencia de crecimiento en la gráfica, es decir una mayor proporción de Sr.

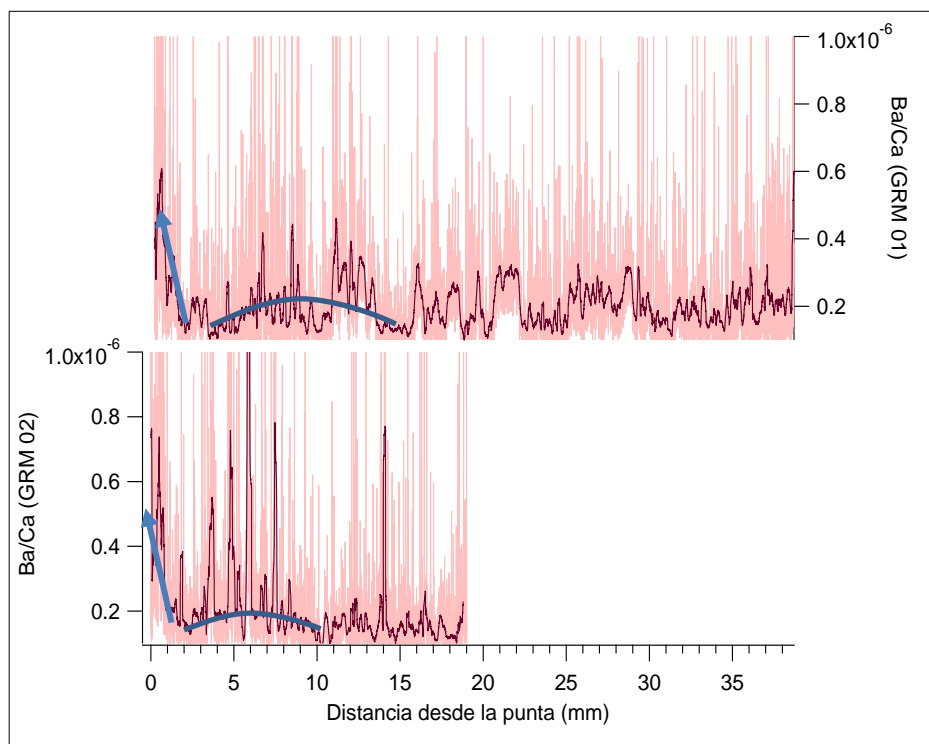
FIGURA 16
Sr EN GRM 01 Y GRM 02



Elaboración propia: Otto Chavarría, 2015.

En la figura 17, se gráfica en el eje X la distancia desde la punta para ambas estalagmitas, en el eje “Y-izquierda” la relación Ba/Ca (mmol/mol) de la muestra GRM 02 y en el eje “Y-derecha” la relación Ba/Ca (mmol/mol) de la muestra GRM 01, la línea azul marca la tendencia de crecimiento en la gráfica, es decir una mayor proporción de Ba.

FIGURA 17
Ba EN GRM 01 Y GRM 02



Elaboración propia: Otto Chavarría, 2015.

Como observa en las anteriores figuras, el comportamiento de las concentraciones de la relación Mg/Ca, Sr/Ca y Ba/Ca en ambas muestras es, en un principio no muy similar, sin embargo, muestran ciertas similitudes en su estructura que sugiere que dichos registros son réplicas geoquímicas, sin embargo, esto deberá ser confirmado hasta que las muestras puedan ser fechadas radiométricamente

Luego de haber interpretado el comportamiento de las relaciones Mg/Ca, Sr/Ca y Ba/Ca a lo largo de las muestras GRM 01 y GRM 02, y a su vez comparando a las 2 estalagmitas, se determinó que los procesos geoquímicos que controlan la incorporación de estos elementos a los espeleotemas puede ser el mismo, teniendo en cuenta que las muestras se recolectaron

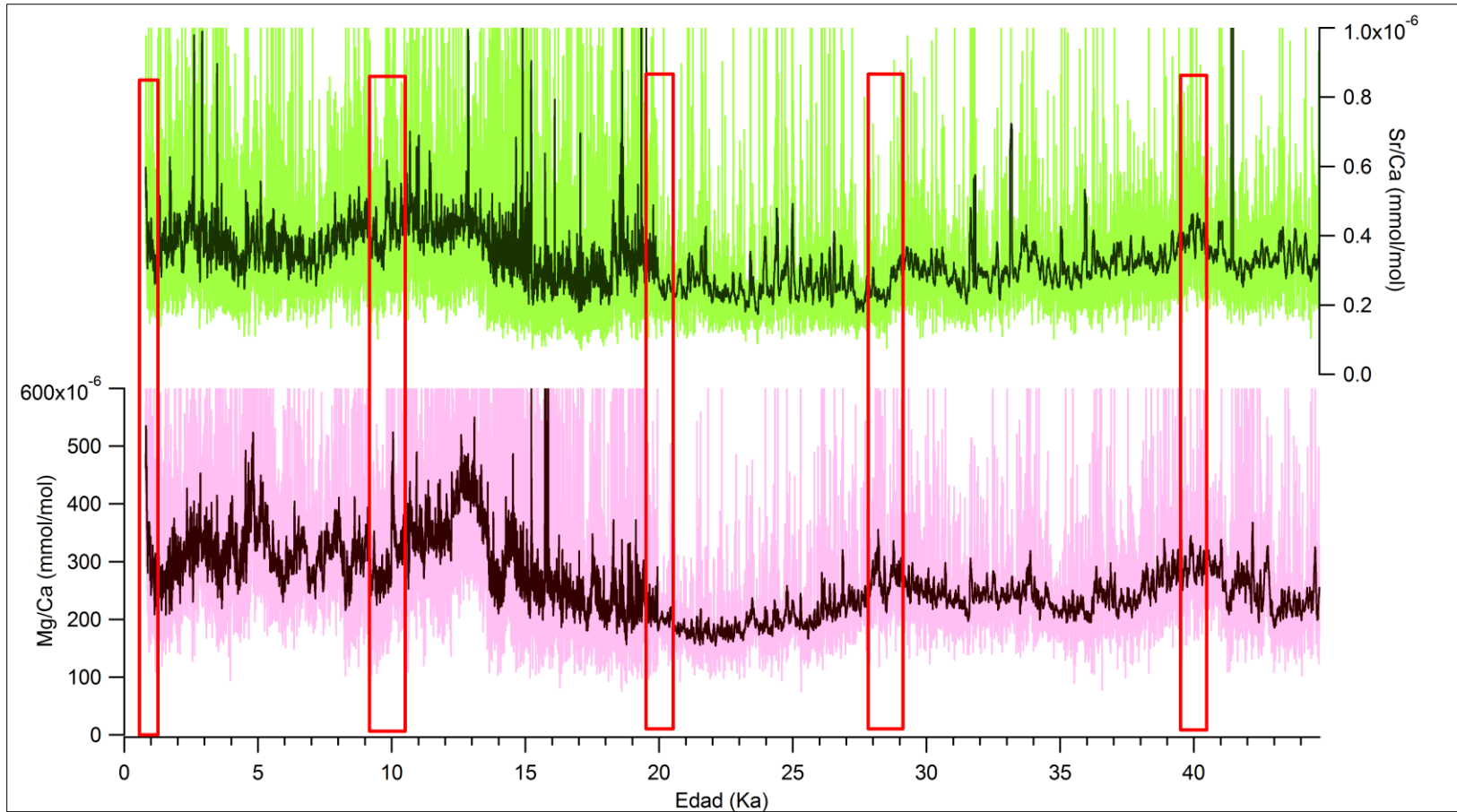
distantes una de la otra, se puede interpretar que el proceso que las controla la variabilidad de los ET en las zonas de crecimiento de ambas estalagmitas es el mismo, y de acuerdo a los resultados obtenidos en las figuras 15 a,17, la PCP de calcita en la zona vadosa y el epikarst es uno de los procesos geoquímicos más importantes modulando la variabilidad de Mg, Sr y Ba en la cueva.

Asimismo, la aparente replicación de ambos registros imparte un mayor grado de robustez a estos, ya que indican que los procesos de movilidad de ET registrados en la estalagmita son representativos de lo que sucede en el epikarst y la zona vadosa sobreyaciendo la cueva y no de procesos microlocalizados.

3.3.3 Relación Mg/Ca, Sr/Ca y Ba/Ca en la estalagmita GRM 03

Al igual que las muestras GRM 01 y GRM 02, para la GRM 03 relaciones E/Ca fueron suavizadas utilizando un promedio móvil de ventana cuadrada de 50 puntos. Sin embargo, a diferencia de las dos muestras descritas en el apartado anterior, en la estalagmita GRM 03 si se realizó el fechamiento, por lo que las gráficas que se presentan, se grafican las edades y no la distancia desde la punta. En la figura 18, se gráfica en el eje X las edades, el eje Y se dividió en tres partes, ya que se hace una comparación y a su vez relacionar el comportamiento de los ET. En la parte superior se gráfica la relación Sr/Ca y en la parte inferior se graficó la relación Mg/Ca.

FIGURA 18
E/Ca VRS EDAD PARA MUESTRA GRM 03



Elaboración propia: Otto Chavarría, 2015.

En la figura 18 podemos observar los distintos comportamientos de los ET que estamos analizando, cada uno de estos tiene una característica propia a lo largo del tiempo, pero presentan similitudes en la relación E/Ca, y se han marcado dentro de recuadros rojos algunos de los cambios más significativos que se replican en los dos registros, dichos cambios ocurren de forma aparentemente periódica ya que se observan cada 10 mil años aproximadamente.

La zona donde se observa un claro incremento en la relación Mg/Ca y Sr/Ca 10 mil a 20 mil años, este rango varía según el elemento. El inicio de este intervalo coincide con el cambio en la tasa de crecimiento de la estalagmita descrita en el apartado 5.2. La zona de la punta de la estalagmita que correspondería a 0.798 Ka, empezada a marcar un alza en la concentración de cada elemento es muy similar al rango de los 10 mil a 20 mil años.

De igual forma el rango entre los 20 mil a 27 mil años, es notoria la baja en las concentraciones de los elementos y/o el alza de calcio, esto mismo sucede en el intervalo de los 42 mil a 44 mil 700 años.

3.4 Interpretación paleoclimática preliminar

Para la interpretación paleoclimática preliminar, el registro de Sr/Ca y Mg/Ca de GRM-03 es comparado con otros registros paleoclimáticos contemporáneos. En particular se buscó comparar con registros paleoclimáticos de los últimos 20 mil años, en donde fueran evidentes eventos de cambio climático abrupto, tales como como *Henrich 1*,

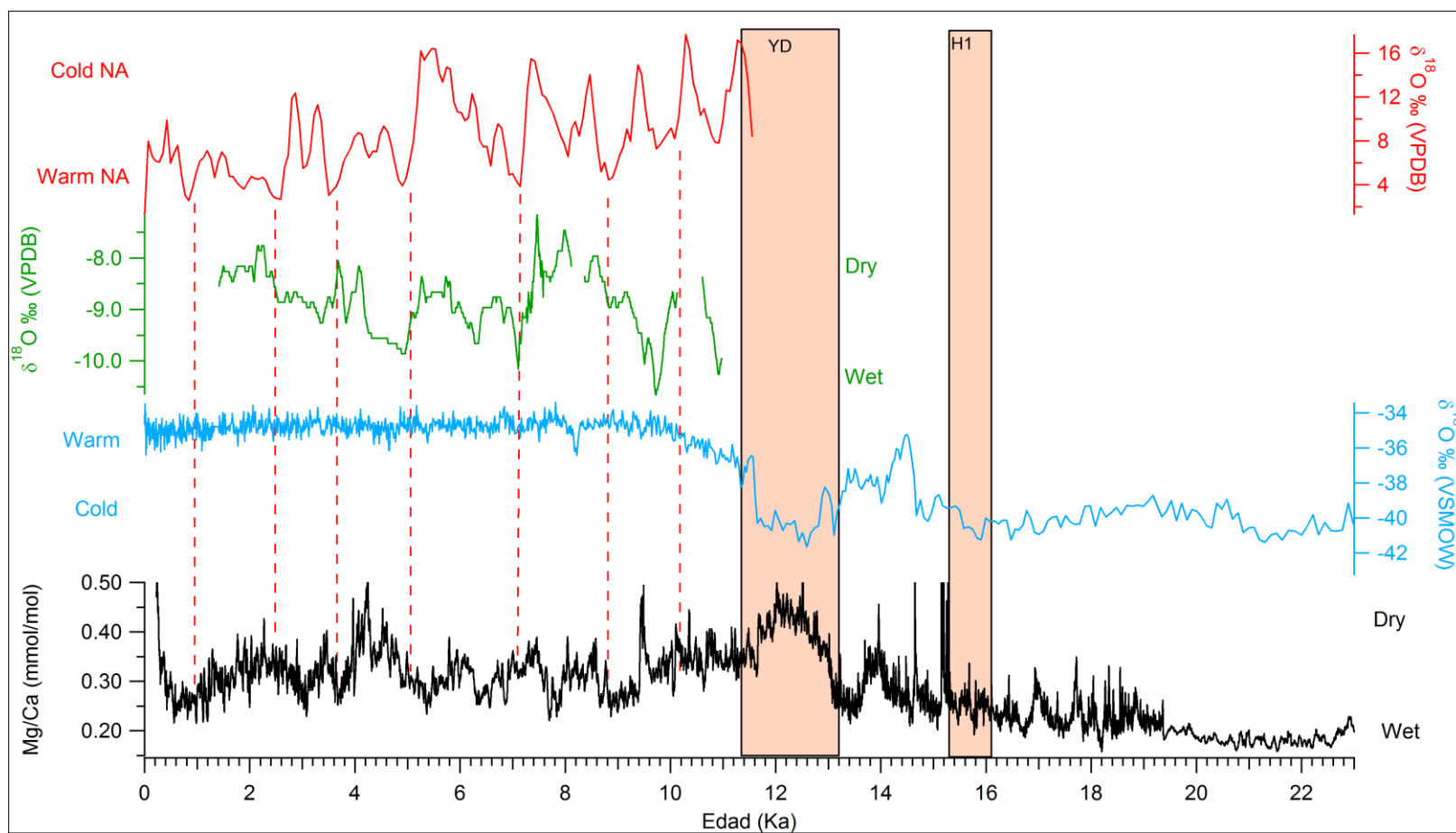
Younger dryas, el último máximo glacial, así como el evento 8,200 durante el Holoceno.

A partir de aquí se utilizará únicamente el Mg para realizar la interpretación paleoclimática debido a que es el que presenta un mejor comportamiento a lo largo del análisis, además que su utilización como un indicador paleoclimático ha sido definido por varios autores (*Huang y Fairchild, 2001; Roberts y col., 1998; Fairchild y Treble, 2009*).

También es importante resaltar que la interpretación paleoclimática se hizo únicamente hasta los 23 Ka, ya que en este tramo se obtuvo información más robusta sobre el comportamiento de E/Ca con respecto al resto de la estalagmita.

En la figura 19, se grafica la muestra GRM 03, comparada con otros 5 registros paleoclimáticos, se definen algunos eventos significativos que se pudieron observar en la muestra. Se diferenciaron las gráficas por colores, el color rojo corresponde al porcentaje de granos arena teñidos con hematita (hematite-stained grains) en sedimentos *marinos del* atlántico norte, indicadores de la abundancia de *icebers* en dicha zona (*Bond et al 2001*). De color verde corresponde a la composición isotópica oxígeno del carbonato de una estalagmita en el sur de México (*Bernal et al, 2011*), indicador de cantidad de lluvia. De color celeste se grafica composición isotópica de oxígeno medidos en núcleos de hielo de Groenlandia (*Johnsen et al 2001*), indicador de temperatura global. Por último, de color negro se grafica la relación Mg/Ca en la estalagmita GRM 03.

FIGURA 19
COMPARACIÓN GENERAL CON GRM 03



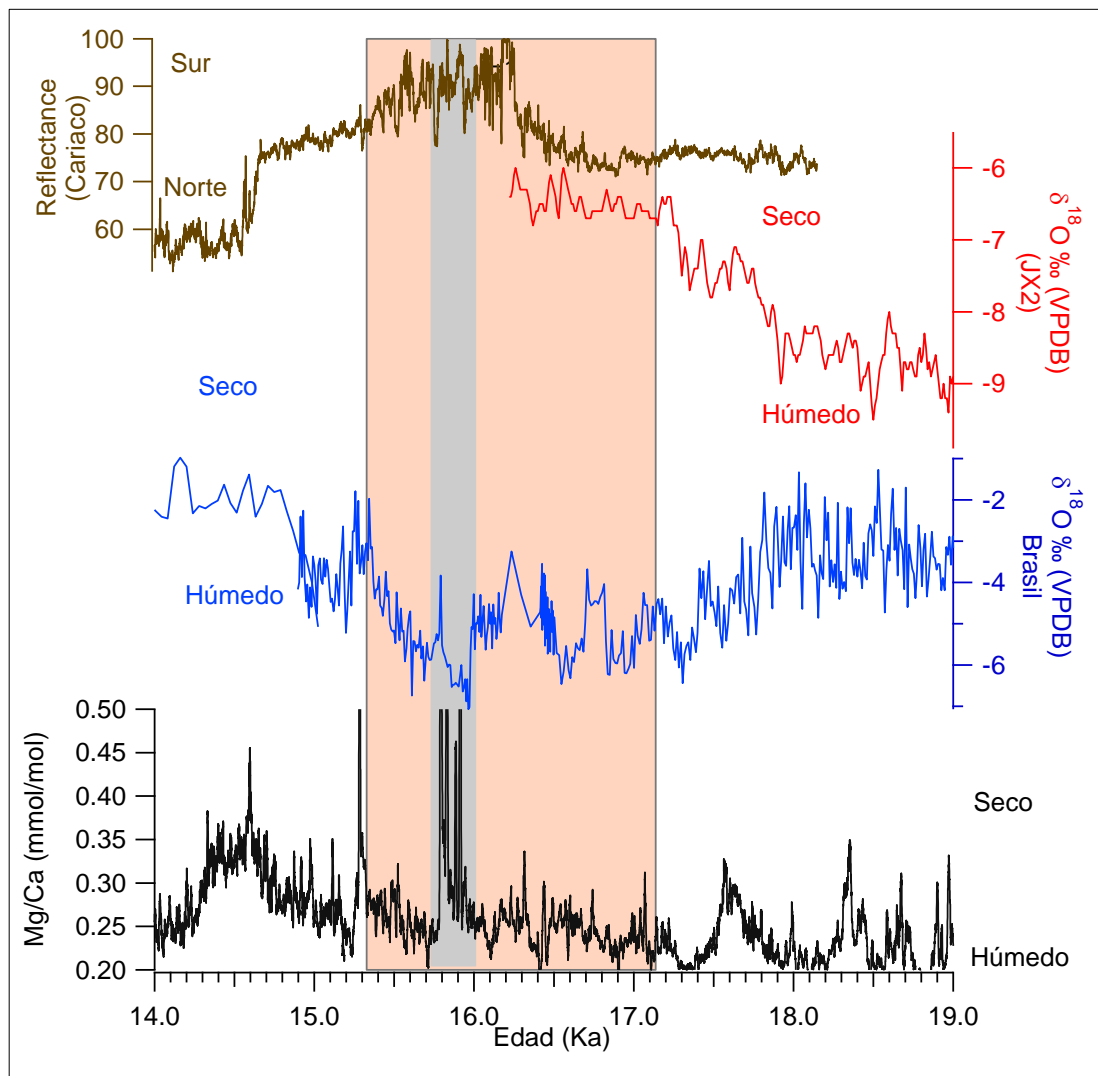
Elaboración propia: Otto Chavarría, 2015.

La figura 19 sirve para comparar los datos de GRM 03 en conjunto con el resto de gráficas o individualmente con alguna. Se delimito en el eje "x" (Ka), los eventos *Henrich 1 (H1)* y *Younger dryers (YD)*, ya que son los únicos visibles a esta escala. El YD es el evento que más fácil se logra reconocer en la muestra GRM 03 y de igual forma es visible en el resto de gráficas. Dicho evento, caracterizado por una disminución drástica en la temperatura global parece haber repercutido en condiciones de sequía en la zona alta de Guatemala.

Para poder analizar de mejor manera el evento *Henrich 1 (H1)*, se realizó otra imagen, figura 20, en la cual se detalla de mejor manera las gráficas y de esta forma se puede apreciar mejor el comportamiento de las mismas.

Para la figura 20 se compara la relación Mg/Ca en GRM 03 durante el evento *Heinrich 1*, con la reflectancia de sedimentos del Golfo de Cariaco, Venezuela (Desplaezes et al 2013), el cual se considera un indicador de la posición promedio de la zona intertropical de convergencia (ZITC), indicando el movimiento de esta hacia el sur o norte, la cual se observa en color mostaza. Se muestra también la composición isotópica de oxígeno del carbonato de una estalagmita del sur de México (*Lachniet et al 2013*), así como una del oeste de Brasil (*Strikis et al 2015*).

FIGURA 20
COMPARACIÓN DE HENRICH 1 EN GRM 03



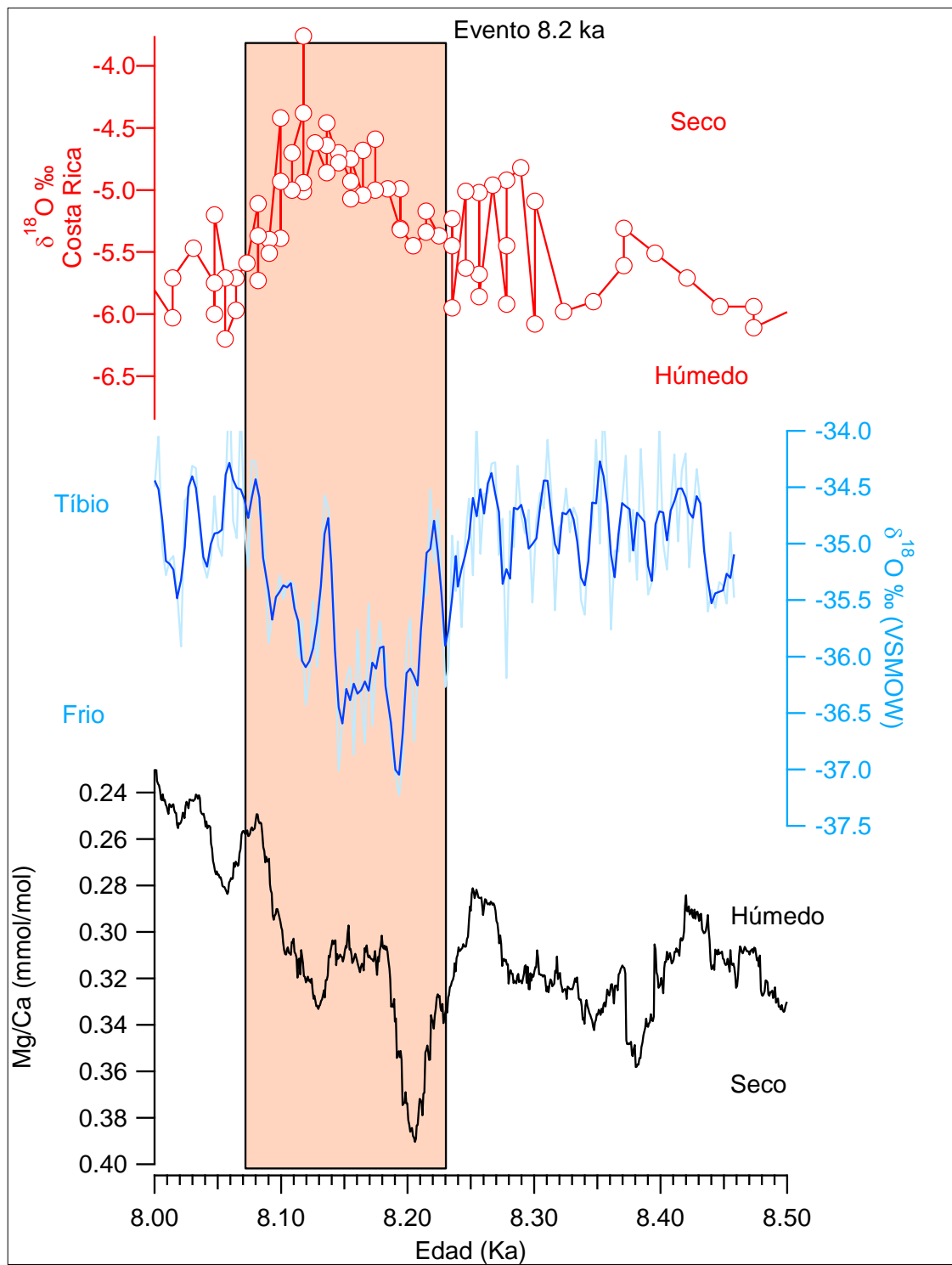
Elaboración propia: Otto Chavarría, 2015.

Al ver las gráficas como se muestra en la figura 19, no se puede apreciar en GRM 03 el evento *Henrich 1*, pero al ver estos mismos datos a un mayor detalle como se muestra en la figura 20, se puede observar que la estalagmita en estudio muestra dos incrementos, al inicio y al final de dicho evento, es decir, nos marca dos picos de sequía y entre ambos una zona de mayor humedad. Con respecto al resto de gráficas, la reflectancia en Cariaco indica que la ZITC se mueve hacia el sur durante

H1, mientras que los isotopos de oxígeno de estalagmitas (Lachniet en el 2013) nos indica una época de sequías incluso haciendo que dicha estalagmita dejara de crecer, GRM 03 también nos indica una época de sequía durante el evento *Henrich 1*. En general la relación entre GRM03 y otros registros paleoclimáticos es compleja, sin embargo, todos coinciden en indicar una anomalía climática intensa y de gran variabilidad entre 15.7 y 16 ka, que se refleja en condiciones de sequía en Alta Verapaz, Guatemala.

En la figura 21 se compara la relación Mg/Ca en GRM03 con la composición isotópica de un conjunto de núcleos de hielo de Groenlandia (*Thomas et al 2007*) y que dan información significativa sobre la duración y estructura de la anomalía climática más relevante del Holoceno, el evento 8.2 (*Alley et al 1997*). Igualmente se presenta un registro hidroclimático de la cueva de Venado (VC) en Costa Rica basado en la variación de la composición isotópica de oxígeno en estalagmita (*Lachniet et al 2004*). Cabe hacer notar que por cuestión de claridad en la comparación, los datos de Mg/Ca se han graficado en escala inversa.

FIGURA 21
COMPARACIÓN DE EVENTO 8.2 KA EN GRM 03



Elaboración propia: Otto Chavarría, 2015.

La comparación entre los registros de GRM 03 y VC concuerda en que durante el evento 8.2 imperaron condiciones de sequía en toda América Central. Es de gran relevancia subrayar que el registro de GRM 03 concuerda tanto en temporalidad como estructura doble para este evento con lo registrado en núcleos de hielo de Groelandia (*Thomas et al, 2007*), así como con otros registros de estalagmitas de diversas partes del mundo (*Cheng et al 2009*)

CONCLUSIONES

La dinámica y la evolución climática de Mesoamérica en los últimos 23 mil años se ha visto modulada por diversos eventos climáticos de escala global, los cuales se reflejan de una forma propia en esta región, para esta investigación nos centramos en rasgos significativos, comparando la estalagmita en estudio con otras investigaciones realizadas. La estalagmita GRM 03 logró alcanzar los 102 mil años de antigüedad, aunque únicamente se estudiaron los últimos 23 mil años, con lo cual se logró superar el tiempo que se pretendía obtener a un inicio.

Este análisis se llevó a cabo utilizando *LAICPMS*, estableciéndose las variaciones elementales relativas con alta resolución espacio-temporal. Además, se logró establecer que la relación E/Ca es modulada por condiciones hidrológicas en el epikarst, constituyendo así el primer registro de variabilidad climática de alta resolución realizado en Guatemala, a partir de las variaciones de elementos traza (Ca, Sr, Mg y Ba) en una estalagmita.

La estalagmita GRM 03 logró alcanzar los 102 mil años de antigüedad. Únicamente se estudiaron los últimos 23 mil años ya que en estos se obtuvo mayor certeza de los resultados, logrando así superar el tiempo que se pretendía obtener a un inicio.

Es compleja la comparación entre GRM 03 y otros registros paleoclimáticos, pero es importante resaltar, que todos coinciden en indicar una anomalía climática intensa y de gran variabilidad entre 15.7 y 16 ka, reflejando condiciones de sequía en la zona norte de Guatemala. El evento *Henrich 1* se reflejó en GRM 03 con dos incrementos abruptos en

la relación Mg/Ca, al inicio y al final de dicho evento, indica dos picos de sequía y entre ambos una zona de mayor humedad, cuando se comparan los datos obtenidos con otras investigaciones como la reflectancia en Cariaco, indica que la ZITC se mueve al sur durante H1, mientras que los isótopos de oxígeno de estalagmitas del sur de México (Lachniet et al 2013) muestran también una época de sequías, incluso haciendo que dichas estalagmitas dejaran de crecer.

. El evento *Younger dryas* (YD) es el más evidente en GRM 03. Dicho evento, se caracteriza por una disminución drástica en la temperatura global tal como se refleja en la composición isotópica de oxígeno medidos en núcleos de hielo (*Johnsen et al 2001*), pero en GRM 03 se observa que en la zona alta de Guatemala parece haber repercutido en condiciones de sequía. Entre las peculiaridades observadas luego del *Younger dryas*, es la correlación entre las temperaturas en el atlántico norte con los datos de GRM 03, ya que cuando en esa región se alcanzan temperaturas elevadas, en el norte de Guatemala se entra en periodos de mayor lluvia.

El evento 8.2 se refleja en GRM 03 con condiciones de baja humedad, al ser comparados con el registro hidroclimático de la Cueva de Venado (VC) en Costa Rica (*Lachniet et al 2004*), se puede concluir que en toda Mesoamérica las condiciones que imperaron son de sequía durante la anomalía climática. Es importante resaltar la concordancia que hay tanto en temporalidad como en estructura doble con lo registrado en núcleos de hielo de Groenlandia (*Thomas et al, 2007*).

RECOMENDACIONES

Es de suma importancia que se realicen más trabajos sobre la dinámica y evolución climática en la región, pero especialmente en Guatemala, ya que no se cuenta con suficientes registros que ayuden a respaldar las distintas teorías que se tengan sobre el comportamiento del paleoclima en el país.

Es necesaria la tecnificación y modernización de los laboratorios de la Carrera de Geología de la Universidad de San Carlos, para poder realizar estudios de este tipo o similares, de tal forma se podrán realizar más investigaciones que enriquezcan los registros paleoclimáticos actuales.

Se debe continuar con el estudio de las muestras GRM 01 y GRM 02, realizándoles la datación isotópica tal como se hizo con GRM 03. Además, es de suma importancia que se realice un estudio de isotopos de oxígeno en las tres muestras, ya que de este modo se podrá contar con un registro paleoclimático con mayores argumentos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aliaga-Campuzano, M.P., Et.Al. "Distribution of Rare Earth Elements between cave-drip water and speleothem calcite". *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73A, A27. (junio 2009): 387-397.
- Alley, R.B. y Ágústsdóttir, A.M. "The 8k event: cause and consequences of a major Holocene abrupt climate change". *Quaternary Science Reviews*. 24. (mayo 2005): 1123-1149.
- Apóstegui, J.E., Et.Al. "South American Monsoon Variability During The Last 1000 Years Inferred From Northeastern Peruvian Speleothems". 2010 *Eos Trans, AGU, 91 (26) Meet. Am. Suppl.* (diciembre 2012): Extracto #PP24B-06.
- Ayliffe, L.K., Et.Al. "500 ka precipitation record from southeastern Australia: Evidence for interglacial relative aridity". *Geology*. 26. (febrero 1998): 147- 150.
- Baldini, J.U.L., Et.Al. "Structure of the 8200-Year Cold Event Revealed by a Speleothem Trace Element Record". *Science*. 296. (junio 2002): 2203-2206.
- Bernal, J.P., Et.Al. "A speleothem record of Holocene climate variability from southwestern Mexico". *Quaternary Research*. 75. (enero 2011): 104-113.
- "Trace Element, d18O and d13C in a Holocene Stalagmit from Southwestern Mexico". *Eos Trans. AGU, 87, Fall Meet. Suppl.* (diciembre 2006): Extracto 53A-07.
- Borsato, A., Et.Al. "Trace element distribution in annual stalagmite laminae mapped by micrometer-resolution X-ray fluorescence: Implications for incorporation of environmentally significant species". *Geochimical et Cosmochimica Acta* 71. (marzo 2007): 1494-1512.
- Bush, M.B., Et.Al. "Re-evaluation of Climate Change in Lowland Central America During the Last Glacial Maximum Using New Sediment Cores from Lake Petén Itzá, Guatemala". *Springer Netherlands*. 14. (julio 2009): 113-128.

- Caffrey, M.A., Et.Al. "A 12,000-year Record of Vegetation and Climate Change from the Sierra de Los Cuchumatanes, Guatemala". *Journal of Latin American Geography*. 10. (febrero 2011): 129-151.
- Conroy, J.L., Et.Al. "Holocene changes in eastern tropical Pacific climate inferred from a Galápagos lake sediment record". *Quaternary Science Reviews*. 27. (mayo 2008): 1166-1180.
- Comisión Presidencial Coordinadora de la Política del Ejecutivo en Materia de Derechos Humanos -COPREDEH-. "*Informe del Estado de Guatemala Resolución 7/23 del Consejo de Derechos Humanos: Los derechos humanos y el cambio climático*". Guatemala: COPREDEH. 2009.
- Davis, B.A.S. y A.C., Stevenson. "The 8.2 ka event and Early-Mid Holocene forests, fires and flooding in the Central Ebro Desert, NE Spain". *Quaternary Science Reviews*. 26. (junio 2007): 1695-1712.
- Davis, M., Et.Al. "Holocene Climate in the Western Great Lakes National Parks and Lakeshores: Implications for Future Climate Change". *Conservation Biology*. 14. (agosto 2000): 968-983.
- Dima, M. y G., Lohmann. "A Hemispheric Mechanism for the Atlantic Multidecadal Oscillation". *Journal of Climate*. 20. (junio 2007): 2706-2719.
- Fairchild, I.J., Et.Al. "Annual to sub-annual resolution of multiple trace-element trends in speleothems". *J. Geol. Soc.* 158. (septiembre 2001): 831-841.
- , "Modification and preservation of environmental signals in speleothems". *Earth-Science Reviews*. 75. (marzo 2006): 105-153.
- , "Trace elements in speleothems as recorders of environmental change". *Quaternary Science Reviews*. 28. (marzo 2009): 449-468.
- Feng, S., Et.Al. "Influence of Atlantic sea surface temperatures on persistent drought in North America". *Clim Dyn DOI* 10. 1007/s00382-010-0835-x. (agosto 2011): 569-586.
- Frappier, A., Et.Al. "El Nino Events Recorded by Stalagmite Carbon Isotopes". *Science*. 298. (octubre 2002): 565.
- Heinrich, H. "Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years". *Quaternary Research*. 29. (marzo 1988): 142-152.

- Hernández-Mendiola, Et.Al. "U-series dating of carbonates using inductively coupled plasma-quadrupole massspectrometry". *Quaternary Geochronology*. 6. (diciembre 2011): 564-573.
- , "Comparison of new geochemical proxies in a stalagmite from sub tropical Mexico". *Eos Trans. AGU 88, Jt. Assem. Suppl.* (mayo 2007): Extracto PP43C-09.
- Hodell, D.A., Et.Al. "An 85-ka record of climate change in lowland Central America". *Quaternary Science Reviews*. 27. (junio 2008): 1152-1165.
- Hu, Q. and S. Feng, "Variation of the North American Summer Monsoon Regimes and the Atlantic Multidecadal Oscillation". *Journal of Climate*. 21. (junio 2008): 2371-2383.
- Huang, H.M., Et.Al. "Seasonal variations in Sr, Mg and P in modern speleothems (Grotta di Ernesto, Italy)". *Chemical Geology*. 175. (junio 2001): 429-448.
- Knight, J.R., Et.Al. "A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate". *Geophysical Research Letters*. 32. (octubre 2005): L20708, doi:10.1029/2005GL024233.
- , "Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation". *Geophysical Research Letters*. 33. (septiembre 2006): L17706, doi:10.1029/2006GL026242.
- Lachniet, M.S. "Climatic and environmental controls on speleothem oxygen-isotope values". *Quaternary Science Reviews*. 28. (enero 2009): 412-432.
- , Et.Al. "A vigorous Mesoamerican monsoon during the Last Glacial Maximum driven by orbital and oceanic forcing". *Science*. (diciembre 2012): 1051.
- , "Tropical response to the 8200 yr BP cold event? Speleothem isotopes indicate a weakened early Holocene monsoon in Costa Rica". *Geology*. 32. (noviembre 2004): 957-960.
- , "A 2400 yr Mesoamerican rainfall reconstruction links climate and cultural change". *Geology*. 40. (enero 2012): 259-262.
- , "A 1500-year El Nino/Southern Oscillation and rainfall history for the Isthmus of Panama from speleothem calcite". *Art. no. D20117. J. Geophys. Res.-Atmos 109, 20117*. Estados Unidos de América: 2004.

- LoDico, J.M., Et.Al. "Subcentennial-scale climatic and hydrologic variability in the Gulf of Mexico during the early Holocene". *Paleoceanography*. 21. (septiembre 2006): PA3015, doi:10.1029/2005PA001243.
- Lozano-Garcia, S., Et.Al. "Tracing the effects of the Little Ice Age in the tropical lowlands of eastern Mesoamerica". *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 104. 41. (octubre 2007): 16200-16203
- Magaña, V., Et.Al. "The midsummer drought over Mexico and Central America". *Journal of Climate*. 12. (junio 1999): 1577-1588.
- "Impact of El Niño on precipitation in Mexico". *Geofísica Internacional*. 42. (julio 2003): 313-330.
- Mann, M. "Little Ice Age". *Encyclopedia of Global Environmental Change*. Estados Unidos de América: John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 2002.
- Medina-Elizalde, M., Et.Al. "High resolution stalagmite climate record from the Yucatán Peninsula spanning the Maya terminal classic period". *Earth and Planetary Science Letters*. 298. (septiembre 2010): 255-262.
- Medina, C.E., Et.Al. "Water level fluctuations derived from ENVISAT Radar Altimeter (RA-2) and in-situ measurements in a subtropical waterbody: Lake Izabal (Guatemala)". *Remote Sensing of Environment*. 112. (Septiembre 2008): 3604-3617.
- Moy, C.M., Et.Al. "Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch". *Nature*. 420. (noviembre 2002): 162- 165.
- Panel Intergubernamental sobre cambio climático -IPCC-. "*IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007: The Physical Science Basis*". Suiza: IPCC., 2007.
- Pedrerros, D. Et.Al. *The effects of El Niño on agricultural water balance in Guatemala, Fall Meeting, American Geophysical Union*. San Francisco, California, United State of America: American Geophysical Union, 2010.
- Richards, D.A. y J.A. Dorale "*Uranium-series chronology and environmental applications of speleothems. Uranium-Series geochemistry*". Washington, Distrito de Columbia, United State of America: Mineralogical Society of America & The Geochemical Society, 2003.

- Sinclair, D.J. "Two mathematical models of Mg and Sr partitioning into solution during incongruent calcite dissolution: Implications for dripwater and speleothem studies". *Chemical Geology*. 283. (abril 2011): 119-133.
- Tinner, W. y A.F. Lotter. "Central European vegetation response to abrupt climate change at 8.2 ka". *Geology*. 29. (junio 2001): 551-554.
- Treble, P., Et.Al. "Comparison of high resolution sub-annual records of trace elements in a modern (1911-1992) speleothem with instrumental climate data from southwest Australia". *Earth and Planetary Science Letters*. 216. (noviembre 2003): 141-153.
- van Calsteren, P. y L. Thomas. "Uranium-series dating applications in natural environmental science". *Earth-Science Reviews*. 75. (marzo 2006): 155- 175.
- Wang, C. y D.B. Enfield. "A Further Study of the Tropical Western Hemisphere Warm Pool". *Journal of Climate*. (mayo 2003): 1476-1493.
- "ENSO variability and the eastern tropical Pacific: A review". *Progress In Oceanography*. 69. (Junio 2006): 239-266.
- Wang, Y.J., Et.Al. "A High-Resolution Absolute-Dated Late Pleistocene Monsoon Record from Hulu Cave, China". *Science*. 294. (diciembre 2001): 2345-2348.
- Webster, J.W., Et.Al. "Stalagmite evidence from Belize indicating significant droughts at the time of Preclassic Abandonment, the Maya Hiatus, and the Classic Maya collapse". *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 250. (junio 2007): 1-17.
- Wiersma, A.P. and H. Renssen. "Model-data comparison for the 8.2 ka BP event: confirmation of a forcing mechanism by catastrophic drainage of Laurentide Lakes". *Quaternary Science Reviews*. 25. (enero 2006): 63-88.
- Winograd, I.J., Et.Al. "Continuous 500,000-year climate record from vein calcite in Devils-Hole, Nevada". *Science*. 258. (octubre 1992): 255-260.



V.º B.º
[Handwritten signature]

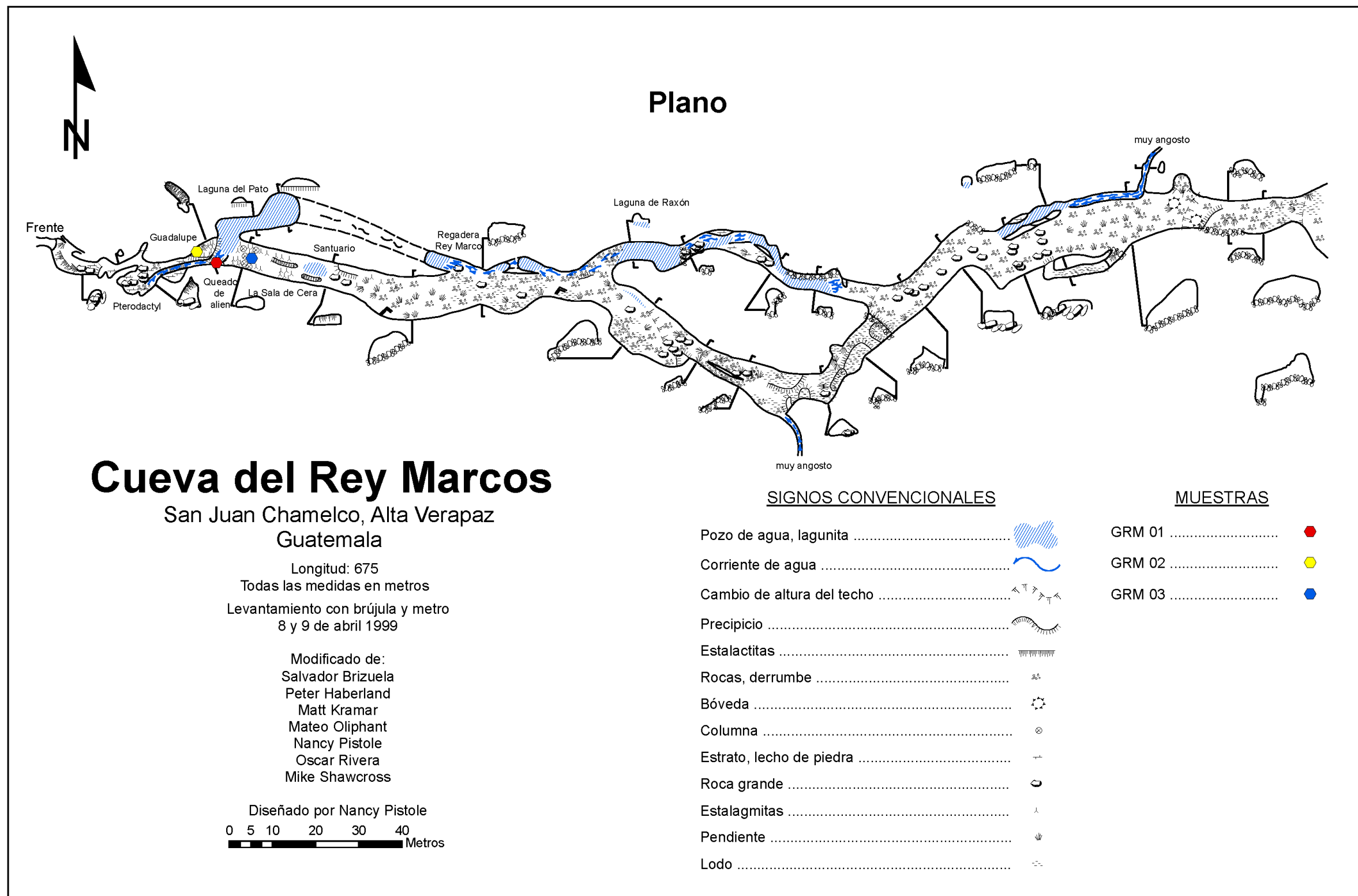
Adán García Véliz

Licenciado en Pedagogía e Investigación Educativa
 Bibliotecario



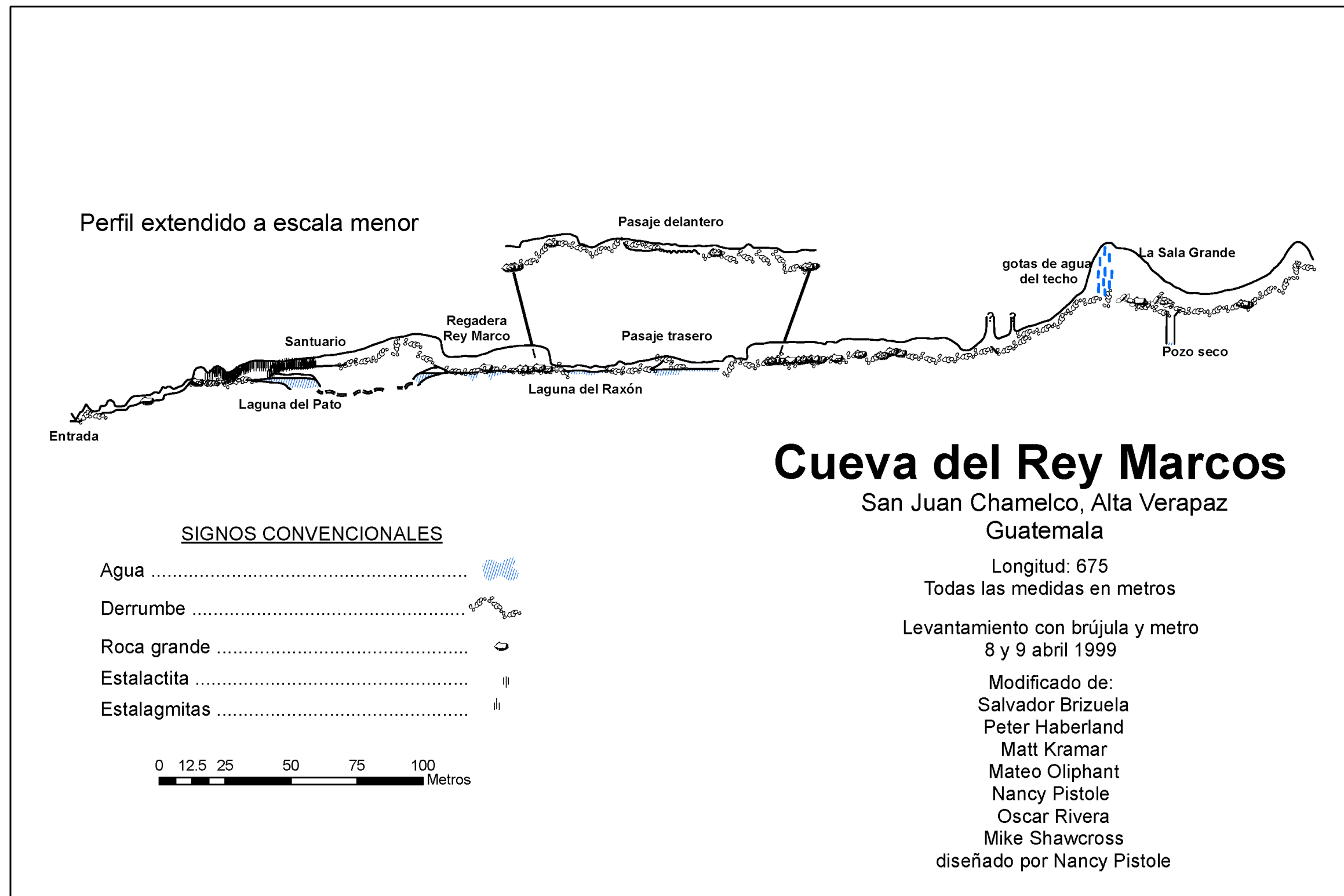
ANEXOS

MAPA DE LAS GRUTAS DEL REY MARCOS



Fuente: Modificado de Nancy Pistole, 1999.

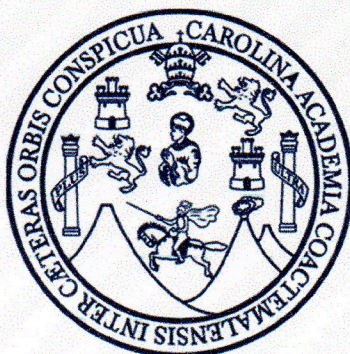
PERFIL DE LAS GRUTAS DEL REY MARCOS



Fuente: Modificado de Nancy Pistole, 1999.

USAC CUNOR

Universidad de San Carlos de Guatemala
Centro Universitario del Norte



El Director del Centro Universitario del Norte de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer los dictámenes de la Comisión de Trabajos de Graduación de la carrera de:

INGENIERO GEÓLOGO

Al trabajo titulado:

ESTUDIO DE LA DINÁMICA Y EVOLUCIÓN CLIMÁTICA DE MESOAMÉRICA A PARTIR DEL REGISTRO ELEMENTAL DE ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL DE ESTALAGMITAS DESARROLLADAS EN LAS GRUTAS DEL REY MARCOS, SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ

Presentado por el (la) estudiante:

OTTO INQUE CHAVARRÍA ROBLES

Autoriza el

IMPRIMASE

Cobán, Alta Verapaz 21 de Agosto de 2017.

Lic. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales
DIRECTOR

