



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**ANÁLISIS ESPECTRAL DE UNA ESTALAGMITA BANDEADA COMO
INDICADOR PALEOCLIMÁTICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(GEOQUÍMICA Y PETROLOGÍA)

PRESENTA

HAYDAR BENYACUB MARTÍNEZ IZQUIERDO DYRZO

TUTOR

DR. JUAN PABLO BERNAL URUCHURTU

JURADO EXAMINADOR

DIRECTOR DE TESIS: DR. JUAN PABLO BERNAL URUCHURTU
PRESIDENTE: DR. HÉCTOR ROMÁN PÉREZ ENRÍQUEZ
VOCAL: DR. LORENZO VÁZQUEZ SELEM
SUPLENTE: DRA. MARGARITA CABALLERO MIRANDA
SUPLENTE: DR. PRIYADARSI DEBAJYOTI ROY



MÉXICO D.F.

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

ANÁLISIS ESPECTRAL DE UNA ESTALAGMITA BANDEADA COMO INDICADOR PALEOCLIMÁTICO

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(GEOQUÍMICA Y PETROLOGÍA)

Presenta

Haydar Benyacub Martínez Izquierdo Dyrzo

México D.F.

2010

Jurado asignado

Presidente: Dr. **HÉCTOR ROMÁN PÉREZ ENRÍQUEZ**

Vocal: Dr. **LORENZO VÁZQUEZ SELEM**

Secretario: Dr. **JUAN PABLO BERNAL URUCHURTU**

1^{er} Suplente: Dra. **MARGARITA CABALLERO MIRANDA**

2^{do} Suplente: Dr. **PRIYADARSI DEBAJYOTI ROY**

Sitio donde se desarrolló el tema:

INSTITUTO DE GEOLOGIA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Asesor: Dr. Juan Pablo Bernal Uruchurtu

Sustentante: Q. Haydar Benyacub Martínez Izquierdo Dyrzo



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
CENTRO DE GEOCIENCIAS

Campus Juriquilla, Boulevard Juriquilla No. 3001,
Querétaro, CP 76230

Apdo. Postal 1-742, Querétaro, Qro., CP 76001

Tel. (52-442)238-1104, (55)5623-4104 Fax(52-442)238-1124, (55)5623-4124

<http://www.geociencias.unam.mx>



20 de enero de 2010

DRA. ELSA LETICIA FLORES MÁRQUEZ
COORDINADORA
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
U.N.A.M.
PRESENTE

Por este conducto me permito comunicar, que en mi calidad de jurado para examen de grado del estudiante de Maestría en Ciencias de la Tierra (Geoquímica y Petrología) HAYDAR BENYACUB MARTÍNEZ IZQUIERDO DYRZO, he leído y revisado la tesis titulada “**Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático**” y considero que se encuentra lista para su defensa.

A mi juicio el estudiante ha realizado un buen trabajo incorporando los cambios sugeridos, por lo que doy mi voto aprobatorio.

Sin más por el momento reciba un cordial saludo,

Atentamente

Dr. Héctor Román Pérez Enríquez

Ciudad Universitaria, a 15 de noviembre de 2009

Asunto: **Voto aprobatorio**

DRA. ELSA LETICIA FLORES MÁRQUEZ
COORDINADORA
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
U.N.A.M.

PRESENTE

Por este conducto me permito comunicar que, en mi calidad de jurado para examen de grado del estudiante de Maestría en Ciencias de la Tierra (Geoquímica y Petrología) **HAYDAR BENYACUB MARTÍNEZ IZQUIERDO**, he leído y revisado la tesis titulada "**Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático**" y considero que ésta cubre los requisitos señalados en los lineamientos académicos del Posgrado en Ciencias de la Tierra. Se trata de un trabajo muy bien escrito y fundamentado, de gran interés para el desarrollo de los estudios paleoambientales en México.

A mi juicio el estudiante puede continuar con los trámites para la obtención del grado.

Sin más por el momento reciba un cordial saludo,

Atentamente

Dr. Lorenzo Vázquez Selem



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE GEOLOGIA
APARTADO POSTAL 70-296 CIUDAD UNIVERSITARIA
04510 MEXICO, D. F.

Ciudad Universitaria, a 10 de Enero del 2010

Asunto: Voto Aprobatorio

DRA. ELSA LETICIA FLORES MÁRQUEZ
COORDINADORA
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
U.N.A.M.
PRESENTE

Por este conducto me permito comunicar, que en mi calidad de jurado para examen de grado del estudiante de Maestría en Ciencias de la Tierra (Geoquímica y Petrología) HAYDAR BENYACUB MARTÍNEZ IZQUIERDO DYRZO, he leído y revisado la tesis titulada **"Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático"** y considero que la tesis reúne los requisitos fundamentales de calidad para ser una tesis de Maestría. A mi juicio el estudiante Haydar Benyacub Martínez-Izquierdo Dyrzo realizó un trabajo extenso sobre el estudio de un posible nuevo indicador paleoclimático en estalagmitas, y ha realizado las correcciones solicitadas en la revisión del texto de manera adecuada.

Sin más por el momento reciba un cordial saludo,

Atentamente

Dr. Juan Pablo Bernal Uruchurtu
Departamento de Geoquímica
Instituto de Geología
jpbernal@geologia.unam.mx

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



INSTITUTO DE GEOFÍSICA

Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, C.P. 04510, México D.F., México

Margarita Caballero

TEL: (55) 56224233

FAX: (55) 55509395

maga@geofisica.unam.mx

Ciudad Universitaria, a 19 de enero de 2010

Asunto: Voto Aprobatorio

DRA. ELSA LETICIA FLORES MÁRQUEZ
COORDINADORA
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
U.N.A.M.
PRESENTE

Por este conducto me permito comunicar, que en mi calidad de jurado para examen de grado del estudiante de Maestría en Ciencias de la Tierra (Geoquímica y Petrología) HAYDAR BENYACUB MARTÍNEZ IZQUIERDO DYRZO, he leído y revisado la tesis titulada "Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático" y considero que este trabajo de tesis está bien desarrollado y bien presentado cumpliendo con lo requisitos necesarios para ser aprobado.

A mi juicio el estudiante HAYDAR BENYACUB MARTÍNEZ IZQUIERDO DYRZO realizó un trabajo muy completo y le extiendo una felicitación por haber culminado su trabajo de manera tan satisfactoria.

Sin más por el momento reciba un cordial saludo,

Atentamente

Dra. Margarita Caballero

Ciudad Universitaria, a 19 de enero del 2010

Asunto: Voto **Aprobatorio**

DRA. ELSA LETICIA FLORES MÁRQUEZ
COORDINADORA
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
U.N.A.M.
PRESENTE

Por este conducto me permito comunicar, que en mi calidad de jurado para examen de grado del estudiante de Maestría en Ciencias de la Tierra (Geoquímica y Petrología) HAYDAR BENYACUB MARTÍNEZ IZQUIERDO DYRZO, he leído y revisado la tesis titulada **"Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático"** y considero que el alumno ha realizado los cambios que he solicitado.

A mi juicio el estudiante puede realizar el examen de grado.

Sin más por el momento reciba un cordial saludo,

Atentamente

Dr. Priyadarsi Debajyoti Roy
Instituto de Geología, UNAM

**"Padre perdónanos por los pecados
sana la tierra
Mira que todos necesitamos
paz y no guerra
Prende la caldera que en el fuego se quema
todita la mentira y se derriten las penas
Prende la caldera, mira que hay luna llena
baila conmigo esta danza del amor"
Juanes**

**"You raise me up, so I can stand on mountains;
You raise me up, to walk on stormy seas;
I am strong, when I am on your shoulders;
You raise me up...
To more than I can be."
Brendan Graham**

**Так пусть тебе поможет небо
Остановит время,
Поднимая крылья твои к небесам.
Так пусть тебе поможет небо
Всё ещё возможно,
Там куда приводит однажды мечта
Ведь всё в твоих руках.
Дима Билан**

**„Hey, alles glänzt, so schön neu.
Hey, wenns dir nicht gefällt, mach neu.
Hier ist die Luft verbraucht, das Atmen fällt mir schwer.
Bye Bye ich muss hier raus, die Wände kommen näher.
Die Welt mit Staub bedeckt, doch ich will sehn wo's hingeht.
Steig auf den Berg aus Dreck, weil oben frischer Wind weht.
Hey, alles glänzt, so schön neu“
Peter Fox**

**«J'ai compris qui je suis
Lorsque tu m'a souris
Tu m'a redonné gout à la vie
J'ai compris d'ou tu viens
Maintenant je me souviens
C'était écrit dans les lignes de nos mains»
Thierry Cham**

A papá y mamá.

Agradecimientos:

Agradezco al proyecto “Calibración de parámetros geoquímicos utilizados como indicadores paleoambientales en estalagmitas a partir de espeleogénesis experimental in situ, y su aplicación a la determinación de condiciones paleoambientales en el Cuaternario Tardío”, (Clave 78828) del CONACyT por el presupuesto asignado, a esta misma institución, la beca otorgada a mi persona por buena parte del tiempo que duró mi maestría. Y al proyecto PAPIIT por la compra del material utilizado.

Agradezco profundamente la asesoría, apoyo, dedicación, preocupación, turbación, enseñanzas y confianza del Dr. Juan Pablo Bernal Uruchurtu. Ante todo por haberme dado la oportunidad de trabajar con él, a pesar de que mi licenciatura no fuera una geociencia y del lastimero promedio de la misma. La verdad nunca pensé que algún día iba a poder utilizar una técnica tan sofisticada como la LA-ICP-MS, gracias doctor por haberme dado esa oportunidad. Recuerdo que se me dijo que esto no era un club de excursionismo, espero haber demostrado en esta tesis, que no lo tomé así.

Mis más sinceras gracias al Dr. Juan Morales Malacara y su equipo del laboratorio Anita Hoffmann de Acarología; a los biólogos Adriana Espino Del Castillo, Marisol Vega, Miguel Hernández Patricio (a ustedes cuatro gracias por comprender mi acrofobia), a los biólogos Yunuel Ávila, Estefani Ortega, Sara Soriano, Itzel Sigala, Mayra Dávila Montes, y Ricardo Paredes León, todos ustedes por su ayuda en la recolección de la estalagmita y por su apoyo en lo referente a bioespeleología a lo largo de este trabajo.

Mi más profundo agradecimiento al Dr. Román Pérez Enríquez por la atención a mis dudas en la creación de series de tiempo y el análisis espectral. Y mi eterno agradecimiento al Dr. Harald Böhmel por su apoyo, sugerencias y creación del proyecto. A ambos por las aportaciones en este proyecto.

A la M. en C. Elena Lounejeva por su ayuda en la preparación de las muestras para el fechamiento. Al Dr. Malcolm McCulloch por su colaboración en el fechamiento por desequilibrio de series de uranio. Al Dr. Luigi Solari, al Dr. Martin Tanner (gracias por explicarme), a la M. C. Ofelia Pérez Arvizu y al Dr. Arturo Gómez Tuena por su ayuda en los análisis en el LA-ICP-MS. Al Ing. Carlos Linares López por su ayuda en el análisis con el MIB. A la Dr. Socorro Lozano por su ayuda en la comparación de registros paleoclimáticos, al M. C. Alejandro Correa por sus lecciones en la parte de prueba de hipótesis. A la Ing. Consuelo Macías por la tarjeta de la cámara del microscopio. A la Dr. Bárbara Martiny por el microscopio mineralógico, al Dr. José Luis Sánchez Zavala por el microscopio petrográfico. A la Dr. Ana Bertha Villaseñor Martínez y la M. C. Iriliana Lopez Caballero por las fotomicrografías digitales de la muestra en lámina delgada.

Al arqueólogo Cesar Berkovich, a la arqueóloga Berenice Solís y al Biol. Fabián Durán por algunas discusiones. A la Q. Pilar Aliaga Campuzano, gracias por tu comprensión y por decirme que en esto no tengo futuro, al Q. Ernesto Hernández Mendiola, por toda su ayuda, enseñanza, eres un gran químico, perdón si te hice la vida más difícil, a la Geol. Sandra Briceño por escucharme, a ustedes tres, por sus críticas y por sus trabajos, los cuáles fueron fuentes de retroalimentación para este proyecto.

A la gente en Zapotitlan de Mendez, en especial a la familia Rojas; a la gente de Cuetzalan, en especial a doña Guille, por sus comidas, la gente de Jalpan de Serra, a todos ellos que nos ayudaron a hacer nuestro trabajo de campo más confortable y seguro.

También agradezco al posgrado de Ciencias de la Tierra por permitirme estudiar esta maestría. Cuando me presenté ante ustedes en la entrevista, la escena fue igual a cuando Anakin Skywalker se presentó ante el consejo Jedi por primera vez. Espero haber demostrado que era digno de este conocimiento, gracias por compartirlo. Quiero expresarles, que estoy enamorado de la geología. Sin embargo con la química tengo una relación lasciva y lujuriosa.

A los que me dieron razones para amar a la geología, el Dr. Gustavo Tolson, por enseñarme un planeta fascinante; al Dr. Dante Morán Zenteno y al Dr. Luis Espinoza Arrubarrena, por enseñarme 4500 Ma de continuo amor; a la Dr. María del Socorro Lozano García y la Dr. Margarita Caballero Miranda por mostrarme como el clima funciona y cambia; al Dr. Iury Taran por enseñarme como la ciencia central devela secretos de los ambientes ígneos; al Dr. Jesús Solé Viñas por enseñarme como preguntarle la edad a un mineral o una roca; al Dr. Mikhail Ostroumov por compartir una pasión, la de los minerales, al Dr. Ricardo Barragán Manzo y a la Dr. Elena Centeno García por presentarme las rocas sedimentarias; a esta última, al Dr. Armando García Palomo y al Dr. José Luis Sánchez Zavala por enseñarme cómo pensar en geología; a la Dr. Isabel Israde Alcantara por mostrarme los diferentes ambientes sedimentarios y confiar en mí; al Dr. Serguei Sedov por enseñarme tepetates y suelos trabajados por el hielo, por su paciencia y por compartir una nueva puerta para mí; a la Dr. Elizabeth Solleiro Rebolledo, por su paciencia, ayuda, y mostrarme que hay civilizaciones que aun conservan el alma humana, lamento no haber llegado a tiempo al teatro Bolshoi; al M. C. Mario Alfredo Ramos Arias, por enseñarme sobre todo como leer un mapa, al Ing. Daniel Emiliano Bolaños Rodríguez por su paciencia, por enseñarme como hacer una columna estratigráfica; al Ing. Alfredo Victoria Morales y al Ing. Miguel Vera Ocampo por sus cursos de mineralogía. Al Ing. Arturo Rojo por animarme a estudiar geología.

Al personal del instituto de geología en especial a Rosario Ramírez, por su ayuda en la conexión de la computadora, donde se realizó buena parte del trabajo, y por supuesto no podían faltar las secretarias Maricela Coronado y a Gloria Alba, gracias por su eficiencia. A Guadalupe Quintito por tramitarme la beca.

Al Dr. Gustavo Tavizón, quien me dio posada durante los primeros semestres en que el Posgrado no me había asignado lugar, a quien estimo mucho y es una guía en la química y física del estado sólido.

A mis amigos de Geología, de nuevo al arqueólogo César Salcido Berkovich, por su ayuda y también por su paciencia en tierra de zares; a la arqueóloga Berenice Solís, por su ayuda y optimismo. De nuevo al Biol. Fabián Durán Aguilar y al Biol. Emanuel Cedillo por su apoyo, ayuda, comprensión de mis locuras, enseñanza y por su pasión por la evolución, ustedes dos son mis hermanos, saben que los quiero. De nuevo a la M. C. Iriliana López por su ayuda, paciencia, consejos y apoyo. A la Ing. Nelda Treviño Hernández por su apoyo, su ternura y comprensión. Al M. C. Cesar Coapio, por su ayuda en el microscopio y al hacer el mapa en geología de campo: al Ing. Josué Salazar Juárez, nadie cocina como tú, gracias por toda tu alegría: a mi geólogo favorito, el Ing. José Juan González López, cuando sea grande quiero ser como tú; a la geógrafa Cecilia Limón Hernández, por decirme que nos soy un niño normal y entender mi nostalgia por la azúcar; al M. C. Denis Avellán por toda tu humildad, sabes que eres admirable, serás un gran vulcanólogo; a la físico Vero López por las pláticas de danza y su alegría; al geógrafo Dmitry Alexander Herrera Hernández por su amistad, eres muy interesante, al Geol. Pasquinel de la Fraga Chávez por su pasión por la Tierra; a la arqueóloga Keiko Teranishi Castillo por sus amor a los Mayas, a la arqueóloga Tamara Cruz por su amor a Teotihuacán, a la Biol. Yhajaira Sánchez Dzib por hacer paleoclimatología; a la M. C. Pia Berger por enseñarme lo grandioso de su nación; al Biol. Alfredo González del Ángel, mi edafólogo favorito. A la geol. Antonia López Higuera, por tu paciencia. A los ingenieros Vicente y Cudberto, por ayudarme a sobrevivir en Oaxaca, gracias Cudberto por cuidarme, por enseñarme, por tu paciencia, por darme una visión ingenieril y práctica de la Geología. Al M. C. Emiliano Campos Madrigal por sus consejos, por ser uno de los pocos geólogos que no subestiman a los químicos. A la M. C. María del refugio y al Dr. Salvador por toda su ayuda en Morelia. Al físico Fermín Mariano, quién hubiera dicho que además de tu gran inteligencia, de ser tan sociable, de tu amabilidad, eras también un luchador social, hermano no es justo que te hayas ido, te obligaron a retirarte muy rápido de este Universo. Pero recuerda, que los caminos del Señor son infinitos.

A mis compañeros de la facultad, que a pesar de mi enamoramiento con la Geología siguen sin avergonzarse de mí; al M. C. Israel Alfaro, ejemplo de que querer es poder; al Dr. José Enrique Barquera, tú sabes que te admiro.; al Quim. Oscar Gonzales, por seguirme hablando, por tolerarme, eres un gran amigo.; al Q. José Francisco Gómez, con quien todavía discuto, tú sabes que me caes muy bien y hasta te quiero, (creo que ahora si puse bien tu nombre); al M. en C. Carlos Costo, que me sigue sorprendiendo, y cada vez se convierte en la encarnación de la bondad con inteligencia. A Rubén Alejandro Bernard Romero quien fue de los primeros químicos de la nueva ola que empezaron a estudiar geociencias. A la Dr. Lisa Lenka, a la Dr. Dana, al Dr. Peter y a Ilya por su apoyo en Kasionky.

A mis amigos de danza-jazz, a Abraham García, por todas tus locuras; a Socorro Casas por tu sensualidad y confianza al dejarte cargar; a Mayreni Senior por tu confianza; a Luz Ramírez, por tu risa, espero no haberte pisado en esas danzas francesas; a Jessica Ruvalcaba por ese doble sentido; a Gabriela Luna, por tu sonrisa; a Itxel Marcos, por esas micro peleas; a Claudia por tu proyección y a Alejandra Palma por esas fiestas; a Ramsés, por tu autoconfianza., al M. C. Rafael Torres, por tu ánimo, a David Reyes, de verdad hermano envidio tu proyección al bailar; a Carlos Murcia por tu confianza, eres un gran ser humano, A mis amigos de National Dance, a Gerardo Rubí, sabes que me caes muy bien; a la Psic. Lilia Rubí, por su alegría; a Laura Oleta por tus consejos al bailar y tu apoyo; al Ing, Alejandro Mendizabal por su confianza y ayuda, a Raymundo Barrera por su ayuda., a Maricela García por su superación. A mis amigos, Federico Méndez Tejeida, por tu amistad, a Fabián, a Pedro, por esos juegos, al Ing. Alexis Joffre, el alumno que más recuerdo, al Ing. Angels Vargas por todas las conversaciones. A Mark, Betzabé, Ismael y Marlon, por esa prepa que me marcó.

A mis profesores de danza, a la odontólogo Mayte Chávez por las clases de contrología; a Saúl González Gúrrola por tus clases, gracias por mejorar mi postura, realmente eres un grandioso bailarín; al Dr. Antonio Sarmiento por su paciencia y gusto por la danza contemporánea, me gustó su clase, pero sigo sin amar la danza contemporánea; al prof. Rubén García por esas clases sobre bailes austriacos; a Charly D., wow, algún día bailare hip hop como tú, gracias por tu paciencia; a Eduardo por tus clases de National, no sabes que divertido fue, gracias por toda tu enseñanza; y sobre todo a la Q. F. B., la Mtra. Angeles Martínez, por toda su dedicación, paciencia, correcciones, bondad y cariño que puede transmitir con el Jazz. Gracias por aguantarme tres años.

A mi abuelo José Luis Martínez y a mi abuelo Enrique Izquierdo, debiste enseñarme sobre lo que era heterodino, a mi abuelas Ofelia Almeida por mi papá y a mi abuela Guadalupe Dyrzo, gracias por quererme. A mis tíos, en especial a Marilú. A Jesús Dirso un maestro envidiable de la comunicación humana. A mis primos, en especial a Ana Paola Sánchez Dirso gracias por esos chats, a Enrique Dirso por cumplir tus metas, a Carla Guerrero, Saúl Méndez, Jonás Castillo y Miguel Ángel Sánchez, saben que los quiero. A mi hermana Heidy, por leer mi tesis y toda tu ayuda. A mi primo Edgar Méndez, a quién quiero más después de mi familia.

A Juan Salvador Agraz y Ramírez por haber creado la primera escuela de química, hoy Facultad de Química de la UNAM y a José Guadalupe Aguilera Serrano por haber fundado el instituto de Geología, que se uniría a esta misma institución. Estos hombres supieron leer los signos de los tiempos.

Finalmente Agradezco los comentarios y la revisión que realizó mi jurado, los cuales mejoraron sobremana la presentación y argumentación del trabajo escrito; al Dr. Héctor Román Pérez Enriquez, gracias por la corrección de estilo y las reflexiones sobre las ondulatas; al Dr. Lorenzo Vázquez Selem, gracias por respetar mi trabajo, su apoyo me dio ánimos para seguir escribiendo; al Dr. Juan Pablo Bernal Uruchurtu; por todas las discusiones, apoyo, respeto y libertad que me dio en el trabajo escrito; a la Dr. Margarita Caballero Miranda por su sensatez y escepticismo; al Dr. Priyadarsi Debajyoti Roy, gracias por sus comentarios sobre la presentación, lamento no haber podido crear una estructura del escrito más ortodoxa y acorde a sus deseos, me disculpo sinceramente.

Índice General

Jurado.....	III
Votos	IV
Agradecimeintos.....	XV
Índice General.....	XIX
Índice Especifico.....	XX
Prefacio	XXIII

Resumen.....	3
Capítulo I, Introducción	5
Capítulo II, Antecedentes Generales sobre Espeleotemas y su relación con los Paleoclimas	9
Capítulo III, Contexto geográfico, geológico y climático	29
Capítulo IV, Metodología	39
Capítulo V, La serie de tiempo generada a partir de la escala de grises	53
Capítulo VI, Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises.....	75
Capítulo VII, Análisis Espectral.....	119
Capítulo VIII, Comparación con archivos paleoclimáticos globales.....	139
Capítulo IX, Aportaciones a la descripción del clima de la segunda mitad del Holoceno.....	157
Capítulo X, Conclusiones	185
Bibliografía.....	191



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Índice Específico

Jurado III

Votos IV

Agradecimientos XV

Índice General XIX

Índice Específico XX

Prefacio XXIII

Resumen **3**

Capítulo I, Introducción **5**

- 1.1 Justificación del presente trabajo **5**
- 1.2 Objetivos del presente trabajo **6**
- 1.3 Hipótesis **7**
 - 1.3.1 Hipótesis 1: sobre la escala de grises **7**
 - 1.3.2 Hipótesis 2: sobre su validación como archivo climático **7**
 - 1.3.3 Hipótesis 3: sobre el parecido que debe tener con otros archivos **7**

Capítulo II, Antecedentes Generales sobre Espeleotemas y su relación con los Paleoclimas **9**

- 2.1 El ambiente Kárstico **11**
 - 2.1.1 Espeleotemas **11**
- 2.2 Geoquímica del Karst subterráneo **13**
- 2.3 Mineralogía del Karst subterráneo **17**
 - 2.3.1 Calcita, CaCO₃, **17**
 - 2.3.2 Aragonita, CaCO₃, **18**
- 2.4 Textura **18**
- 2.5 Indicadores geoquímicos utilizados comúnmente en estalagmitas **20**
 - 2.5.1 Variaciones molares y elementos traza **22**
 - 2.5.2 Mg/Ca como indicador de humedad en espeleotemas **23**
- 2.6 Análisis de imágenes en estalagmitas **24**
 - 2.6.1 Fluorescencia **24**
 - 2.6.2 Luminiscencia **25**
 - 2.6.3 Escala de grises o reflectancia **26**
- 2.7 Antecedentes de espeleotemas como indicadores paleoclimáticos en México **28**

Capítulo III, Contexto geográfico, geológico y climático **29**

- 3.1 Contexto geográfico **30**
- 3.2 Contexto geológico **30**
 - 3.2.1 Hidrología **31**
 - 3.2.2 Edafología **32**
- 3.3 Contexto climático **32**
- 3.4 Zona de recolección **35**

- 4.1 Recolección de la muestra **39**
- 4.2 Textura de la Muestra **42**
- 4.3 Análisis Geocronológico **42**
 - 4.3.1 Preparación de la muestra **44**
 - 4.3.2 Método de cálculo **44**
 - 4.3.3 Resultado del fechamiento **45**
- 4.4 Modelo de Edades **47**
- 4.5 Tasa de crecimiento **47**
- 4.6 Análisis multi-elemental por LA-ICP-MS **49**
 - 4.6.1 Parámetros instrumentales LA-ICP-MS **49**
 - 4.6.2 Metodología del LA-ICP-MS **50**
 - 4.6.3 Método de cálculo **51**
- 4.7 Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) **52**

- 5.1 Presentación de los Tramos **53**
- 5.2 Obtención de una superficie lisa **53**
- 5.3 Obtención de la imagen **54**
 - 5.3.1 Toma de Fotomicrografías **55**
 - 5.3.2 Manejo en el procesador de imágenes y conversión a escala de grises **56**
- 5.4 Obtención de la serie de tiempo **56**
 - 5.4.1 Obtención del vector **57**
 - 5.4.2 Creación de la serie de tiempo [dominio de distancia, dominio de tiempo] **58**
- 5.5 Análisis de la tendencia **63**
- 5.6 Conteo de bandas **65**
 - 5.6.1 Método de conteo **65**
 - 5.6.2 Resultado del conteo de bandas **67**
- 5.7 Filtrado de la serie de tiempo **68**
- 5.8 Consejos para crear una serie de tiempo a partir de una escala de grises **73**

- 6.1 Resultados del análisis multi-elemental por LA-ICP-MS y Generación de la serie de Mg/Ca **75**
- 6.2 El cociente Mg/Ca y su relación con la escala de grises **76**
- 6.3 Causantes del color analizados por microscopio **105**
- 6.4 Implicaciones climáticas de la tasa de crecimiento y las tendencias **117**

- 7.1 Periodograma por el método de Lomb-Scargle **119**
- 7.2 Onduleta **125**
 - 7.2.1 Señales de ENSO en la onduleta de JR1a **126**
 - 7.2.2 Señales decenales en la onduleta de JR1a **127**
 - 7.2.3 Señales centenales en la onduleta de JR1a **135**
 - 7.2.4 Señales milenarias en la onduleta de JR1a **135**
- 7.3 Consideraciones sobre los resultados del análisis espectral y las onduletas **137**

Capítulo VIII, Comparación con archivos paleoclimáticos globales ***139***

- 8.1 Comparación visual con archivos paleoclimáticos globales **139**
- 8.2 Espectro cruzado entre los archivos climáticos globales y las series de JR1a **147**
- 8.3 Consideraciones sobre la comparación con archivos paleoclimáticos globales **156**

Capítulo IX, Aportaciones a la descripción del clima de la segunda mitad del Holoceno ***157***

- 9.1 Apuntes para mediados del Holoceno **159**
- 9.2 Apuntes para el clásico **162**
 - 9.2.1 El caso Maya **162**
 - 9.2.2 El caso de la zona de influencia Teotihuacana **167**
- 9.3 Apuntes para el posclásico, edad moderna y edad contemporánea **173**
 - 9.3.1 Los últimos años **177**
 - 9.3.2 Comparación con datos instrumentales **177**
- 9.4 Espectro cruzado entre el registro de Chichancanab y las series de JR1a **179**
- 9.5 Posibles registros de erupciones volcánicas en JR1a **181**

Capítulo X, Conclusiones ***185***

- 10.1 Sobre la tonalidad del bandeado **185**
- 10.2 Sobre los factores que se necesitan controlar para obtener un indicador óptimo usando la escala de grises de una estalagmita **186**
- 10.3 Sobre la viabilidad de la escala de grises de la estalagmita bandeadada como archivo paleoclimático **186**
- 10.4 Sobre la naturaleza de los forzamientos climáticos **186**
- 10.5 Sobre la evolución del clima regional a lo largo de la segunda mitad del Holoceno **187**

Bibliografía ***191***

Prefacio



Ilustración 1. Ganadores del nobel de la paz 2007, Rajendra Kumar Pachauri representando a cientos de científicos del IPCC (izquierda), y Al Gore (derecha)¹.

En el 2007 la Academia de Ciencias y Artes Cinematográficas de Hollywood otorgó el oscar al mejor documental al exvicepresidente estadounidense Al Gore por "Inconvenient true²" (Ilustración 1 der.), dónde relata las ideas de Roger Randall Dougan Revelle³ sobre el calentamiento global y cómo este era ya un hecho. Pocos meses después la academia de Ciencias de Suecia le entregaba a él y al Panel intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), presidido por Rajendra Kumar Pachauri (Ilustración 1 izq.), el premio Nobel de la Paz por las investigaciones de cambio climático⁴.

¹ Tomada de Kerr, R.A. y Kintisch, E., 2007. Nobel Peace Prize Won by Host Of Scientists and One Crusader, *Science*, pp. 372-373.

² En español fue conocida como "La verdad incomoda".

³ Roger Randall Dougan Revelle (March 7, 1909 -July 15, 1991) estadounidense, fue uno de los primeros científicos en trabajar en el campus de la University of California, San Diego y el primero en estudiar el calentamiento global y el movimiento de las placas tectónicas. Tomado de http://en.wikipedia.org/wiki/Roger_Revelle. 7/III/2009 2:08 am.

⁴ Textualmente "for their efforts to build up and disseminate greater knowledge about man-made climate change, and to lay the foundations for the measures that are needed to counteract such change" tr: Por sus esfuerzos en construir y diseminar un mayor conocimiento acerca del cambio climático antropogénico, y sentar las bases de las medidas necesarias para afrontarlo. http://nobelprize.org/nobel_prizes/peace/laureates/2007/index.html. 7/III/2009 2:38 am.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

La comunidad científica, se decía, era unánime, el planeta Tierra se estaba calentando. Y su calentamiento era causado por la actividad humana. La interrogante era qué tan rápido iba a aumentar la temperatura y qué efectos tendría esto sobre las distintas regiones del planeta.

Ante este panorama, varias naciones habían firmado un acuerdo, el Protocolo de Kioto, en el cual se comprometían a bajar las emisiones de CO_2 y otros gases de invernadero⁵ en un porcentaje aproximado al 5% en comparación con las emisiones del año 1990, dentro del periodo que va del año 2008 al 2012. Sin embargo algunas naciones y grupos movidos por el alto costo económico que implicaba la baja de emisiones, así como algunos científicos de porte iconoclasta como Frederick Seitz⁶ arguyeron que el calentamiento global era producto de la actividad solar, en cuyo caso no había razón para bajar los gases de invernadero. Otros, como el afamado escritor Michael Crichton, llegaron a considerarlo un complot cuyo fin era la captación de recursos financieros para las universidades y grupos ecologistas⁷.

Lo curioso es que este no fue su primer argumento, antes cuando el calentamiento no era evidente, sino una peligrosa posibilidad, estas mismas fuerzas habían negado, no sólo la inexistencia de un cambio climático antropogénico, sino la de un calentamiento global próximo. De manera que negar su carácter antropogénico no era más que una última excusa ante un fenómeno que no se podía ya ocultar. Diversas instancias, foros que iban desde grupos activistas ecológicos como Greenpeace hasta el Pontificio Consejo de Justicia y Paz en la Santa Sede, analizaron y aun ahora siguen analizando maneras de prepararse ante el cambio climático que ya no se avecina, sino que ya está aquí. Pero ante todo esto, ¿cómo es que se puede saber que nosotros producimos el calentamiento, y cómo sabemos las consecuencias que podría tener?

Hasta hace pocos años, cuando el mundo ya se había dado cuenta de los cambios que operan a través de millones de años, como la evolución, la deriva continental o a través de milenios como las eras glaciales, se pensaba que durante los últimos 12000 años, (en un periodo que los geólogos llaman Holoceno), el clima había sido prácticamente igual.

⁵ Gas metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), y tres gases fluorados para el problema de la destrucción de la capa de ozono; los Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF_6).

⁶ Orestes, N., 2008. Un discours simpliste et conservateur. *La recherche*(425): 44-47.

⁷ Crichton, M., 2005. *State of fear*. Harper Collins, U. S. A., 736 pp.

Sin embargo cuestiones como el cambio de patrones de vivienda en la civilización aria, un periodo cálido a lo largo de la Edad Media, y una mini era glacial en el renacimiento, conocidas en primera instancia por registros históricos, hizo considerar que el clima había cambiado aun a escalas de cientos de años.

De manera que por medio de una ciencia que se dedica a estudiar los climas del pasado llamada Paleoclimatología, se podía saber cómo había sido el clima en una determinada región. Así era más o menos claro saber qué se podía esperar después de un cambio climático. Por ejemplo hace mil años el Periodo Cálido Medieval dio la posibilidad a los vikingos, a los eslavos y a los tártaros de expandir su territorio a zonas antes inhóspitas o inaccesibles, zonas que ahora eran cultivables⁸. Del mismo modo una baja en la temperatura global hace cuatro milenios causó una hambruna global que destruyó, entre otras cosas, al antiguo reino de Egipto.⁹

Con la información paleoclimática la humanidad pudo darse cuenta que era responsable del calentamiento actual, ya que señales climáticas como las arrojadas en los últimos 50 años no se habían presentado antes. Muchas señales climáticas son repetitivas, es decir se presentan cada determinada cantidad de tiempo. La señal del Palo de Golf, como le llaman a la señal del calentamiento actual por su forma en las gráficas, no había aparecido antes.

Hay muchas maneras de hacer paleoclimatología, la que nosotros utilizamos en esta tesis es aquella que recurre al uso de las espeleotemas. Estas rocas contienen diferentes indicadores paleoclimáticos. Los más utilizados hasta la fecha son los indicadores geoquímicos, es decir relaciones entre entes químicos que responden al proceso de fraccionamiento.

En 2006 encontramos en el norte del estado de Querétaro una estalagmita cuyo fechamiento arrojaba una edad en su parte más antigua de 6848 años (300 años más o 300 años menos) y que había crecido hasta el presente. Potencialmente contenía información climática de todo el

⁸ Acot, P., 2006. *Historie du climat*, Collection Tempus. Brodard & Taupin, Brodard & Taupin, p.137-146

⁹ Gibbons, A., 1993. How the Akkadian Empire Was Hung Out to Dry. *Science*, 261(5124): 985.

Drysdale, R., Zanchetta, G., Hellstrom, J., Maas, R., Fallick, A., Pickett, M., Cartwright, I. y Piccini, L., 2006. Late Holocene drought responsible for the collapse of Old World civilizations is recorded in an Italian cave flowstone. *Geology*(February): 101.104.

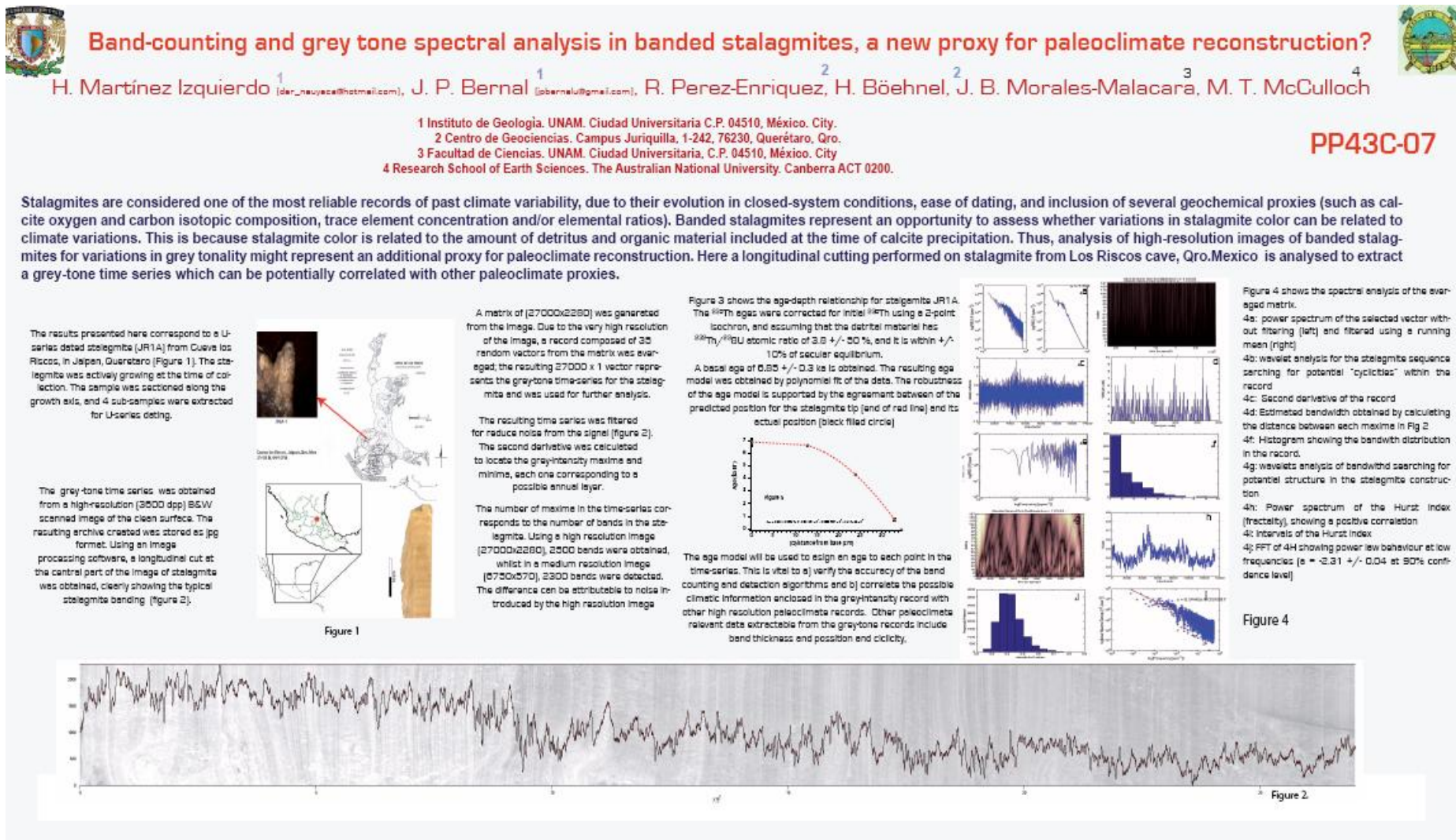


Ilustración 2. Poster presentado ante la 2007 AGU Joint Assembly donde se muestran nuestros primeros resultados sobre el uso de la escala de grises como indicador paleoclimático, así como el análisis espectral hecho a partir de esta.

Holoceno superior para la zona tropical de México. La oportunidad no la íbamos a dejar pasar. No sólo teníamos la oportunidad de obtener información de alta resolución de los últimos seis milenios para una región tropical, regiones que han sido menos estudiadas que las altas latitudes, sino que teníamos la posibilidad de compararla con archivos históricos y más aun, con archivos instrumentales. Y aun más, donde estaba la posibilidad de ver el calentamiento global. Además de todo eso, la estalagmita estaba muy bien bandeada, era perfecta para intentar probar la idea de que el tono de cada banda dependía del clima, y por lo tanto era un indicador de éste. Cuando la cortamos, después de haberla obtenido en mi primer enfrentamiento con una cueva kárstica, pensé en el momento que tuve entre mis brazos esos 30 kg de caliza, que eso era lo que debía haber sentido Moisés cuando tuvo entre sus manos las tablas de la ley.

En el 2007, presentamos ante la AGU Joint Assembly en Acapulco un poster (Ilustración 2) que resumía nuestros primeros resultados acerca de la utilización del tono de la imagen para construir una serie de tiempo, la cual podía ser usada para realizar un análisis espectral, tal y como el Dr. Román Perez Enríquez *et al.* lo habían propuesto¹⁰. Con la ventaja de que ahora se tenía una estalagmita de la cual se sabía su edad. Si bien el trabajo mostraba la viabilidad del análisis, quedaba claro que era difícil separar el ruido de la señal climática. Mientras tanto, no éramos los únicos que teníamos la idea de utilizar los tonos de la imagen, a la par que nosotros existieron cuatro trabajos en la comunidad científica que hablaban de utilizar el tono de las bandas como indicador. Usando los métodos de fluorescencia¹¹, luminiscencia, color y reflectancia¹², estos investigadores pudieron construir series de tiempo, probando que el tono de cada banda, independientemente de cómo haya sido iluminada, contenía información climática. Pero qué la calidad de la información, qué tanto se puede distinguir lo cálido de lo frío, o lo seco de lo húmedo, sí dependía de la fuente de luz. Finalmente ante las limitaciones visuales del escáner decidimos utilizar el microscopio para obtener la imagen.

¹⁰Perez Enríquez, R., Böhnell, H. y Bernal, J.P., 2007. Stalagmite analysis for Paleoclimate Studies, Centro de Geociencias. UNAM, Querétaro.

¹¹ Perrette, Y., Delannoy, J.J., Desmet, M., Lignier, V. y Destombes, J.J., 2005. Speleothem organic matter content imaging. The use of Fluorescence Index to characterise the maximum emission wavelength. *Chemical Geology.*, 214: 193-208.

¹² Webster, J.W., Brook, G.A., Railsback, L.B., Cheng, H., Lawrence Edwards, E., Alexander, C. y Reeder, P.P.-. 2007. 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: 1-17.

La prueba de fuego sería realizar un análisis espectral a partir de la información dada por los tonos de cada banda. Por simplicidad, trabajamos sólo con los tonos en escala de grises. Como si sacáramos una foto en blanco y negro.

Por ese tiempo teníamos la idea de utilizar la imagen para poder contar las bandas utilizando un algoritmo computacional. Por razones expuestas en el capítulo V, esta idea no funcionó. Sin embargo el número de bandas nos ayudó a establecer el límite para lo que era o no ruido en las señales climáticas. Y por su puesto para comprobar que las señales climáticas obtenidas eran fidedignas, las comparamos con un indicador geoquímico de la propia estalagmita. También establecimos qué variable era la responsable del cambio en las tonalidades entre banda y banda.

El presente trabajo entonces, describe la implementación del uso de la escala de grises como indicador paleoclimático. Se llevó a cabo durante un periodo de 5 semestres escolares. Fue escrita siguiendo los puntos requeridos por la Guía para escribir Tesis de Posgrado en Ciencias de la Tierra¹³. Sin embargo, las discusiones muchas veces se presentan enseguida de sus resultados correspondientes, en forma de un circuito de retroalimentación o TOTE.¹⁴, debido a que muchas veces para avanzar en el procedimiento experimental tuve que comprender primero el resultado previo. De manera que no hay un apartado ex profeso para el tema de discusión. Aunque los capítulos VII, VIII y IX tienen que considerar todo, por lo que su discusión sería el homólogo a una discusión general.

Soy partidario de que la ciencia tenga un lenguaje propio, tal vez deberíamos volver al latín o por lo menos utilice términos técnicos en este último idioma, pues no me parece justo que todos los no angloparlantes tengan que aprender un idioma extranjero para comunicar la ciencia, mientras que los angloparlantes no. De la misma manera, más de una vez, numerosos términos acuñados en inglés del argot propio de una rama de la ciencia quedan sin traducción

¹³ Böhnel, H., Carreón Freyre, D. C., Correa, F., Grijales Nishimura, J.M., Lounejeva, E., Rosales Domínguez, M. C., Schaaf, P., 2003. Guía para escribir Tesis de Posgrado en Ciencias de la Tierra. Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra. UNAM.

¹⁴ Por sus siglas en inglés, Test Operate Test Exit, modelo básico en la cibernética y en la programación neurolingüística. Dilts. R. B. "Strategies of genius." Metapublications. 1994. USA.

contaminando una lengua. Mientras que por otro lado, la traducción del término muchas veces es incapaz de dar la acepción que tenía en el inglés, o es traducido equivocadamente (ejemplo de esto son el término "fabrica" en geología o "parte por millón" en química). Así, aunque el término "después de Cristo, d. C.", usado en español no es para nada una mala traducción, en esta tesis preferí usar el término "Anno Domini, A. D.", que tiene una carácter más universal, en cuanto a que puede ser comprendido prácticamente sin importar la lengua madre del lector.

Ya que el tiempo que cubre la estalagmita es reciente en la escala del tiempo geológico, y comprende los periodos antiguo, medieval, moderno y contemporáneo, y considerando la incertidumbre del fechamiento, juzgué pertinente utilizar la cronología que rige al mundo occidental; el calendario gregoriano. (Sin embargo la inexistencia del año cero, necesario para los cálculos de los espectros, hizo que utilizaré el calendario juliano proléptico para los años anteriores a nuestra era. Dicho calendario es igual al gregoriano para los años después de Cristo). Tengo que señalar que la mayoría de los autores que investigan el Holoceno, realmente están utilizando este calendario, aun cuando digan que utilizan el calendario Antes de Cristo-Anno Domini, pues consideran la existencia del año cero y números negativos.

Pocas veces escribo de manera impersonal y reflexiva, como se acostumbra escribir en los textos científicos en español¹⁵; la razón es que, con base en la programación neurolingüística, el lenguaje representa nuestro modelo del mundo. Newton nos enseñó a hacer ciencia como si nosotros fuéramos ajenos al universo, más esto no es así, los resultados de un análisis dependen en gran medida de cómo se haya hecho. Es más, la idea de escribir impersonalmente en las revistas científicas se debe en gran medida a la tendencia del siglo XIX que pugnaban por una objetividad, libre de prejuicios, que permitiese subrayar lo reproducible. Misma que en lo personal no creo que exista a nivel individual. Citando al premio Nobel de química 1981, Roald Hoffmann, esa manera de escribir el artículo "informa sobre hechos reales pero al mismo tiempo es irreal, va en contra de la humanidad del científico, suprime los actos verdaderamente creativos y oscurece el proceso de descubrimiento¹⁶". Por lo mismo no leerán

¹⁵ En francés o inglés, de hecho se acostumbra a escribir en voz pasiva o con pronombre impersonal, es decir, no se utiliza un reflexivo impersonal.

¹⁶ Hoffmann, R., 1997. La manera en la que se dice, Lo mismo y no lo mismo. F. C. E., México D. F.

"la roca se cortó", sino "corté la roca". Siendo sólo, lo que nosotros no controlamos directamente, lo que escribí en forma reflexiva. Por ejemplo "la falla se sitúa..."

Dada la diversidad de matices que hay en los campos de estudio en las Ciencias de la Tierra, no me fue posible dirigirla a un conocimiento base a nivel universitario. Es decir, no está escrita para que la entienda automáticamente alguien que posee el conocimiento base de un geólogo, biólogo, paleoecólogo, paleontólogo o geofísico. Ni tampoco va dirigido, a pesar del tema, a un paleoclimatólogo. De manera, que está escrita en primera instancia para el jurado. Estuvo en mi mente ser lo más preciso posible en el lenguaje, aunque no lo más puntual. De esta manera, es probable que encuentre términos que no son comunes para usted, aun cuando haya estudiado una geociencia. También, la tesis tiene, aunque mínimamente, un estilo literario. Debido a qué necesito que mi hemisferio derecho también comprenda.

Este trabajo es valorado ante el escenario de cambio climático, pero algún día trabajos como el que están a punto de leer, serán granitos de arena que nos ayuden a comprender la relación entre el clima, el sol y el campo geomagnético. Algún día, en varios siglos, trabajos como éste, ayudarán a entender mejor la naturaleza de este último, el cual es un reflejo de la dinámica interna del planeta. Por lo que en unas cuantas centurias más, trabajos como éste, también habrán aportado en la creación de modelos que expliquen temas tan ajenos ahora, como la Tectónica de Placas. Este año, los Estados Unidos Mexicanos cumplen doscientos años como nación, en este lapso el entendimiento del lugar que ocupamos los humanos en el Cosmos cambió abruptamente. Esta tesis es mi regalo a una nación que como un nahual puede transformarse a voluntad, que necesita para ello entender su medio. Porque al igual que el faraón, que en sueños veía señales de fertilidad y de sequía, necesitó de un humilde presidiario para interpretarlas. Así mi nación necesita de trabajos sobre paleoclimatología.

Por mi raza hablará el espíritu.

Haydar B. Martínez

Cd. Universitaria D. F., Febrero 5, 2010.

“You know, this whole Ice age think
is getting old.
You know, what I could go for?
Global warming”

Sid to Diego & Manny

J. Michael & J. Wilson. Ice Age. I



“Esto de la era del hielo esta
pasando de moda.
Lo inn es el calentamiento
global.”

Sid a Diego y Manny

J. Michael & J. Wilson. La Era de Hielo I

ANÁLISIS ESPECTRAL
DE
UNA
ESTALAGMITA BANDEADA
COMO
INDICADOR PALEOCLIMÁTICO



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Abstract

The possibility to have a new paleoclimatic proxy from the gray tone banded stalagmite is studied in this work. One stalagmite from the center of Mexico was found active and its base was dated by the ^{238}U - ^{230}Th method to 6.85 ± 0.3 Ka. An algorithm to count bands based in the slope changes was developed and applied to the grey tone time series. This time series was filtered to get annual information level. This proxy is congruent with several proxies including GISP₂, GRIP, Cariaco basin, local proxies and instrumental archives. A high resolution LA-ICP-MS analysis of Mg/Ca was made in order to compare with the grey-tone time-series. The results show that both proxies correlate. Finally, the spectral analysis shows signals that correspond to Bond, Suess, Gleissberg cycles, and other cycles that are associated with the interaction between the geomagnetic field and the solar wind. These cycles and the growth rate suggest an increase in sunstroke for the middle Holocene. The presence of the cycles during the time of stalagmite existence was demonstrated with a wavelet. The wavelet analysis shows the presence of cycles near 100 years for the last six thousand years. This proxy is also the highest resolution one in Mesoamerica for the years during which many pre-Columbian cultures existed, so it gives information about the climate role in the developing of those civilizations.

Résumé

La possibilité d'avoir un nouvel enregistrement paléoclimatique utilisant l'échelle de gris d'une stalagmite est étudiée dans ce travail. La stalagmite a été trouvée active dans le centre de la Mexique. La datation effectuée par la méthode de déséquilibres radioactifs de ^{238}U - ^{230}Th donne un âge de 6.854 ± 0.307 Ka à la base. À la série temporelle de l'échelle de gris, on l'a été appliquée un algorithme pour compter les bands, qui est basé sur les changements de la pente. La série temporelle a été filtrée jusqu'à avoir le niveau de information annuelle. L'enregistrement est concordant avec divers enregistrements paléoclimatiques et les mesures instrumentales disponibles. On a fait une analyse par LA-ICP-MS de haute résolution de la relation Mg/Ca, qui est un enregistrement d'humidité. Cette analyse est concordante aussi avec l'échelle des gris. Finalement, l'intention de ce travail a été de faire une analyse spectrale, où on a trouvée différents signes qui correspondent avec les cycles de Bond, Suess et Gleissberg, et aussi avec les changements en l'interaction de la magnétosphère et le vent solaire. Ces derniers cycles avec le taux de croissance indiquent une augmentation de l'insolation pour le milieu de l'Holocène. Une ondelette a vérifié la présence de ces cycles pendant les temps de existence de la stalagmite. On a trouvée l'existence de cycles proches de 100 ans pour les derniers six millénaires. L'enregistrement est aussi celui qui a le plus haut résolution en Méso-Amérique pour la seconde moitié de l'Holocène. Donc il est un enregistrement qui apporte information sur les conditions climatiques existant pendant le développement des cultures du centre de l'Amérique.

Resumen

La posibilidad de tener un nuevo indicador paleoclimático usando tonalidades de gris de una estalagmita bandeada del centro de México es estudiada en el presente trabajo. La estalagmita recolectada activa fue fechada por desequilibrio de la serie ^{238}U - ^{230}Th , asignándose una edad a la base de 6.854 ± 0.307 Ka. A la serie de tiempo generada a partir de la escala de gris, se le aplicó un algoritmo para el conteo automático de bandas basado en cambios de pendiente en la serie de tiempo, la cual fue filtrada hasta alcanzar el nivel de información anual. El archivo es congruente con diversos indicadores paleoclimáticos, así como con los archivos instrumentales disponibles. A la estalagmita se le realizó un análisis de alta resolución de la relación Mg/Ca (un indicador geoquímico de humedad) por LA-ICP-MS, el cual es congruente con la serie de tiempo generada a partir de las tonalidades. Finalmente el propósito del trabajo fue realizar un análisis espectral obteniéndose diversas señales correspondientes a ciclos de Bond, Suess y Gleissberg, así como a cambios en la interacción geomagnética y del viento solar. Estas últimas junto con la tasa de crecimiento indican una mayor insolación a mediados del Holoceno. La presencia de estos ciclos durante el tiempo en que creció la estalagmita fue verificada con una onduleta, obteniéndose una presencia continua de los ciclos cercanos a 100 años. El archivo es a su vez el de mayor resolución encontrado en Mesoamérica, para los años en que se desarrollaron diversas culturas prehispánicas, por lo que aporta información del papel del clima en el desarrollo y ocaso de estas civilizaciones.

Zusammenfassung

Hier man studiert die Möglichkeit eines neuen Paläoklimatischeanzeiger zu haben. Der des gebänderten Stalagmits Graustufen benutzen wird. Der gesammelte Stalagmit war im Zentrum Mexicos und man hat ihn aktiv getroffen. Die Altersbestimmung erfolgten mit der ^{238}U - ^{230}Th Methoden gab 6854 ± 307 jahre auf Stalagmits alte teil. Die Zeitreihenanalyse von der Stalagmit wendt einen Algorithmus an zu bereinigen. Diese Algorithmus kann die Maximum und die Minimum in der Zeitreihen zählen, das gibt die Bande Nummer. Dann kann man bis alljährlich information stand ereilen bereinigen Diese Paläoklimatischeanzeiger mit anderen Klimaarchiven (zum beispiel GISP₂, GRIP und Cariaco basin) in Beziehung bringt. Auch, man vergleicht mit instrumentalen datum. Die Mg/Ca analyse erfolgten mit der LA-ICP-MS Methoden von diese Stalagmit zeigt eine Beziehung mit Graustufen. Die Absicht von diesen arbeit war die Spectrumanalyse. Die Ergebnisse gab vielen Signalen, die entsprachen mit den Hallstattzeit, Bond, Suess, Gleissberg und Abbot Zyklen und mit den magnetischen Sonnenzyklen. Diesen Zyklen und die Wachstumsquote zeigen dass die insolation grosser für Mittel-Holozän war. Die Anwesenheit dieses Zyklus während der Zeit, in der der Stalagmit gewachsen haben, mit wavelet überprüft war. Die Ergäbnise zeigen, dass die hundert Jahren Zyklen während den letzten sechstausende Jahren existiert haben. Dieses Archiv hat die höchste Auflösung, für die Jahren in denen verschiedene Maya und Nahua Zivilizationen in Messoamerika existiert haben.

Capítulo I

Introducción

“La gota de agua que da la nube
como regalo para la flor
en vapor se desvanece
cuando se levanta el sol;
y nuevamente al cielo sube
hasta la nube que la soltó.”
El Chorrillo, Francisco Gabilondo Soler.

El presente trabajo de investigación trata sobre la posibilidad de usar la imagen en escala de grises de las estalagmitas con un bandeo bien definido, como indicador paleoclimático. Con el consecuente análisis de las señales y ciclos climáticos que pueden ser aportados por esta técnica.

1.1 Justificación del presente trabajo

Los motivos por los cuales escogimos estudiar esta posibilidad los expondremos a continuación:

- I. México cuenta con numerosos ambientes kársticos donde se han desarrollado espeleotemas, las cuales contienen un registro paleoclimático del Pleistoceno y Holoceno.
- II. Por su posición geográfica, las espeleotemas de México pueden potencialmente dar información paleoclimática sobre zonas tropicales, las cuales son regiones importantes en la modulación del clima a nivel global (Partin *et al.*, 2008), ya que son grandes reservorios de carbono y zonas de alta capacidad calorífica que además guardan gran cantidad de humedad (Rootaru *et al.*, 2006). Por ello es importante monitorear fluctuaciones climáticas rápidas en estos subsistemas.
- III. Las espeleotemas presentan una tasa de crecimiento de unos cuantos micrómetros por año, y pueden ser fechadas con gran precisión, por lo que son consideradas en la actualidad como uno de los archivos paleoambientales más confiables (McDermott, 2004), ya que cada capa añadida a la estalagmita será conforme al régimen de humedad (Li *et al.*, 2005), disolución y precipitación (Hu *et al.*, 2005), producido por las circunstancias climatológicas presentes.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

- IV. Las espeleotemas son archivos paleoclimáticos resguardados de varios procesos naturales capaces de alterar la información climática registrada en la mayoría de las veces.
- V. La idea de usar la escala de grises o reflectancia como archivo paleoclimático ha sido llevada a cabo en diversas clases de sedimentos y rocas sedimentarias (Otaola *et al.*, 2003). Sin embargo, salvo algunos trabajos, casi no ha sido probada en espeleotemas (Baker *et al.*, 1999), (McGarry y Baker, 2000), (White, 2001), (Webster *et al.*, 2007). De funcionar la escala de grises como archivo climático, se tendría una nueva metodología más fácil y barata comparada con los indicadores climáticos obtenidos de espeleotemas hasta ahora. Esto completaría la información obtenida por los otros métodos.
- VI. Existen varias incógnitas por investigar sobre la relación entre el tono de gris y los factores climáticos que lo producen, ejemplo de ello es el material responsable del tono, la variable climática de la cual es reflejo, las causas de las diferencias en la intensidad de los diferentes tonos, la estructura de la serie de tiempo generada, y lo robusto¹ de la señal obtenida
- VII. Ya que el norte de Querétaro está influenciado por lluvia estacional de verano traída por los alisios, así como por los huracanes y nortes, está justificado un estudio sobre cómo ha variado el clima en tiempos cortos en la región, y cómo correlaciona esto con el cambio climático global que se ha dado a lo largo del Holoceno.

1.2 Objetivos del presente trabajo

Por los motivos arriba expuestos, en el desarrollo del presente trabajo proponemos:

1. Implementar el análisis espectral de la serie de tiempo creada a partir de las tonalidades de gris presentes en una estalagmita.
2. Realizar un estudio paleoclimático utilizando una estalagmita de la región de Jalpan, Querétaro.

¹ Robusto en este caso es el término estadístico referente a la capacidad que tiene un organismo, sistema o diseño de hacer frente a las variaciones (a veces impredecibles) de su ambiente operativo, con la mínima alteración.

1.3 Hipótesis

Este trabajo no se realizó en una estructura lineal del método científico, sino en una estructura de circuitos múltiples de retroalimentación. Las hipótesis más que ser propuestas en el sentido estadístico de prueba de hipótesis, son utilizadas como guías de pensamiento en la investigación:

1.3.1 Hipótesis 1: sobre la escala de grises

La imagen en escala de grises es un archivo paleoclimático, donde los diferentes tonos son causados por la presencia o ausencia en diferente proporción de materia orgánica y/o arcillas (material detrítico) en la espeleotema.

1.3.2 Hipótesis 2: sobre su validación como archivo climático

Si la escala de grises es un reflejo de la naturaleza de una variable climática, entonces correlacionará con el o los archivos geoquímicos que sean indicadores del comportamiento de dicha variable. Creemos que esta variable es la humedad, por lo que el archivo geoquímico con el que deberá correlacionar, es algún otro indicador de paleohumedad.

1.3.3 Hipótesis 3: sobre el parecido que debe tener con otros archivos

Si la escala de grises es un reflejo de la naturaleza de una variable climática, entonces las señales climáticas que contiene la serie de tiempo deberán correlacionar con otros archivos climáticos de la misma temporalidad. De tal manera que los archivos generados en contextos climáticos semejantes presentarán un mayor parecido en sus señales climáticas con las de la escala de grises.

Capítulo II

Antecedentes Generales sobre Espeleotemas y su relación con los Paleoclimas

«... se trouvait installée dans une grotte charmante, ornée de magnifiques stalagmites, dont le sol était recouvert d'un sable fin. Il y régnait une demi-obscurité. Aucune torche, aucune lampe n'était allumée, et cependant certaines clartés inexplicables venaient du dehors en pénétrant par une étroite ouverture de la grotte. J'entendais aussi un murmure vague et indéfini, semblable à celui des flots qui se brisent sur une grève, et parfois les sifflements de la brise.»¹
Voyage au centre de la terre. Chapitre XXIX. Jules Verne

Aunque en nuestra ignorancia del idioma español usemos como sinónimos estos términos, hay una diferencia entre el clima y el estado del tiempo o temperie; la frase establecida por un preparatoriano lo dice, el primero nos dice que ropa comprar, el segundo nos dice que ropa ponernos cada día. Así, el clima habla de las condiciones promedio que presenta la atmósfera en cierta época del año una región (medidas por lo menos durante 30 años), mientras que el tiempo nos dice las condiciones atmosféricas de un día.

Así, el clima desde la percepción de un humano, a diferencia del estado del tiempo, parece algo inmutable. Tenemos la idea de que una región mantendrá siempre el mismo clima (con sus variaciones de tiempo anuales). Pero en la escala del tiempo geológico, es evidente que el clima de toda una región cambia, simplemente porque la región cambia como resultado de la interacción en cientos de miles de años de los principales reservorios (subsistemas) que forman el sistema Tierra.

Junto con la astronomía, el conocimiento del estado del tiempo en primer lugar, y luego del clima, fue crucial para el desarrollo de las diferentes civilizaciones. Sin embargo, la climatología en su carácter de ciencia, tiene menos de dos siglos.

Es incuestionable que la climatología y la meteorología son ciencias socialmente valoradas, el conocimiento que nos proporcionan tiene implicaciones que van más allá del campo teórico, que

¹ "...se encontraba instalada en una gruta encantadora, adornada de estalagmitas magníficas, de la cual el suelo estaba recubierto de una arena fina. Reinaba una semioscuridad. Ninguna antorcha, ninguna lámpara estaba prendida y sin embargo cierta claridad venía de fuera, penetrando por una abertura estrecha de la cueva. También escuché un murmullo vago e indefinido, parecido a aquel del oleaje que se mueve sobre un arenal, y a veces el sonido de la brisa. "



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

afectan a la economía, la sociedad y hasta la política. Por otra parte el estudio de los climas que existieron en el pasado (Paleoclimatología) es mucho menos valorado.

Más allá de llenar una necesidad espiritual como lo es satisfacer nuestra curiosidad, el estudio de los paleoclimas responde a la búsqueda asintótica de conocer mejor las variables y procesos bajo los cuales el clima funciona. Por esto es necesario recordar al sistema climático como tal, por lo que puede vérselo como un sistema estable o inestable, que sufre procesos de respuesta lineal o no lineal, que está influenciado por factores externos e internos y que presenta procesos de retroalimentación positiva y negativa. Así, de esta búsqueda de conocimiento, se obtienen modelos más realistas, que en última instancia podrían incluso ser utilizados para modelar respuestas futuras. Ante un escenario de cambio climático global, la conveniencia de tener modelos más exactos es evidente.

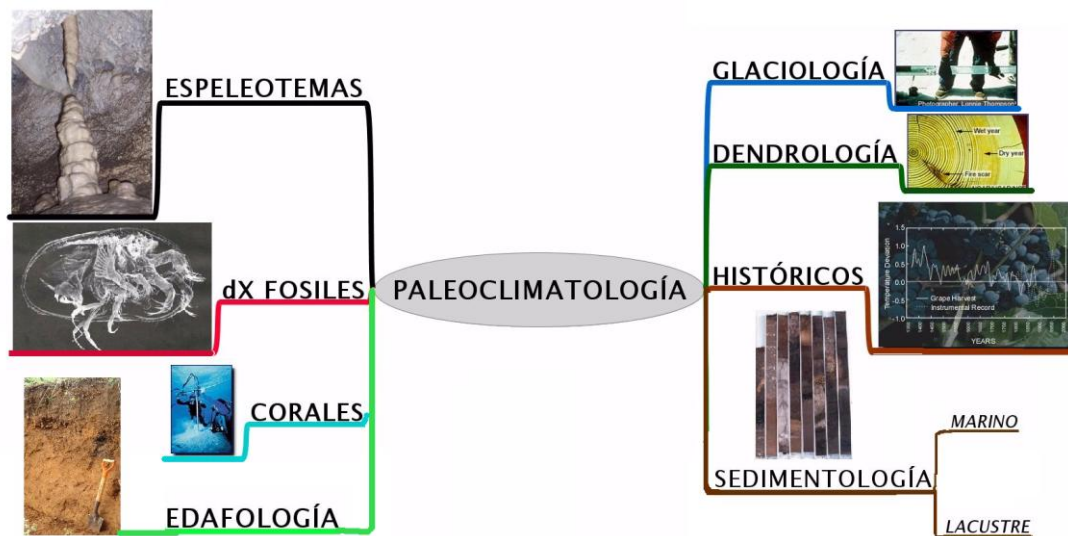


Figura 2.1. Mapa mental de las diferentes ramas de la paleoclimatología, clasificadas según su objeto de estudio.

El estudio de los paleoclimas se hace por medio de diversas técnicas geológicas como el análisis estratigráfico de glaciares (glaciología), la sedimentología lacustre y marina, los núcleos de corales, la composición isotópica en fósiles, el estudio de la memoria del suelo en edafología y por supuesto, las espeleotemas (Figura 2.1), así como utilizando archivos históricos y los anillos de los árboles (dendrocronología), entre otros (Garduño, 2003). En todas estas técnicas geológicas, la idea es analizar la variación de un ente, cuya presencia está determinada por una variable climática. Ya que nuestro objeto de estudio se realiza usando una espeleotema, nos avocaremos sólo a esta técnica. Para explicar cómo las espeleotemas contienen información climática es conveniente primero dar una explicación de su ubicación, génesis, y existencia.

2.1 El ambiente Kárstico

Primero, hay que recordar que no todos los ambientes sedimentarios carbonatados son Kársticos. Sólo el 7% de las rocas carbonatadas continentales, que a su vez representan el 17% de las tierras emergidas, corresponde al Karst (Gillieson y Spate, 1996).

Tenemos entonces, que el carbonato de calcio, CaCO_3 , ha sido depositado en primera instancia en la superficie marina por precipitación química o bioquímica, ocurriendo esta última al sintetizarse los diferentes exoesqueletos de organismos marinos o los granos no esqueléticos como oolitas, pellets o agregados durante millones de años (Chamley, 2000). Son estos las principales fuentes de CaCO_3 de los ambientes carbonatados marinos. Cuando por movimientos tectónicos, de subsidencia o cambios eustáticos, dichos ambientes quedan expuestos a la intemperie, son susceptibles de formar diversos ambientes de depósito continentales como lo son los paleosuelos cálcicos, la tufa calcárea y el travertino, los ambientes calcáreos tanto lacustres como palustres, las dunas eólicas calcáreas, las calcretas y por supuesto el Karst (Flügel, 2004). Con excepción de las dunas, la formación de estos ambientes implica la disolución y reprecipitación del CaCO_3 y otros carbonatos por diferentes agentes y en diferentes condiciones.

El término Karst se refiere a estructuras físicas formadas por disolución en aguas meteóricas. Incluye todos los rasgos diagenéticos, macroscópicos, microscópicos, superficiales o subterráneos, que son producidos durante la disolución química y la modificación asociada de una secuencia carbonatada (Flügel, 2004). El Karst se desarrolla en la interfase aire-caliza o suelo-caliza en el caso del Karst superficial (exokarst), o dentro de los cuerpos carbonatados en el caso del Karst subterráneo (cavernas). En este último es donde se forman las espeleotemas carbonatadas. Para este caso se definirá también como Epikarst, a la zona constituida entre el techo y el terreno en la parte superior de la cueva.

2.1.1 Espeleotemas

Los depósitos minerales formados en cuevas y provenientes del filtrado, goteo y/o flujo de agua en una variedad de regímenes geológicos reciben el nombre de espeleotemas, del griego "hecho en una cueva" (Woo, 2005). El tipo más común de espeleotemas es el de carbonato de calcio, CaCO_3 , siendo éstas por lo tanto formaciones de calcita secundaria, aunque también pueden serlo de dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ y yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$. Son clasificadas según su crecimiento en:

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

- Popotes: Son las formaciones “jóvenes” en forma de popote, resultado del goteo de agua que precipita minerales carbonatados, de los cuales al pasar el tiempo crecerán hacia los lados empezando a formar una estalactita (Figura 2.2b). Su interior está usualmente vacío, aunque comienza a ser parcialmente llenado con cristales de calcita. El agua para el crecimiento de los popotes se abastece a través de este canal central. Debido a que este abastecimiento es muy lento, los popotes son usualmente vistos con una gota colgando de su punta.
- Estalactitas: Son las formaciones en forma de cono que crecen en los techos de las cuevas producto de la precipitación química al gotear el agua en una cavidad llena de aire. Muchas de ellas son desarrolladas a partir de popotes que han incrementado su abastecimiento de agua o a los cuales se les ha tapado el canal central. A pesar de que las estalactitas muestran bandas concéntricas, la secuencia puede estar distorsionada y puede ser difícil de definir (Figura 2.2e).

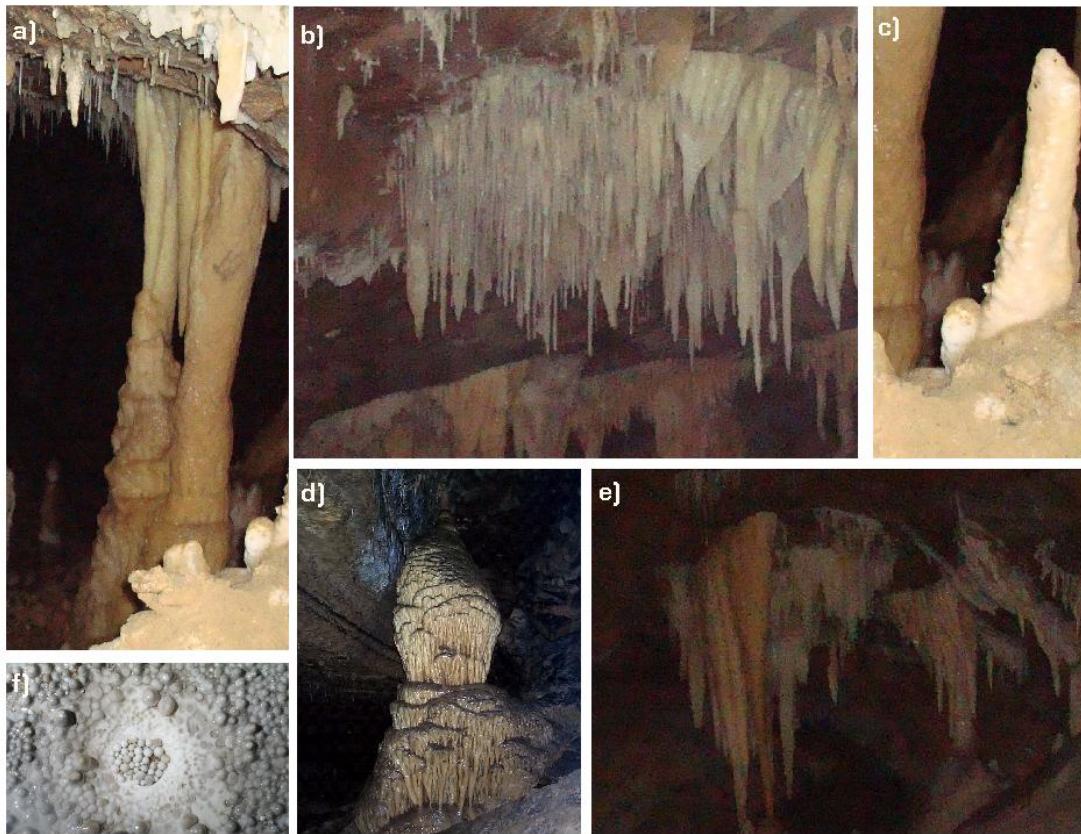


Figura 2.2. Diferentes tipos de espeleotemas; a) Columna. b) Popotes c) Estalagmita d) Colada estalagmítica e) Estalactita f) Perlas. Fotos tomadas por el autor en la Laguna Encantada, cueva de las karmitas, Zapotitlán de Méndez, Pue. Excepto d) y f) tomadas de http://en.wikipedia.org/wiki/Cave_pearl 19/III/2009 14:02

- Estalagmitas: Son formaciones que crecen del piso de la cueva hacia arriba, producto del goteo de agua que precipitó minerales carbonatados sobre el piso. Dicho goteo procede en varias ocasiones de una estalactita. El agua que alimenta las estalagmitas cae en un eje, formando una película de agua que se mueve hacia fuera de este eje, de manera que existe un goteo continuo y no un flujo de agua. Generalmente son las estalagmitas las que contienen los ejes más definidos, (siendo el canal central un eje en las otras espeleotemas) que serán llamados líneas temporales y contienen la más alta resolución estratigráfica (Figura 2.2c).
- Estalactones o columnas: estas formaciones que van del piso al techo de la caverna son el resultado de la unión de estalactitas con estalagmitas (Figura 2.2a).
- Coladas Estalagmíticas: cuando las películas de agua fluyen intermitente o continuamente hacia abajo a través de paredes inclinadas y del piso, pueden depositar hojas continuas de calcita en forma de una colada. Si el agua fluye sobre un área larga de la pared de la cueva, la pared completa puede ser cubierta con una colada (Figura 2.2d). Su grado de crecimiento está directamente relacionado con la cantidad de agua abastecida. Su forma dependerá principalmente de la topografía a la cual cubre.
- Perlas: cuando las gotas de agua caen del techo y golpean el suelo, pueden roer un pequeño valle. Si este contiene un fragmento de roca como un grano de arena, será girado por la fuerza de las gotas, precipitándose calcita alrededor de él. Se creará entonces una forma esférica (Figura 2.2f). La superficie lisa de estas esferas seguirá puliéndose por el contacto con otras esferas en el mismo valle. Para seguir creciendo como esferas, las perlas deberán estar en continuo movimiento. Al dejar de hacerlo, son cementadas entre sí o con el piso, y pueden empezar a convertirse en estalagmitas.

2.2 Geoquímica del Karst subterráneo

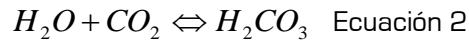
Las espeleotemas se desarrollan a partir de la disolución de la roca caliza por agua meteórica. Es posible ver dicha disolución como un simple proceso superficial donde la calcita es disociada en agua ácida. A pesar de que los ácidos orgánicos y minerales pueden jugar un papel importante en ciertas circunstancias, la disolución está dominada por el ácido formado a partir del CO_2 disuelto. Sin embargo, algunos estudios han sugerido que la erosión de cuevas kársticas es mayor en climas tropicales en comparación con los climas polares, a pesar de que la disolución de CO_2 es mayor a temperaturas más bajas, debido a la existencia de la cubierta

edáfica tropical que proporciona ácidos orgánicos (Fagundo Castillo, 2002). La disolución sucede en tres etapas con cinética propia. Dichas reacciones suceden en medio acuoso, a menos que se indique lo contrario.

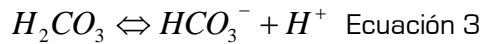
Disolución del anhídrido carbónico en agua,



Hidratación del anhídrido carbónico para formar ácido carbónico,



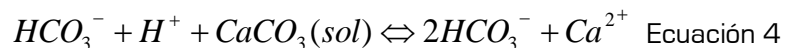
Disociación del ácido carbónico en el ion bicarbonato y en el protón



Esta serie de reacciones está controlada por la solubilidad del CO_2 , la cual disminuye conforme la temperatura aumenta a razón de 1.3%/°C (Gillieson y Spate, 1996). De manera que el agua meteórica, equilibrada ahora con el CO_2 atmosférico, adquiere un carácter ligeramente ácido (pH \approx 5.2) según la Ecuación 2 y 3.

Al encontrarse en equilibrio con el CO_2 atmosférico, el agua meteórica estará saturada de HCO_3^- . Sin embargo, al entrar en contacto con suelos de terrenos kársticos, los cuales poseen niveles elevados de CO_2 , aumenta la concentración de este gas en la disolución. Lo que acidifica aun más el medio, favoreciendo la disolución de $CaCO_3$, al llevarse a cabo la siguiente reacción:

Disolución del carbonato



Lo anterior es explicado con la Figura 2.3 que muestra la concentración de Ca^{2+} en función de la presión parcial de CO_2 (P_{CO_2}), la cual no sigue una relación lineal en el equilibrio, es decir condiciones de saturación (línea azul). De manera que, cuando se mezcla agua meteórica (baja en Ca^{2+} y P_{CO_2}) con el agua del suelo kárstico (alto en Ca^{2+} y P_{CO_2}), ambas saturadas en HCO_3^- y con una P_{CO_2} definida por su ambiente, resultará una disolución insaturada con respecto a la calcita (línea roja), que no está en equilibrio y que puede disolver más calcita (Gillieson y Spate, 1996).

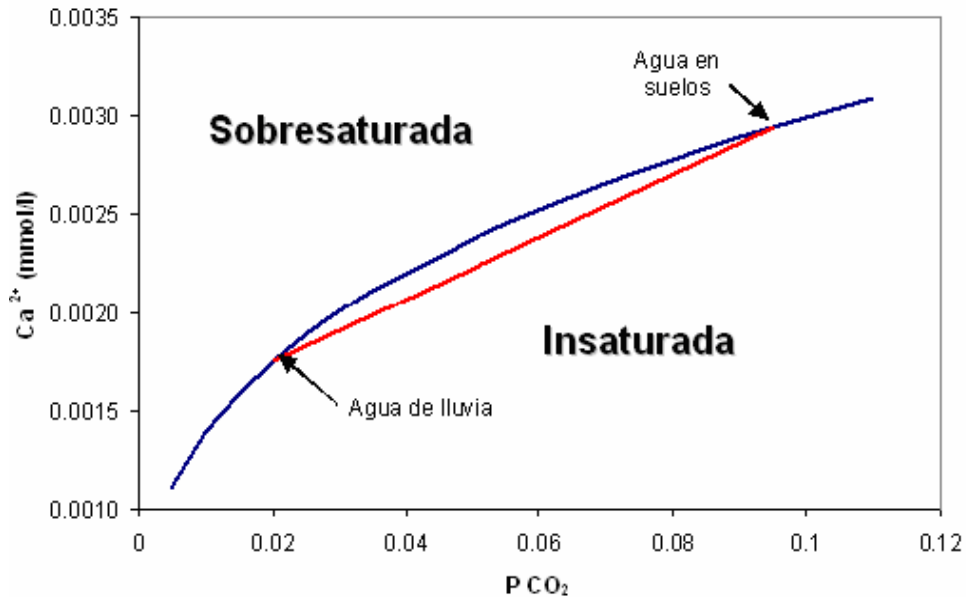
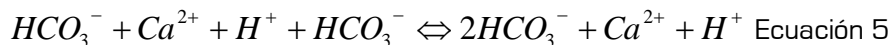
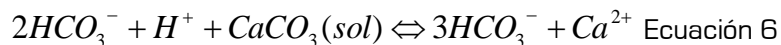


Figura 2.3. Línea de mezcla entre el agua de lluvia y agua calcárea. Tomada de Gilson y Spate (1996).

De manera que al mezclarse agua meteórica con suelo del epikarst tenemos como consecuencia la reacción



Esta última reacción promoverá a su vez, otra reacción de disolución [Ecuación 6], la cual se llevará hasta alcanzar de nuevo las condiciones de saturación con respecto al $CaCO_3$ [Gillieson y Spate, 1996]



Esta serie de reacciones ocurrirá continuamente, agrandando fisuras en el terreno ocasionadas por otros eventos geológicos [fallamiento, plegado, etc.] lo que facilitará que el agua calcárea se infiltre. Durante su trayecto, el agua de percolación viajará a través del epikarst hasta llegar a la zona de precipitación, con la posibilidad de que este proceso pueda repetirse [Figura 2.54] [Fairchild, 2007].

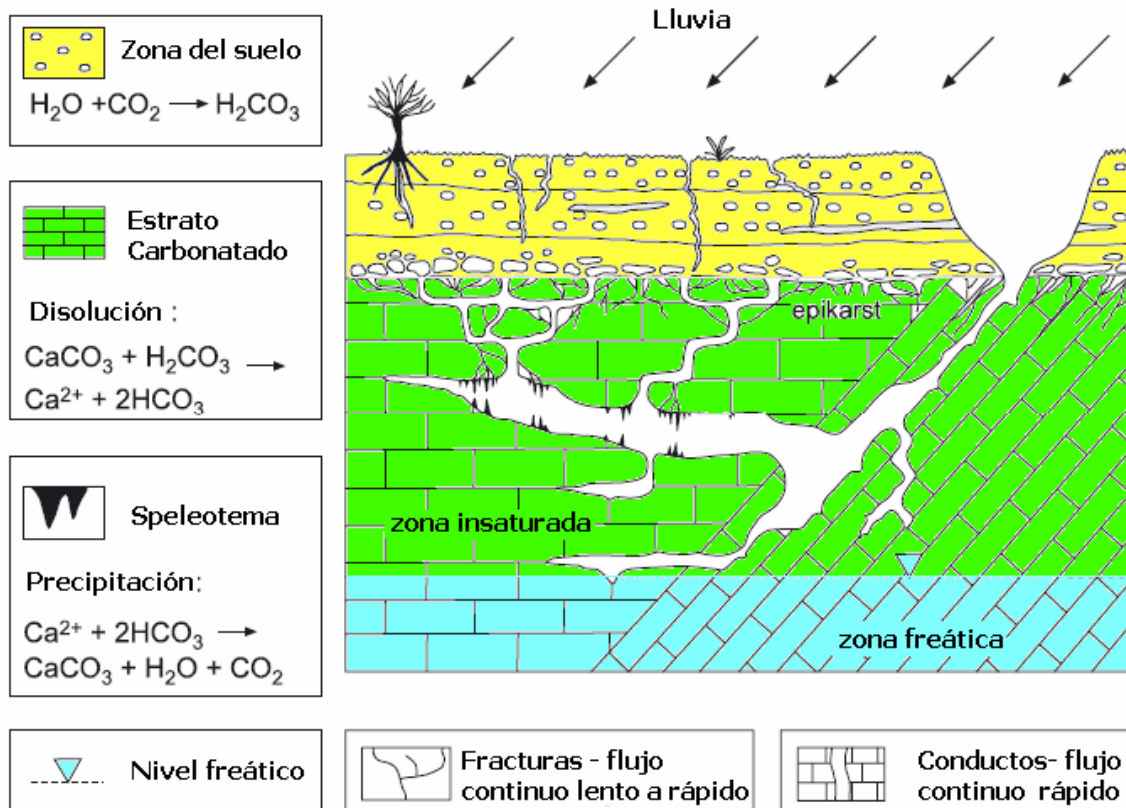
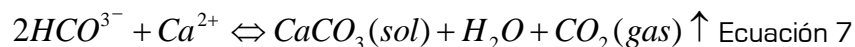


Figura 2.4. Disolución y precipitación del $CaCO_3$ en el proceso de formación de espeleotemas. Las reacciones principales que se siguen en cada zona se muestran a la izquierda. Nótese como la existencia de la falla promovió en primera instancia la disolución de la roca madre. Modificada de Fairchild (2007).

Cuando la disolución saturada en $CaCO_3$ y con una composición química derivada de la interacción con los diferentes componentes del epikarst, llega al interior de la cueva, ocurre un proceso de desgasificación desencadenado por la diferencia de presiones parciales de CO_2 entre el ambiente de la cueva (baja P_{CO_2}) y la disolución saturada (alta P_{CO_2}), de acuerdo con la reacción de precipitación [Ecuación 7], obteniéndose productos termodinámicamente más estables bajo las condiciones de temperatura, presión y humedad que prevalecen en la cueva.



Del lugar donde precipite el carbonato y de las condiciones físicas presentes dependerá el tipo de espeleotema que se forme así como su textura. De esta manera, el goteo y la precipitación posterior de $CaCO_3$, aunado con la temporalidad de este proceso, hacen posible que las estalagmitas crezcan al depositarse las bandas una sobre otra a lo largo de un eje de crecimiento.

2.3 Mineralogía del Karst subterráneo

Existen más de 250 minerales reconocidos en las cuevas, pero solo el yeso, la calcita y la aragonita son componentes mayoritarios (Self y Hill, 2003). Para efectos de esta tesis nos abocaremos a estos dos últimos minerales.

2.3.1 Calcita, CaCO_3

Es el principal componente en una espeleotema. Su sistema cristalino es el trigonal, grupo espacial $3m$ -. La Figura 2.5a muestra su celda unitaria. Es termodinámicamente estable en las condiciones que prevalecen en una cueva. Su dureza es 3 y se encuentran formando desde criptocristales hasta microcristales (Klein, 1999). La morfología que presenta en el agregado mineral puede ser clasificado como terroso, pero es propiamente llamado estalactítico. Su color es blanco opaco. Su lustre es terroso. Su exfoliación es perfecta en $\{10\bar{1}1\}$, y el sistema cristalino al que pertenece es el hexagonal, (Бетехтин, 2008).

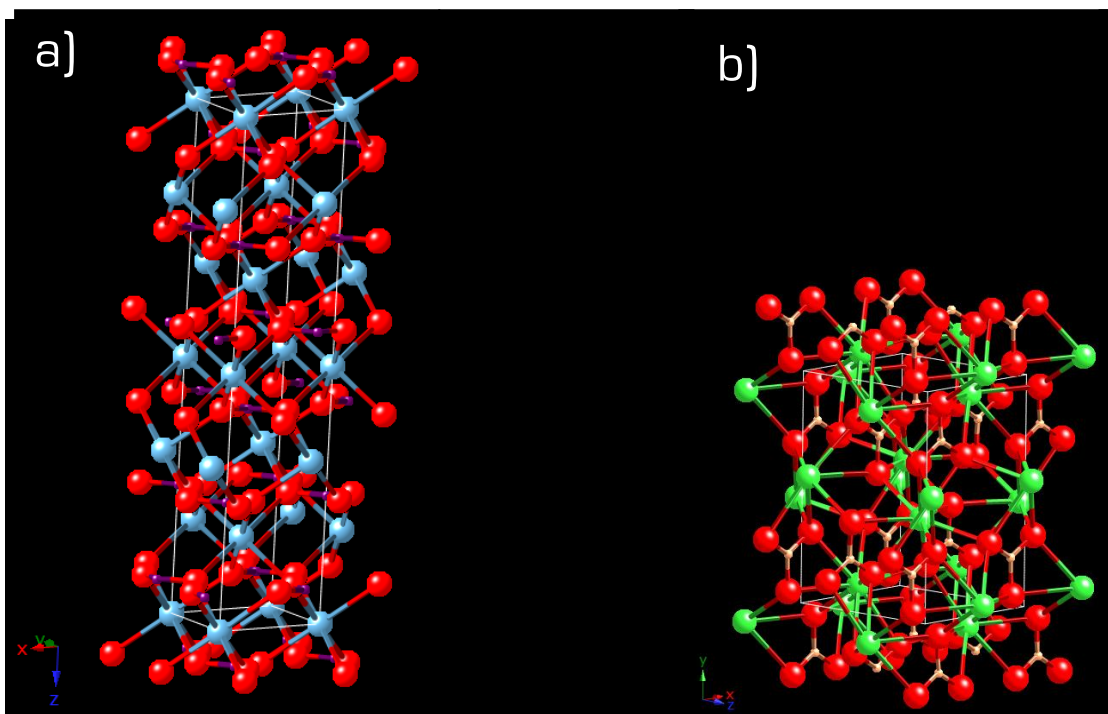


Figura 2.5. a) Celda unitaria de la calcita. Sus parámetros de red son $a = b = 4.99 \text{ \AA}$ y, $c = 17.06 \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = 90^\circ$ y $\gamma = 120^\circ$. b) Celda unitaria de la aragonita, sus parámetros de red son $a = 4.96 \text{ \AA}$, $b = 7.96 \text{ \AA}$ y $c = 5.74 \text{ \AA}$, $\alpha = \gamma = \beta = 90^\circ$. Los Colores asignados para los átomos son Oxígeno = rojo, carbón = morado y calcio = azul. Modelos hechos con Crystal Maker® en base a Wyckoff (1964) y De Villiers (1971).

2.3.2 Aragonita, CaCO₃

Se encuentra en equilibrio metaestable en las condiciones que prevalecen en una cueva. Su sistema cristalino es el ortorrómbico, grupo espacial $2/m2/m2/m$. La Figura 2.5b muestra su celda unitaria. Su dureza es 3 y se encuentran formando desde criptocristales hasta microcristales, si bien más alargados que los de la calcita. Su color es blanco brillante. Su lustre es vítreo y su exfoliación distintiva es {010}, y una menos evidente en {110} y el sistema cristalino al que pertenece es el Ortorrómbico [Klein, 1999; Curien, 2001; Johnsen, 2002]. La morfología que presenta en el agregado mineral es propiamente llamado estalactítico, y consta de diferentes aspectos cuyo hábito es hexagonal prismático o hexagonal piramidal. Los cristales cuya aspecto es de aguja, elongados a lo largo del eje c, formados en condiciones lentas, continuas, de prolongada pérdida de gas y evaporación. Por lo que están isotópicamente más enriquecidos en ¹⁸O. Mientras que el aspecto prismático se forma de un goteo, cuya proporción de descarga es menor a 0.00035 mL/min y que tiene una relación Mg/Ca mayor a 1.1 [Frisia *et al.*, 2002]. La aragonita reemplaza a la calcita probablemente en sistemas que están químicamente abiertos. Mientras que la presencia de calcita entre la aragonita con aspecto de agujas, probablemente favorece el reemplazo de esta última por calcita, gracias al proceso de nucleación. Dónde el estado de saturación fluctúa entre la insaturación de la aragonita y la sobresaturación de la calcita. Dicha transformación ocurre en un tiempo < 1.0 Ka. La química presente en la aragonita precursora es heredada en la fase reemplazante y preservada en los vestigios micrométricos de la aragonita [Frisia *et al.*, 2002].

2.4 Textura

El concepto de textura utilizado en petrología es impráctico para el caso de las espeleotemas. Debido a que en petrología la textura está dada por la relación matriz, clasto y cementante. Así tenemos que para las rocas carbonatadas primarias, esta relación es determinada por el tipo y cantidad de clastos, en donde los bioclastos juegan un papel preponderante [Embry, 1971]. En el caso de las espeleotemas, cuyo origen es secundario, los clastos son prácticamente inexistentes, mientras que no se puede hablar para fines prácticos de una matriz. Por esta razón el concepto de textura se da desde la Ontogenia, una rama de la Mineralogía que estudia cómo los cristales individuales se combinan en agregados, así como la manera en que se desarrollan como cuerpos físicos [Ферсман, 1935].

De acuerdo a la escuela rusa que desarrolló esta ciencia, mientras el término “estructura” describe la naturaleza física de los cristales individuales, la “textura” (en términos de Ontogenia)

Antecedentes generales sobre espeleotemas y su relación con los paleoclimas

describe los aspectos geométricos de construcción y la organización de los minerales individuales o de los agregados dentro del llamado Cuerpo Mineral Menor. Este último es el objeto de estudio de la Ontogenia y sería estudiado por técnicas mineralógicas en oposición a técnicas petrológicas o cristalográficas.

La jerarquía de los cuerpos minerales menores establece niveles, los cuales describen el grado de asociación entre minerales individuales y agregados. De manera que un nivel está constituido por minerales individuales o agregados de un nivel anterior. Cada nivel a su vez contiene órdenes, cuya diferencia entre ellos es la manera en que los minerales individuales o agregados de un nivel anterior se asocian. En el ambiente kárstico subterráneo existen cuatro niveles para los cuerpos minerales menores (Self y Hill, 2003). Las espeleotemas son clasificadas según su tipo entre los niveles dos, tres y cuatro.

Para efectos de esta tesis, nos avocaremos a las estalagmitas. Estas espeleotemas se clasifican en el nivel dos, lo que significa que los minerales crecen sobre un sustrato como agregados. Donde los agregados son más que un grupo de individuos de la misma especie mineral creciendo juntos, pues la interacción entre ellos afecta y limita el crecimiento, de manera que podemos hablar de una competencia en el crecimiento.

El orden para este nivel al que corresponden las estalagmitas comprende los multi-agregados, los cuales presentan inter-crecimiento y co-crecimiento de diferentes tipos de agregados que se forman simultáneamente en el mismo ambiente de cristalización.

Pueden ser híbridos para el caso de estalagmitas producto de la hibridación de agregados de esferulitas [agregados donde el sustrato es convexo] (Figura 2.6a) con corallitas [agregados de esferoides, es decir esferulitas sin estructura simétrica, que tienen una forma redondeada y un diseño ramificado] (Figura 2.6b), o tufáceos si son producto de un crecimiento masivo rápido, ya que provienen de corrientes turbulentas donde la sobresaturación de la disolución fuente es causada por agitación mecánica con la consiguiente pérdida de CO_2 en forma de gas. Lo que ocasiona a su vez la nucleación de calcita en la disolución alrededor de las burbujas y no en el sustrato.

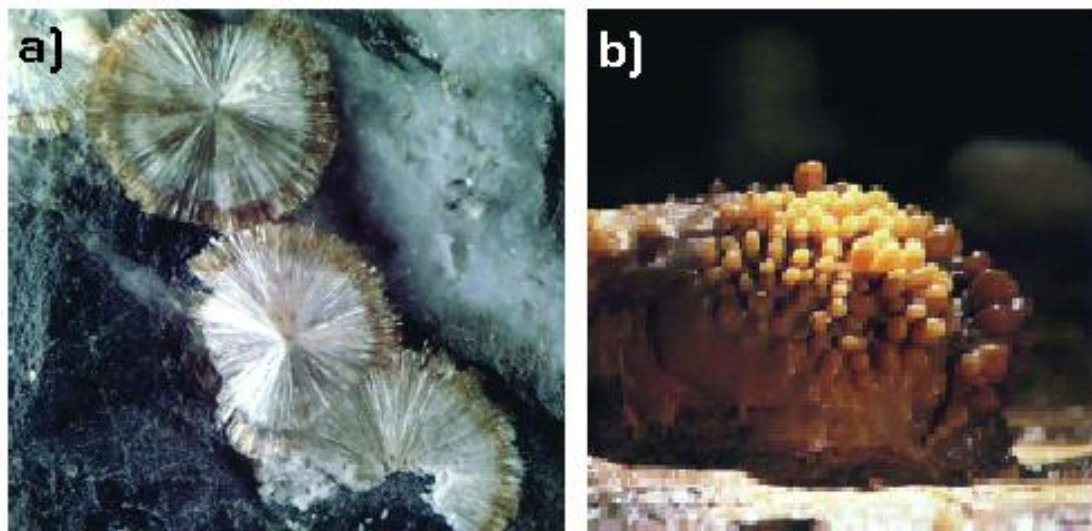


Figura 2.6. a) Ejemplo de Esferulitas, en este caso de wavelita, un aluminofosfato. b) Ejemplo de Corallitas. Notese que el crecimiento más fuerte es donde la superficie es más convexa. Tomada de Self y Hill (2003).

Las estalagmitas también pueden ser clasificadas en el tercer nivel, el de los conjuntos de agregados. El cual posee sólo un orden, el de Kora (de la palabra rusa **Kopa**, que significa corteza), que es un conjunto de agregados de textura similar que crecen conjuntamente en el mismo espacio de cristalización, y por ende se forman en las mismas condiciones ambientales.

Por último también encontramos estalagmitas en el cuarto nivel, el que corresponde a un conjunto de Koras. Consta también de un sólo orden, el de Ensamblés. Aquí el ambiente de cristalización evoluciona durante un largo periodo, haciéndose más seco hasta que una nueva fase húmeda marca un nuevo ciclo de cristalización. Estos ciclos no se llegan a completar siempre. En los anteriores niveles los minerales se formaron en ambientes de cristalización estables durante un solo evento, en el cuarto nivel esto no sucede. Es así como un cuerpo que comenzó desarrollándose como kora estalagmita termina como kora corallita al ir perdiendo humedad el ambiente. El sobrecrecimiento puede ser marcado o gradual. Es claro que, dado que el crecimiento depende de las condiciones de la cueva, el estudio de un kora o de un ensamble nos daría información paleoclimática.

2.5 Indicadores geoquímicos utilizados comúnmente en estalagmitas

Desde hace 40 años, se ha utilizado a las espeleotemas, y en particular a las estalagmitas como indicadores paleoclimáticos (Hendy y Wilson, 1968). Sin embargo, es sólo durante los últimos años cuando han sido utilizadas ampliamente, pues en las primeras tres décadas era

relativamente grande la incertidumbre en su fechamiento, ya que el método utilizado era la espectroscopía α (Latham *et al.*, 1986). Esta técnica medía las partículas α emitidas por los núcleos de ^{238}U , ^{235}U , ^{234}U y ^{232}Th presentes o sus isótopos hijos en equilibrio secular. Dicha técnica requería de 10g de muestra, lo cual, dada la naturaleza del crecimiento de las espeleotemas, sobrepasaba la cantidad que se podía extraer para una muestra contemporánea (Dorale *et al.*, 1999).

La composición final de las estalagmitas se encuentra influenciada por diferentes factores, los cuales pueden modificar la composición química e isotópica de los componentes involucrados. De esta manera, la estalagmita es un reflejo de los diferentes factores ambientales (externos e internos) que predominaban durante el proceso de la formación. Así, entre los indicadores geoquímicos más utilizados se encuentran, la composición isotópica del oxígeno, expresada como $\delta^{18}\text{O}$ (McDermott, 2004; Lachniet, 2009) y la composición isotópica del carbono, expresada como $\delta^{13}\text{C}$ (Fairchild *et al.*, 2006). El primero indica la composición isotópica del agua meteórica percolada a partir de la cual precipitó, (y en mucho menor grado la temperatura, debido a que la cueva está a temperatura relativamente constante). Que a su vez es el resultado de una serie de fraccionamientos isotópicos que reflejan variaciones en la tasa de evaporación y precipitación (Hoefs, 2004), así como su origen (Cole *et al.*, 1999). Esta información puede conservarse intacta aún después de 500,000 años de la precipitación del CaCO_3 (p. ej: Ludwig *et al.*, 1992).

Mientras que la composición isotópica de carbono estable, $\delta^{13}\text{C}$, reflejará si la disolución ocurrió en un sistema termodinámicamente abierto o cerrado, si hubo fuentes adicionales de CO_2 en el epikarst (como materia orgánica) o no, respectivamente (Fairchild *et al.*, 2006). Además en ocasiones también reflejará el tipo y cantidad de vegetación existente alrededor del karst subterráneo. Ya que el fraccionamiento del carbono es de carácter biogénico, es decir ocurre por el tipo y número de reacciones asociadas a un determinado metabolismo. Así, existen tres tipos de metabolismo usados preferentemente por las plantas, C3, C4 y CAM que están asociados con vegetación boscosa de mayor humedad, con plantas herbáceas de menor humedad y con xerófilas o plantas propias del desierto o semidesierto, respectivamente. De esta manera el $\delta^{13}\text{C}$ del carbonato de una estalagmita nos puede en teoría arrojar información sobre el tipo de vegetación imperante en las zonas adyacentes a la gruta, la cual con la precaución debida puede a su vez indicarnos las condiciones de humedad. Sin embargo, cabe mencionar que diversos procesos asociados con el transporte de fluidos en el epikarst puede también afectar significativamente la composición $\delta^{13}\text{C}$ de la estalagmita (Richards y Dorale, 2003).

2.5.1 Variaciones molares y elementos traza

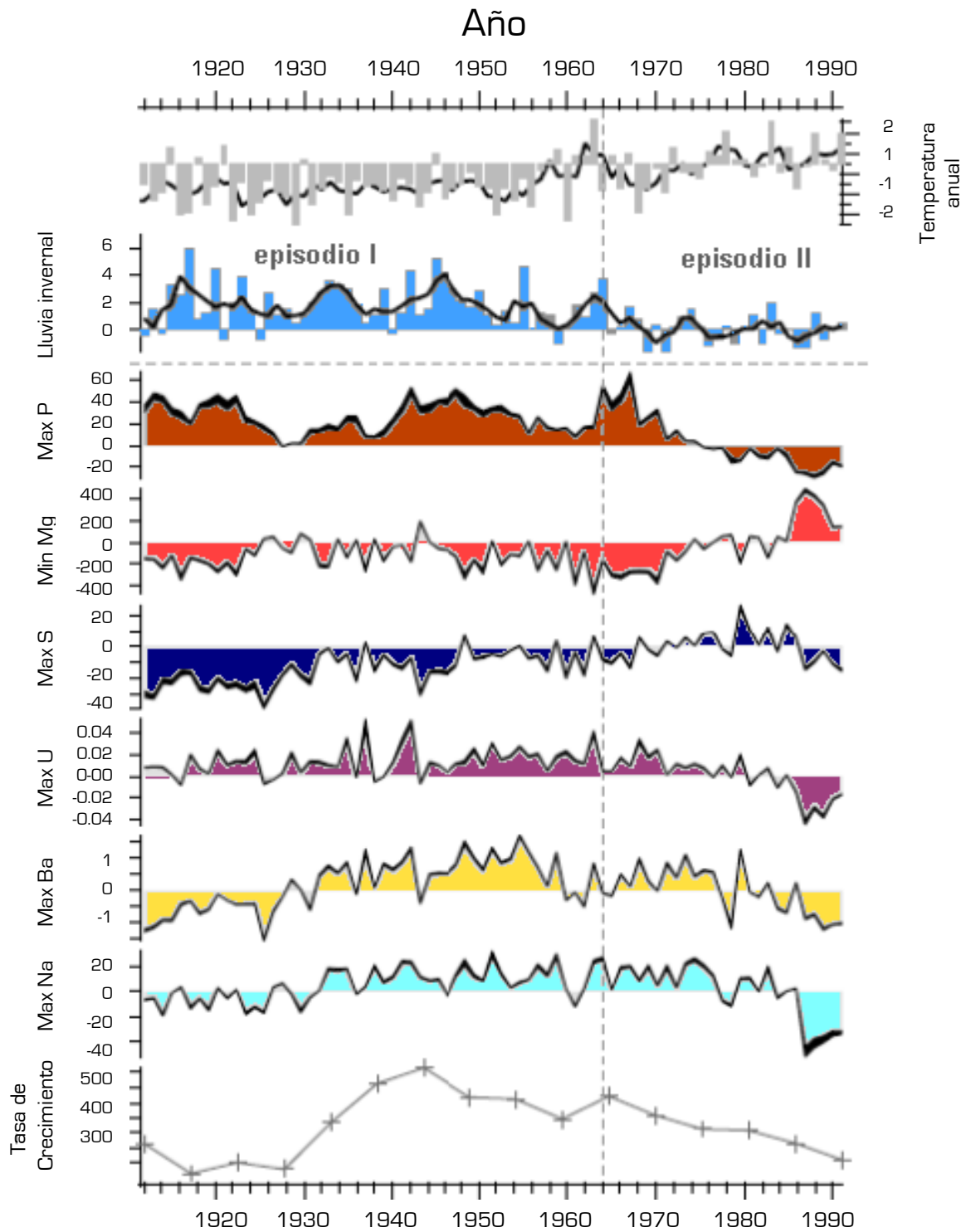


Figura 2.7. Comparación entre la precipitación mediada de Junio a Agosto, la temperatura anual, las máximas concentraciones de elementos químicos y la concentración mínima de Mg de la estalagmita de la cueva de Moondyne, SE de Australia desde 1910 a 1990. Modificada de Trebble *et al.* (2003).

También las variaciones en las proporciones molares de Mg/Ca, Sr/Ca, Ba/Ca, U/Ca, así como las variaciones en las concentraciones de algunos elementos traza (Ba, La, Ce, Eu, Th, U, etc.) en estalagmitas han sido utilizados recientemente como indicadores paleoclimáticos (Hellstrom, 2000; Treble *et al.*, 2005; Fairchild y Treble, 2009).

Ejemplo de esto es un estudio realizado en la estalagmita de la cueva de Moondyne, SE de Australia, donde fue analizada la variación en la concentración máxima de elementos traza que habían sido depositados durante el crecimiento de la estalagmita entre 1911 y 1992 (Treble *et al.*, 2003). En ese trabajo los autores utilizan el promedio de la variación en cada indicador en este periodo para discernir una baja en la precipitación que ocurrió a partir de 1964. También comparan con la precipitación mediada de Junio a Agosto y la temperatura anual de esos años, mostrando las similitudes entre los diferentes indicadores (Figura 2.7).

Tanto las proporciones molares como las concentraciones de elementos traza son altamente sensibles a variaciones climáticas. Responden a diferentes mecanismos de incorporación. Esta respuesta puede estar acoplada a aspectos climáticos, físicos y/o a aspectos geoquímicos e hidrológicos, por lo que su interpretación debe ser cuidadosa. Así, los minerales que constituyen las espeleotemas aceptan durante su crecimiento, pequeñas cantidades de otros iones en solución sólida siendo Sr^{2+} y Mg^{2+} los más importantes, sin embargo Ba^{2+} y los iones del grupo de transición como Fe^{2+} , Ni^{2+} y Cu^{2+} son encontrados en pequeñas proporciones. De esta manera debido al tamaño de sus radios iónicos, el Sr^{2+} tiene una mayor solubilidad en aragonita y el Mg^{2+} en calcita. Hay que hacer énfasis que esta llamada solubilidad no implica reacciones de intercalación, sino que el Mg^{2+} y el Sr^{2+} quedan atrapados según su disponibilidad por la red cristalina en el sitio del catión al momento de precipitar el mineral.

2.5.2 Mg/Ca como indicador de Humedad en Espeleotemas

Para esta tesis, por lo argumentado en la hipótesis 3 (punto 1.3.2), es importante la relación Mg/Ca. La idea de asociar condiciones de humedad a una relación de Mg/Ca deriva del modelo de tiempo de retención.(Fairchild, 2000). Dicho modelo establece que si el agua tiene un tiempo de residencia más alto en la roca madre, es decir un flujo lento (condiciones de sequía), aumentará la disolución de la fracción dolomítica, $[\text{Ca,Mg}]\text{CO}_3$ en ésta, lo que conducirá a relaciones más altas de Mg/Ca. Este mecanismo requiere que la disolución de la fracción dolomítica sea en disoluciones ya saturadas por calcita (Fairchild *et al.*, 2006). Esto significa que la precipitación de CaCO_3 en el epikarst se refleja en un enriquecimiento del Mg en relación al Ca en el agua. Por lo tanto, en condiciones de sequía el agua de filtración se enriquece en Mg al

haber mayor precipitación de CaCO_3 previa al arribo a la cueva, en comparación a las épocas más húmedas cuando el epikarst se encuentra saturado (en agua) y la precipitación de calcita en dicha zona es poco factible (Fairchild y Treble, 2009).

2.6 Análisis de imágenes en estalagmitas

Hasta aquí presentamos los métodos convencionales para obtener información paleoclimática de las estalagmitas. A partir de la última década en una serie de estudios se ha optado por utilizar el análisis de imágenes de las superficies de rocas o secuencias sedimentarias, por considerarse un método relativamente accesible monetaria y laboriosamente, a la vez que supone no ser destructivo (Porter, 2000; Bryksina, 2005). Un ejemplo de estos métodos fue el análisis sobre la imagen de una superficie en una secuencia de varvas de la formación Elantina al sur de Australia con el fin de obtener señales solares de finales del Precámbrico (Otaola *et al.*, 2003). La imagen puede obtenerse técnicamente en cualquier intervalo del espectro que se desee, siendo escogidas aquellos intervalos del espectro electromagnético donde la señal obtenida refleje cambios evidentes que supongan información climática. De esta manera, varios grupos de investigación han optado por aplicar el análisis de imágenes a las estalagmitas con el fin de utilizarlo como indicador paleoclimático. Los siguientes incisos describen este tipo de trabajos.

2.6.1 Fluorescencia

Aunque la calcita por sí misma es incolora, las espeleotemas usualmente exhiben colores que van del naranja pálido, a rojo y pardo oscuro. El color tiene su origen en la presencia de pequeñas cantidades de óxidos e hidróxidos de hierro, de sustancias orgánicas provenientes del suelo, y/o arcillas, etc., las cuales pueden estar incorporadas a la calcita entre las fronteras de grano o formar una segunda fase (Tucker y Wright, 1990). Los causantes del color pueden ser determinados mediante medidas en el espectro de infrarrojo o por fluorescencia (White, 2001). Las propiedades de fluorescencia dependerán del origen de la materia orgánica, así como del pH en que hayan sido formados los ácidos húmicos, del tipo de suelo y, por supuesto, del clima (McGarry y Baker, 2000).

La Figura 2.8 muestra el análisis por fluorescencia de una estalagmita de Verors, Francia. El propósito principal de ese trabajo fue analizar las moléculas orgánicas presentes en la estalagmita. En este caso la presencia de mayor materia orgánica fue asociada a un régimen de mayor humedad (Perrette *et al.*, 2005). De manera que de la variación de la relación de

intensidad de la fluorescencia a lo largo del eje de crecimiento se puede construir una serie de tiempo que contiene información de paleohumedad.

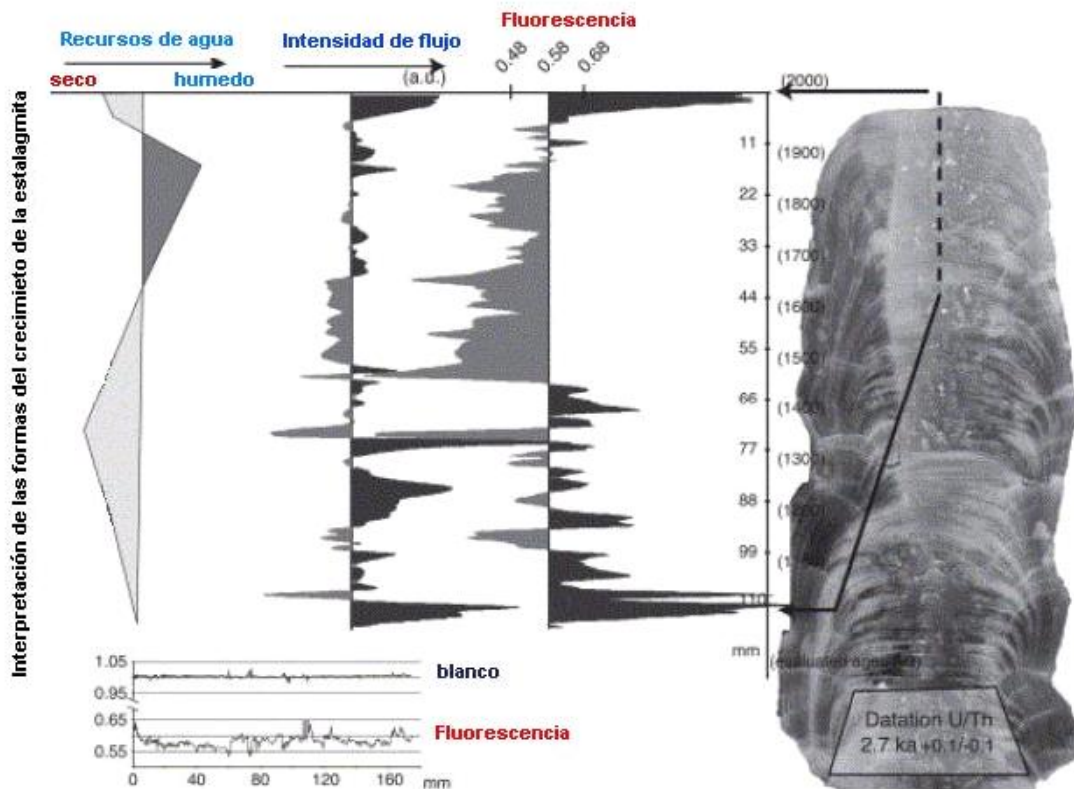


Figura 2.8. Cambios en la fluorescencia en la estalagmita de Vercors, Francia. Las edades fueron evaluadas por U/Th. Modificada de Perrette (2005).

2.6.2 Luminiscencia

Muchos fotógrafos notaron que al fotografiar las espeleotemas, se observaban tonos pálidos de verde o azul, varios segundos después de haber sido expuestas al flash. De manera que muchas espeleotemas son fosforescentes ya que contienen sustancias de humus que fueron incorporadas a los cristales de calcita (Baker *et al.*, 1999). Esto se puede ver en el espectro de luminiscencia, el cual es un reflejo de las diferentes mezclas de ácidos húmicos de diversa masa molecular (White, 2004). Así, la amplitud de la luminiscencia varía en un patrón horizontal paralelo a las bandas depositadas (Shopov *et al.*, 1994). De manera que, entonces, la espeleotema es iluminada con luz UV, al tiempo que se adquiere una fotografía de alta resolución. Las mediciones con el densitómetro sobre la película fotográfica producen un patrón de bandas brillantes y oscuras a lo largo del eje de crecimiento (Figura 2.9c), cuyas variaciones en intensidad han sido interpretadas como indicadores de humedad, ya que la cantidad de humus presente depende del régimen de humedad (Webster *et al.*, 2007).

2.6.3 Escala de grises o reflectancia

De las estalagmitas bandeadas se puede obtener, potencialmente, un nuevo indicador basado en el color [o intensidad de este] de cada una de las bandas. Ya que la intensidad de color está asociada a la cantidad de detrito y materia orgánica presente al tiempo de la precipitación, la cual a su vez es función de los regímenes de humedad presentes. De manera que una línea de tiempo construida a partir de la variación de color a lo largo del eje de crecimiento puede contener información de paleohumedad.

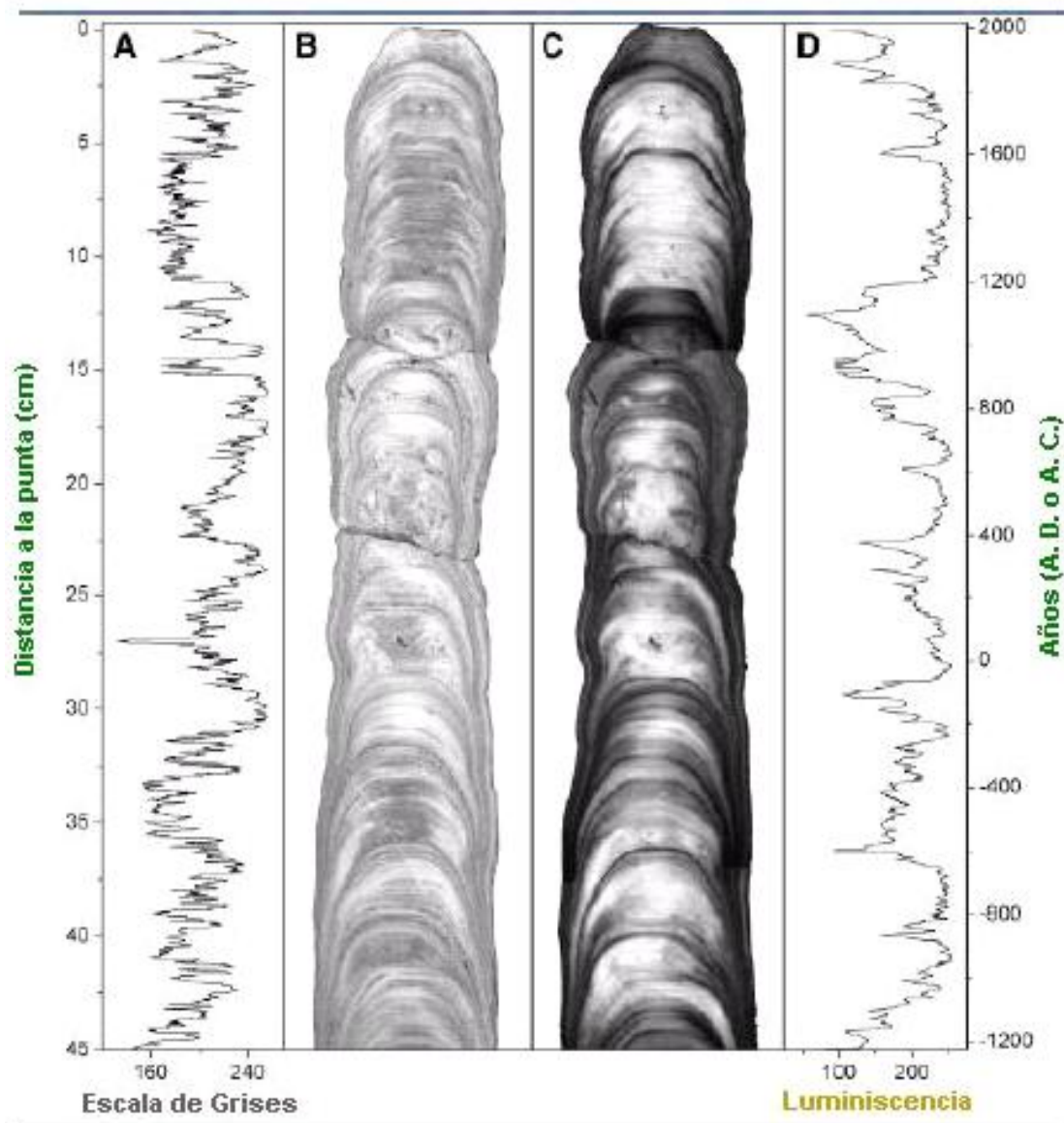


Figura 2.9. Variaciones en la escala de grises y en la luminiscencia estimulada por UV en la punta de 45 cm de la estalagmita MC01 del oeste de Belice. Tomado de Webster (2007).

Por lo tanto, un análisis de alta resolución para buscar variaciones en el color en las estalagmitas bandeadas implicaría un nuevo indicador paleoclimático que sería más fácil y hasta cierto punto más barato de analizar, si bien no buscaría remplazar los otros indicadores sino complementarlos. Este es el tema central de esta tesis.

El trabajo de Pérez-Enriquez *et al.* (2007), antecesor inmediato a esta tesis obtenía la imagen utilizando un escáner a la máxima resolución, generalmente 2600 ppi (puntos por pulgada), se leía la imagen escaneada en escala de grises, y se escogía una columna de datos, cuya información correspondía a un elemento de distancia, pero de edad desconocida, a lo largo del eje de crecimiento. De esta manera era posible realizar un análisis espectral, y obtener otras funciones matemáticas que caracterizaban, la rugosidad, estructura y orden de la información obtenida. Cabe señalar que la mayoría de los trabajos utilizaron la imagen en escala de grises, ya que en el proceso de digitalización, el color está dado por la combinación de tres vectores correspondientes a los tres colores primarios, rojo, verde, azul (RGB) (Trauth, 2007), mientras que en la escala de grises un solo vector define las diferentes intensidades de gris (Lira, 1997). Sin embargo, podría entonces estudiarse cada vector en su correspondiente serie de tiempo y analizarse en conjunto por el método de componentes principales, cuál color primario es un reflejo de las condiciones paleoclimáticas (Legendre y Legendre, 2003). Comúnmente las imágenes procesadas en escala de grises son guardadas en ocho bits por pixel, lo que permite 256 intensidades, las cuales van en números racionales desde 0 para la ausencia de tono o sea negro, hasta el 255 que es el blanco. A pesar de esto, la escala de grises no es lineal.

Trabajos, contemporáneos al desarrollo de esta tesis, han utilizado la escala de grises como indicadores climáticos en estalagmitas, aunque no con el fin de hacer un análisis espectral. Así, se encontró que no había una respuesta clara en las señales obtenidas, de manera que no era posible distinguir entre calcita rica en detrito, que era pardo oscura y calcita clara traslúcida (Figura 2.9b), aún cuando ambas son creadas por diferente régimen de humedad (Webster *et al.*, 2007), distinción que en cambio, era posible ver por luminiscencia o utilizando la escala cromática (Figura 2.9c). Esta última escala había sido construida asignándole valores a ocho intensidades cromáticas. Cada una a su vez era una combinación de valores RGB, que correspondían con los colores, desde el color de la calcita traslúcida hasta el color de la calcita pardo oscura.

Otros trabajos han utilizado la escala de grises para indagar la naturaleza de la textura y el color, aunque no directamente como indicador paleoclimático (White, 1981; Perrette *et al.*, 1997; Jex *et al.*, 2008). En este último optaron por utilizar una mayor cantidad de filtros al hacer el análisis

por reflectancia, [técnica llamada hiper-espectroscopía] evitando algunos defectos visuales que se tienen por el método antes descrito. Es decir en vez de utilizar los filtros convencionales para los colores primarios, utilizaron muchos más, para que al combinarse crearan una imagen más detallada. Lo anterior permitió a los autores detectar pequeños cambios en la mineralogía de la estalagmita, así como la presencia de inclusiones fluidas.

2.7 Antecedentes de espeleotemas como indicadores paleoclimáticos en México

En el caso de México diversos estudios se han hecho sobre paleoclimatología para el Pleistoceno y el Holoceno, los cuales son principalmente de carácter limnológico, edafológico, glaciológico y dendrocronológico (Metcalf *et al.*, 2000). Para el caso en el que se usan las espeleotemas como archivos paleoclimáticos tenemos como trabajo pionero el realizado por Harmon *et al.* (1978). El cual en un principio pretendía conocer la temperatura absoluta, con base al $\delta^{18}\text{O}$ obtenido de diversas espeleotemas de Norte América, entre ellos el de una estalagmita de la Sierra de El Abra de San Luis Potosí, cuya edad abarcaba de los 100 ± 2 Ka a los 50 ± 2 Ka.. Cabe destacar que uno de los puntos de este trabajo fue tratar de explicar el sentido que tenían las señales obtenidas, pues la variación de estas podía deberse tanto a los procesos de evaporación y precipitación como a la variación de la temperatura en el interior de la cueva [La cual como dijimos en el apartado 2.5, es generalmente constante]. La espeleotema de San Luis Potosí era la única de las seis que había sido recolectada en una zona dónde la evapotranspiración excedía a la precipitación, por lo que no fue posible, determinar a partir de sus inclusiones fluidas, el sentido de las señales (si eran directa o inversamente dependientes de la temperatura). Sin embargo, al suponerse una dependencia negativa, se pudo ver que dicha estalagmita mostraba tendencias climáticas que aparecían en el resto de las espeleotemas estudiadas en el trabajo y que correlacionaban con los cambios en la insolación durante el verano del Hemisferio Norte (Harmon *et al.*, 1978).

Entre los trabajos más recientes que involucran espeleotemas como indicadores paleoclimáticos encontramos los estudios hechos a; una estalagmita de Guerrero del Holoceno temprano (Bernal *et al.*, 2006), de Yucatán del Holoceno tardío, (Endsley *et al.*, 2007), de Puebla del Pleistoceno (Hernández-Mendiola, 2008) y los ya citados de Pérez-Enriquez *et al.* (2007) y Ramírez-Izquierdo *et al.* (2007). Así como un estudio de espeleogénesis y su relación con el clima hecho también en Puebla (Aliaga-Campuzano *et al.*, 2009). Por su cercanía con la región y su contexto climático también pueden considerarse la estalagmita del Holoceno tardío procedente de Panamá (Lachniet *et al.*, 2004) y la ya citada procedente de Belice (Webster *et al.*, 2007).

Capítulo III

Contexto geográfico, geológico y climático

“Voy por la vereda tropical
La noche plena de quietud
Con su perfume de humedad
En la brisa que viene del mar
Se oye el rumor de una canción
Canción de amor y de piedad”
Vereda Tropical, Gonzalo Curiel

En medio de un paisaje desolado, fray Junípero Serra¹ comanda a un grupo de misioneros. Hermanos en la fe, que arrear burros en medio del semidesierto Queretano. Fray Junípero, tal vez, piensa lo extraño y hermoso que es la vista que está ante sus ojos. Una serie de capas, como losas paralelas fijadas una sobre otra por la mano del Creador que, sin embargo, se retuercen formando un paisaje bastante accidentado. Sabe que de ahí se podrían obtener lajas para la construcción de templos. Tan sólo unas semanas antes el virrey le encomendó seguir con las labores de evangelización de los Jonaces y Pames, naciones indígenas nómadas que además de vivir de la caza, pesca y recolección, también extraen el cinabrio de las cuevas. Sabe que su encomienda no es fácil, pero su vida desde que tomó los hábitos en Mallorca, nunca lo ha sido. Ahora con la expulsión de la Compañía de Jesús de todo el imperio español, los franciscanos deben cubrir uno de los huecos dejados por ellos. Construir nuevas misiones en un territorio denominado la Sierra Gorda. Tan sólo pasa la colina, da la vuelta a una curva y aquel paisaje de capas desaparece. Fray Junípero ahora sólo ve montañas cubiertas de vegetación verde; conforme avanza, advierte el paso de especies propias de ambientes áridos a especies tropicales. A pesar de la vegetación observa que las montañas siguen teniendo la misma forma. Hay demasiadas curvas, piensa, no es un buen lugar para construir una misión. Necesita un lugar alto, menos accidentado, donde pueda dominar la vista ante presuntos ataques nómadas. Ese lugar lo encontrará en el interior de la Sierra Gorda. Sobre un ambiente kárstico. Ahí fray Junípero, fundará la misión Franciscana de Jalpan.

La importancia de Jalpan para esta tesis radica en que fue en esta región donde se ubica la cueva de Los Riscos, que es el lugar donde recolectamos la estalagmita utilizada a lo largo de esta investigación. Por lo que es necesario hacer una revisión del contexto geográfico, geológico y climático de esta región.

¹ Su nombre de laico era Miguel José Serra. Fue declarado Beato por la Iglesia Católica Romana en 1989.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

3.1 Contexto geográfico

Jalpan de Serra es un municipio que está situado en la parte norte del estado mexicano de Querétaro, entre las coordenadas geográficas 21°03' y 21° 39' de latitud Norte y 99°10' y 99°26' de longitud Oeste; sus altitudes varían entre los 400 y 1800 metros sobre el nivel del mar. Se encuentra limitado al norte por el estado de San Luis Potosí, al sur por el municipio de San Joaquín, al este por el municipio de Landa de Matamoros y al oeste por los municipios de Pinal de Amoles y Arroyo Seco. Cuenta con una extensión territorial de 1,121 kms² conformado el 9.5% del total de la superficie del Estado de Querétaro. Su historia como entidad política comienza como misión agustina en 1608², para pasar a manos de los franciscanos en 1744, como misión dependiente del Colegio Apostólico de San Fernando. El 12 de agosto de 1825 se convirtió en municipalidad de la provincia de Querétaro, y desde 1919, municipio del ahora estado de Querétaro.

3.2 Contexto geológico

Jalpan de Serra se encuentra sobre la formación de caliza EL Abra-El Doctor (KT), en la provincia geológica de la Plataforma Valles. La plataforma Valles es producto de diferentes eventos sedimentarios que reflejan aspectos interesantes, ya que en sus contactos geológicos quedan delimitados ambientes de formación de plataforma y de cuenca que han sufrido movimientos tectónicos, causando plegamientos y fallas geológicas tanto normales como inversas. Estas estructuras geológicas determinan la presencia de un relieve complejo (Carrillo, 1990).

Durante el Cretácico y el Paleogeno se vio afectada por distintos esfuerzos tectónicos de la Orogenia Laramide. La deformación de la plataforma Valles determina un patrón estructural orientado de noroeste a sureste representado por numerosos plegamientos recumbentes de considerable amplitud expuestos en rocas del Cretácico. Este patrón estructural está representado por dos estilos de deformación, siendo sobre rocas calcáreas de estratificación mediana a gruesa el que constituye la formación El Abra-EL Doctor. Esta última, por lo general, presenta estructuras anticlinales amplias con abundantes diaclasas y fracturas, además de fallas normales de poca y mediana extensión. Esta formación favorece el desarrollo del paisaje kárstico (Lazcano, 1986).

La formación El Abra yace sobre la formación Las Trancas y está constituida por calizas con espesores de 1,500 a 2,000 metros (Carrillo y Suter, 1982) definen cuatro facies para esta

² <http://www.queretaro-mexico.com.mx/jalpan/index.html> 8/III/2009 19:07

formación, que son: la formación Tamaulipas para las facies de cuenca, constituidas por calizas de textura fina con capas y nódulos de pedernal, y con intercalaciones de finos estratos de lutita; la formación Tamabra para las facies de talud, compuestas por brechas sin sedimentarias y calizas bioclásticas de textura media; y las formaciones El Doctor y El Abra para las facies de plataforma, constituida en el borde por arrecifes de rudistas y calizas bioclásticas olíticas de textura gruesa.



Figura 3.1. a) Cañada próxima a la cueva de los riscos, donde puede verse la composición a base de calizas de la roca madre. b) El río Jalpan a principios de octubre, después de la temporada de lluvias.

Debido a la naturaleza calcárea de la región, así como a la influencia de otros factores de tipo geológico, climático y geográfico, las rocas presentan procesos de disolución, determinando la presencia de distintas formas de relieve kárstico como lo son las dolinas, las simas, las cavernas y los poljés, entre otros (Figura 3.1 a).

3.2.1 Hidrología

El río Jalpan es uno de los principales afluentes de la cuenca del río Tampoán o Taquín que pertenecen a la región Hidrológica del río Pánuco (INEGI., 1986.). (Figura 3.1 b).

3.2.2 Edafología

En cuanto al tipo de suelos al sur de la comunidad de Jalpan de Serra (en Carrizal de los Sánchez), y de acuerdo a la clasificación de la FAO-UNESCO adecuada por el INEGI, se encuentran regosoles, que son suelos jóvenes con capa superficial de color grisáceo oscuro. La textura que presentan es de migajón arcilloso cuando están asociados con fluvisol éutrico de textura fina (al sur del cañón del río Jalpan); son generalmente delgados y cuando son profundos presentan pedregosidad superficial con cantidades altas de calcio, potasio y magnesio. Están asociados con luvisoles, litosoles y rendzinas, con profundidades menores a los 50 cm (INEGI, 1986.).

3.3 Contexto climático

El clima de la región donde se encuentra Jalpan de Serra se ve desde luego determinado por la altitud y geomorfología propia, además de la circulación atmosférica que influencia al centro de México, por lo que es conveniente hacer una revisión general de dicha circulación. Son tres los patrones que mayoritariamente influyen la circulación atmosférica; los vientos Alisios, la Celda Subtropical de Alta Presión y los vientos del Oeste.

En invierno, la Celda Subtropical de Alta Presión trae condiciones secas a la mayor parte del territorio, excepto a Baja California, la cual experimenta una máxima precipitación (Mosiño Alemán y García, 1974). Así, los vientos del Oeste provenientes de latitudes medias pueden extenderse hacia el Sur hasta los 19°N (latitud de la ciudad de México). La elevada altitud de esta parte del país intercepta la parte superior de los vientos del Oeste trayendo condiciones frías y ocasionalmente nevadas en altitudes más altas (Figura 3.2). Ocurre también la entrada de aires fríos polares llamados “nortes”, los cuales están confinados a los márgenes de la costa Este de México por la Sierra Madre Oriental y pueden traer precipitaciones cargadas a las pendientes orientales de las montañas de Chiapas y Oaxaca (Metcalf *et al.*, 2000).

En el verano del Hemisferio norte, la zona intertropical de convergencia (ZITC) se mueve hacia posiciones más al norte. Por otro lado, la Celda Subtropical de Alta Presión durante esta temporada está alrededor de los 35°N. También, durante el verano, los vientos Alisios dominan, trayendo humedad desde el Golfo de México y del Pacífico Este tropical, aumentado por el efecto de los ciclones tropicales, particularmente en septiembre (Figura 3.2) (Mosiño Alemán y García, 1974). Esta reversión estacional en la dirección de los vientos proveniente del Pacífico es denominada “monzón” Mexicano o monzón Norteamericano, y sus efectos se extienden sobre

los estados de Nayarit, Sinaloa, Durango, Sonora, Chihuahua, Arizona, Nuevo México y Colorado [Douglas *et al.*, 1996; Chakraborty y Krishnamurti, 2003]. Los alisios soplan a lo largo del lado sur del Sistema de Alta Presión sobre las Bermudas, creando una corriente de chorro que desplaza aire húmedo desde el Sureste al Noroeste del país [Metcalf *et al.*, 2000]. Las lluvias traídas por este flujo del Este, son aportadas por tormentas convectivas que son impulsadas por el calentamiento sobre la plataforma. En el sur de México, la temporada de lluvias tiene una distribución bi-modal, con un mínimo local de hasta dos meses de duración. Esta disminución en la precipitación, conocida como “canícula” o sequía de verano, es causada por el desarrollo de una depresión de aire alto a través de la costa Este de la Unión Americana, extendiéndose desde Florida hasta Cuba, y que termina por bajar a la península de Yucatán [Magaña *et al.*, 1999].

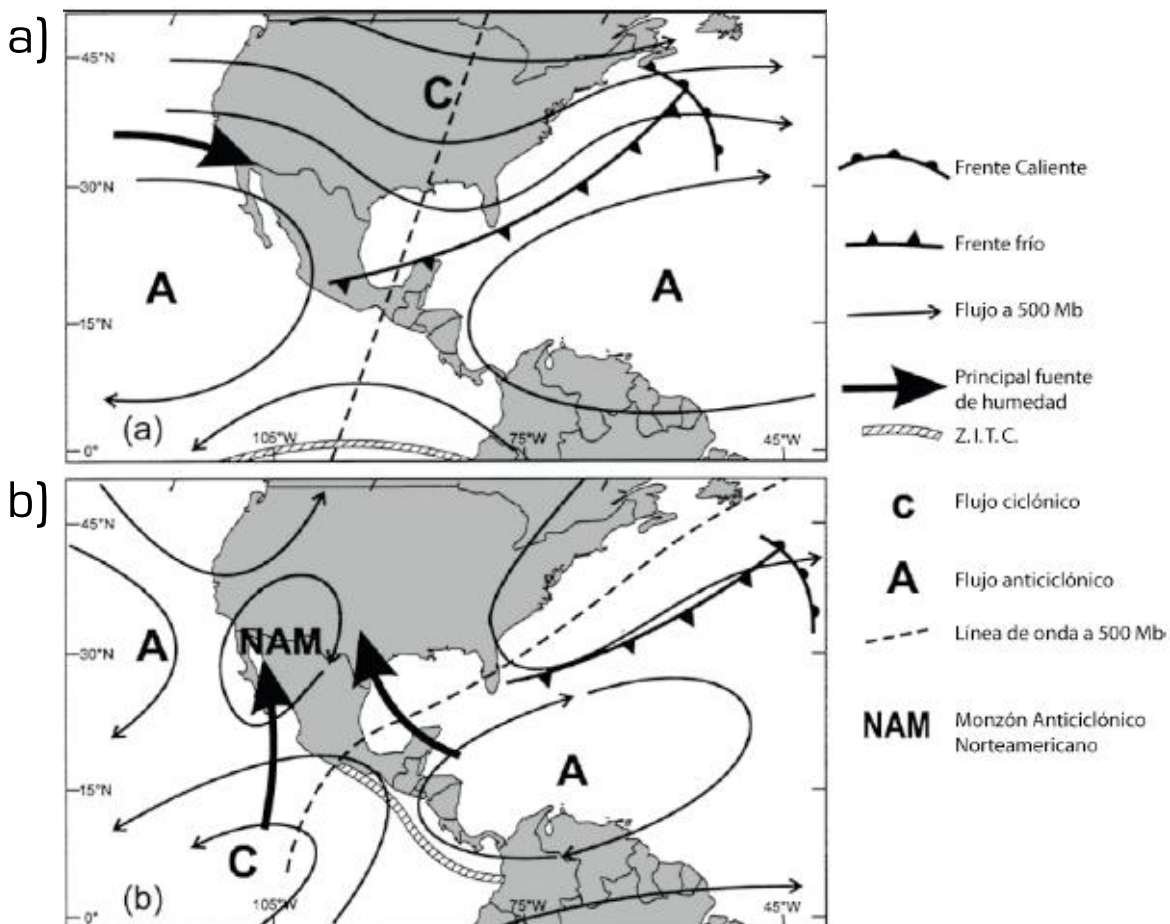


Figura 3.2. Principales características de la actual circulación atmosférica sobre México. (a) Invierno y (b) verano. Modificado por Hernández-Mendiola (2008) de Metcalfe *et al.* (2000).

Los efectos combinados de latitud, topografía y la distribución de tierra y mar, producen un complejo panorama que, en general, acentúa la diferencia en la cantidad de lluvia en las tierras altas del Sur (donde la lluvia generalmente excede los 2000 mm/año) a los desiertos del Norte del interior del territorio y el área alrededor del Norte del Mar de Cortés (Golfo de California) con lluvias menores a los 400 mm/año. Aunado a lo anterior, los efectos de la topografía pueden causar marcadas variaciones locales [Mosiño Alemán y García, 1974].

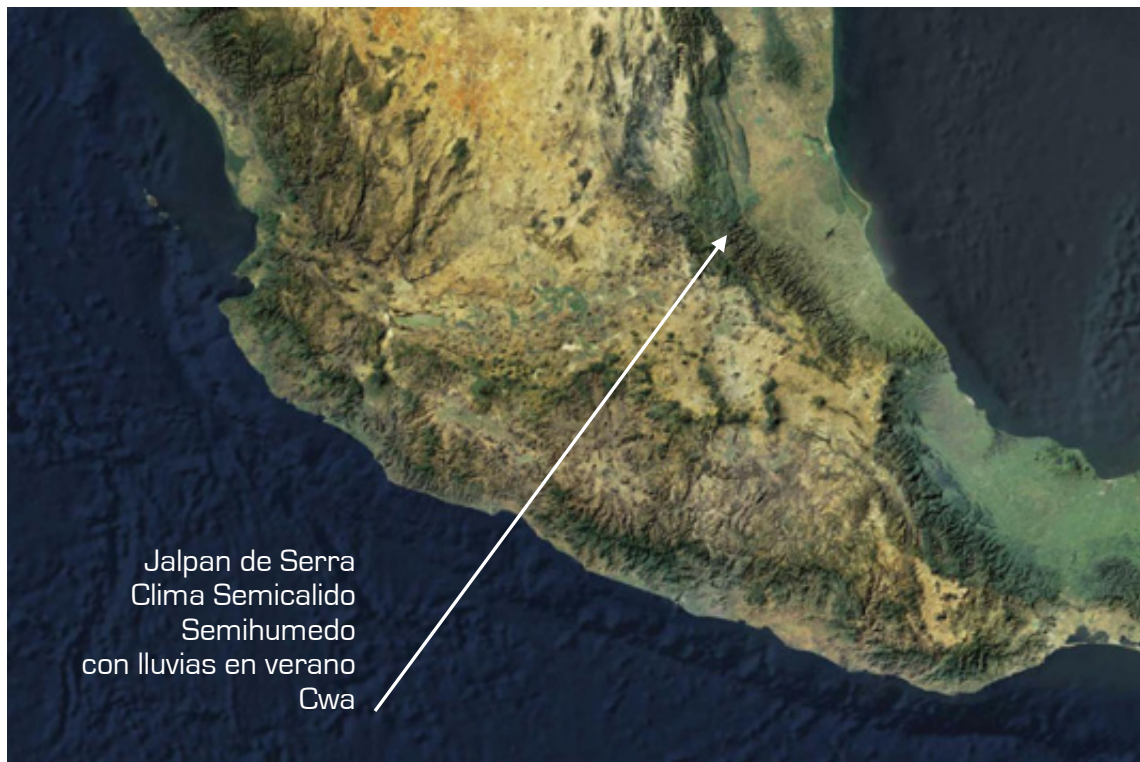


Figura 3.3. Imagen Modis sin nubes del satélite Terra (bandas 1,4,3 (RGB), resolución espacial 250 m etros, so bre un m odelo di gital de t erreno) del centro de Mé xico do nde se ap recia la ubicación de Jalpan de Serra. Nótese como se ubi ca sobr e una región v erde, que indica la presencia de una zona densa de vegetación como lo son los bosques húmedos. Dicha zona existe debido a que se encuentra en la parte Este de la Sierra Madre Oriental donde los flujos húmedos del Golfo de México chocan, cediendo la mayor parte del vapor de agua que acarrear. Tomada de www.conabio.gob.mx/informacion/geo_espanol/doctos/imagenalta_febrero2003.html

De manera que Jalpan, que se encuentra en términos generales, al lado Este de la Sierra Madre Oriental, presenta clima semicálido, semihúmedo con lluvias en verano [Cwa] [García de Miranda y Falcon de Gyves, 1993], con una temperatura media anual de 24.1° C [INEGI, 1986.], una temperatura máxima anual de 32.4 ° C y una temperatura mínima anual de 15.8 ° C [SMN, 2008]. Las temperaturas mínimas se dan en los meses de diciembre y enero, las máximas en abril y mayo [INEGI, 1996]. La precipitación normal anual es de 887.6 mm [SMN, 2008]; el número de días con lluvia apreciable es 61.3, mientras que los días nublados son 79.6. Los vientos dominantes llegan del Norte [CETENAL, 1986].

Es necesario destacar que el Cwa es el clima más seco de los subhúmedos, el que tiene una temperatura media más fría, pues es apenas dos grados superior a 18 °C (que es la temperatura media del planeta), y posee un bajo porcentaje de lluvias invernales, menor al 5%, con verano cálido isotermal.

La Figura 3.4 muestra la Precipitación promedio mensual para los periodos de 1940-2000 registrada en la estación del Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN) en Jalpan. En ella se ve que los meses de mayor precipitación son en verano, con la presencia de la canícula.

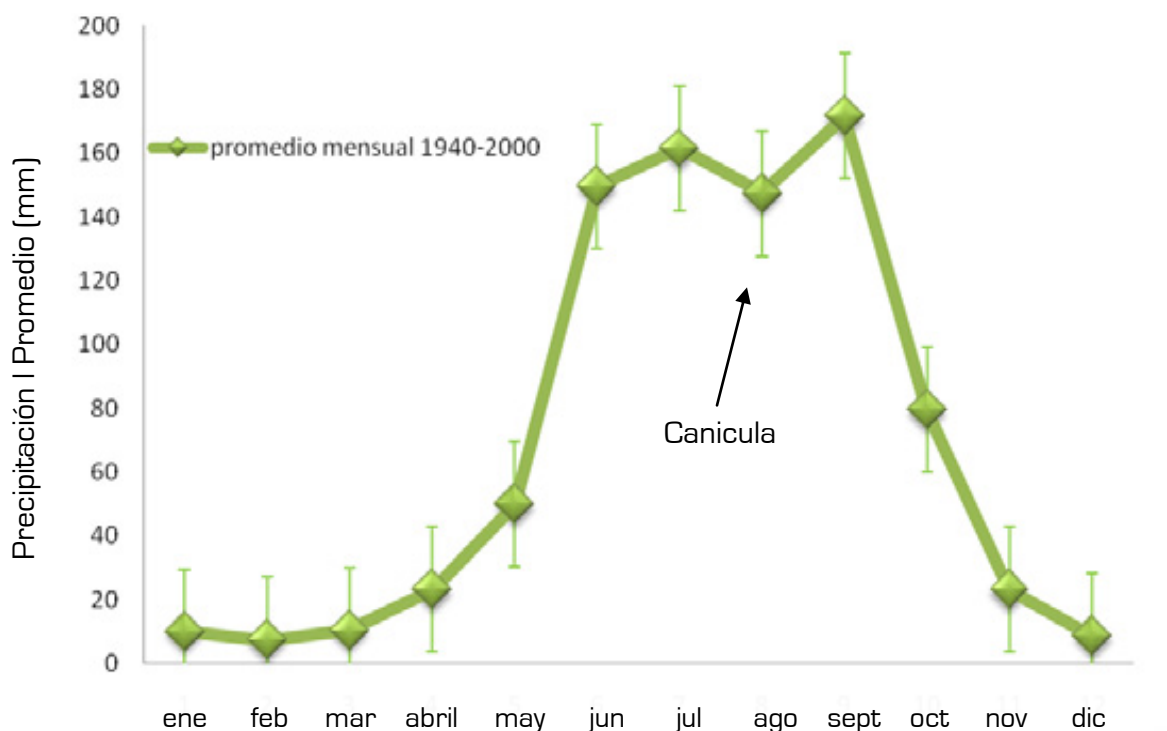


Figura 3.4. Precipitación promedio mensual para los periodos de 1940-1980 registrada de la estación del SMN de México en Jalpan. (Datos, cortesía de la CONAGUA). La flecha indica la presencia de la Canicula alrededor del mes de agosto.

3.4 Zona de recolección

La cueva de los Riscos se encuentra al norte del río Jalpan, a 5 km al sur de la ciudad de Jalpan (Figura 3.5). Posee dos entradas, denotadas A y F, Las coordenadas de la entrada A, son 21° 11' 38" N, y 99° 30' 50". La cueva consta de ocho zonas, incluyendo túneles y galerías (Figura 3.7).

La cueva es principalmente horizontal con una profundidad de 35m y una longitud de 550m (Lazcano, 1986). El criterio para nombrar cada zona está basado en diferentes eventos

topográficos y rasgos de la cueva, como túneles, áreas de colapso, o el cambio de condiciones ambientales [climáticas]. La entrada principal en la zona A está rodeada por vegetación local, en la cual se dispersa la luz del sol hasta 35m de profundidad.

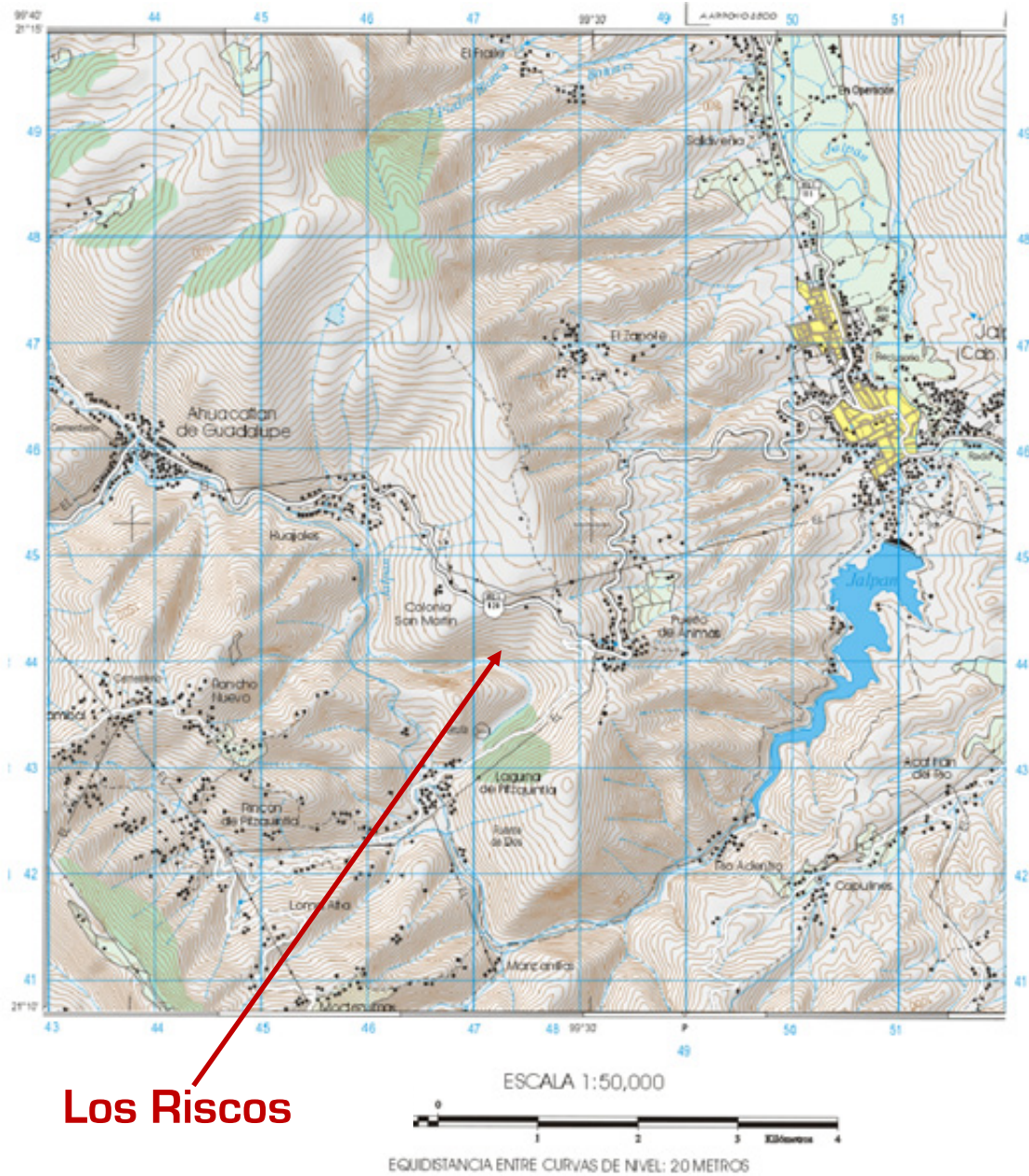


Figura 3.5. Ubicación de la cueva de Los Riscos (21° 11' 38" N, y 99° 30' 50"). Proyección Universal Transversa de Mercator. Cuadrícula UTM a cada 1000 m. Con permiso del INEGI, 2006.

Las otras zonas tienen una menor cantidad de luz, o están totalmente carentes de ella. Las zonas B, C, D y E, representan los transectos más largos, por lo que fueron divididos a su vez en

tramos proximales (cerca de 40 m de profundidad, designados como 1) y distales (cerca de 80 m de profundidad, designados como 2), ya que presentaban diferencias en su humedad, temperatura y luminosidad promedio. La zona B2 representa la cámara superior, la cual está al final de la zona B y está 30 m más arriba que la zona B1 (del Castillo *et al.*, 2009). Debido a que no es del todo turística guarda todavía una gran riqueza en troglóbios y troglófilos, es decir organismos que pasan su vida o parte de su vida en una cueva, respectivamente.



Figura 3.6. Entrada A, a la cueva de los Riscos. Tomada por Pablo Lèautaud.

Los datos medidos del 2006 al 2008 no muestran diferencias significativas entre la temporada seca y la temporada de lluvia para la temperatura y humedad de la cueva (del Castillo *et al.*, 2009). La zona E1, donde se encontró la estalagmita, es la segunda zona con más baja humedad, presentando en la temporada seca 84% de humedad relativa y en la temporada de lluvias 88% de humedad relativa. Mientras que la temperatura es de 19 C y 17 C en la temporada seca y de lluvias respectivamente (del Castillo *et al.*, 2009).

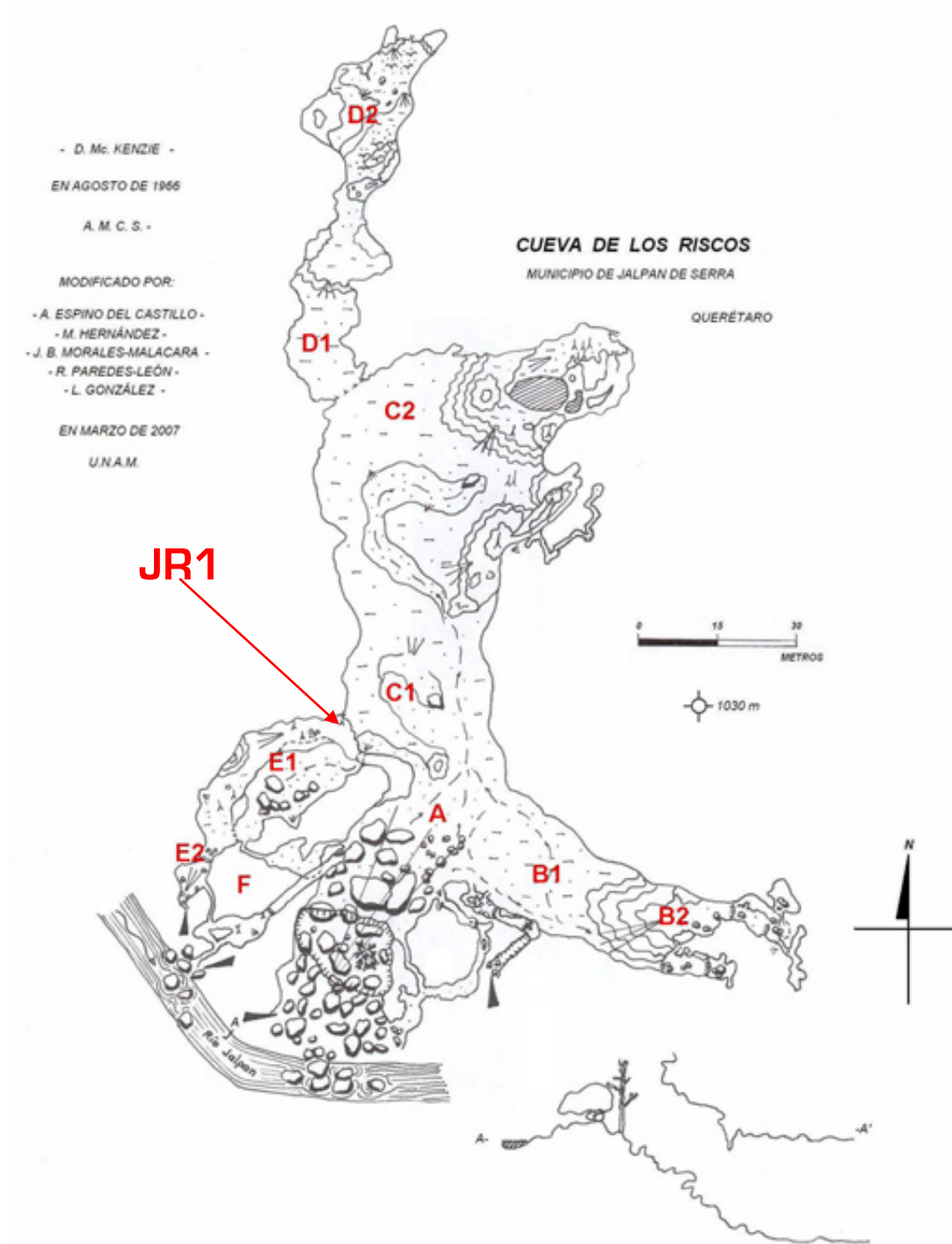


Figura 3.7. Mapa de la cueva de Los Riscos donde se indican las diferentes zonas en que está dividida la cueva, creado por McKenzie en 1966, modificado de Lazcano (1986) por Espino del Castillo, Hernández, Morales Malacara, Paredes-León y González (2007). La flecha roja indica la posición donde se encontraba la estalagmita JR1, la cual estaba cerca del techo en la zona E1.

Capítulo IV

Metodología

„Ich muss durch den Monsun
hinter die Welt bis ans Ende der Zeit
bis kein Regen mehr fällt
gegen den Sturm
am Abgrund entlang
und wenn ich nicht mehr kann denk ich daran
irgendwann laufen wir zusammen
durch den Monsun
dann wird alles gut¹“

Durch den monson. Bill Kaulitz, Dave Roth, Patrick Benzner und David Jost

El presente capítulo describe la metodología que se utilizó en las diferentes fases de esta investigación, con excepción de la metodología de obtención del indicador climático con base a la escala de grises (que se va a implementar y es uno de los objetivos de esta tesis), el cual se describe en el capítulo V y los algoritmos matemáticos de análisis espectral (que en sensu stricto no son parte de la metodología), que se describen en el capítulo VII. A continuación expondremos los pasos que seguimos para la elección de la estalagmita, la asignación de su temporalidad y los métodos geoquímicos utilizados para encontrar información paleoclimática en ella.

4.1 Recolección de la muestra

La recolección de la estalagmita la llevamos a cabo en la cueva de Los Riscos, el primero de octubre del 2006. La estalagmita se ubicaba en la zona E1, en el punto señalado en la Figura 3.7 (capítulo III). Fue encontrada activa creciendo junto a otra y fue designada JR1a (Figura 4.1).

La Figura 4.3 muestra a la estalagmita JR1 al cortarla. A unos cinco metros fue encontrada otra estalagmita, designada JR2 (Figura 4.2). Esta última estalagmita no presentó un bandeo tan bien definido como el de la JR1, por lo que no se trabajó con ella. Esto hace considerar la posición de la estalagmita, la llamada plomería de la cueva, como un factor preponderante en la existencia del bandeo (Figura 4.3).

¹Tengo que atravesar el Monzón. Más allá del mundo, hasta el final del tiempo, hasta que ninguna lluvia derribe más. En contra de la tormenta, pasando el abismo. Y si ya no puedo más, pienso en esto. Eventualmente reiremos juntos, a través del Monzón todo estará bien.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

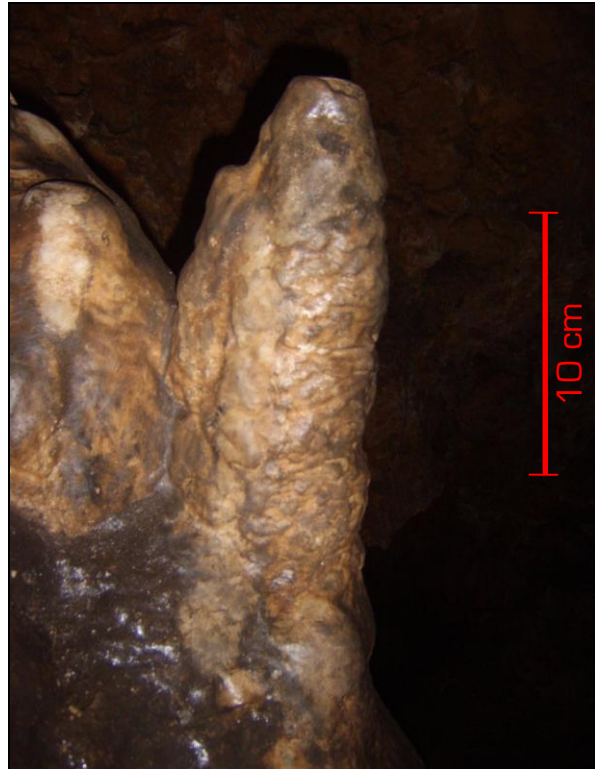


Figura 4.1. La estalagmita activa JR1 momentos antes de ser cortada. Nótese como en realidad son dos espeleotemas que crecieron una junto a la otra.



Figura 4.2. El autor cortando JR2.



Figura 4.3. Toma del segundo túnel de E1, viniendo desde la zona A donde se aprecia al Dr. Bernal al lado de JR1. Nótese la posición de JR1 a menos de dos metros del techo.

4.2 Textura de la muestra

Una vez traída la muestra lo primero que se hace es obtener el corte con el que se va a trabajar. Así primero JR1 fue dividida en las dos estalagmitas que la conformaban JR1a y JR1b. Luego de JR1a se obtiene un corte, de manera que una de sus caras sea prácticamente la mitad de la estalagmita (Figura 4.4). Es esta cara con la que se va a trabajar.

Inicialmente la estalagmita JR1a es sometida a un escrutinio visual donde buscamos evidencias de hiatos o de alteraciones en la cristalografía. Dichas evidencias se verían como sobrecrecimientos, recristalizaciones o discontinuidades en el patrón del bandeo. En este caso no encontramos dichas señales. Sin embargo se notó un cambio en la textura evidenciado por el grosor y un cambio en la dirección de las bandas (Figura 4.4). La Figura 4.4 muestra los puntos a partir de donde se notan estos cambios, los cuales fueron escogidos como puntos para fechar (las brechas de muestreo para el fechamiento en la Figura 4.4). En esta figura se puede ver a simple vista cómo la textura es diferente entre brecha y brecha.

4.3 Análisis Geocronológico

El análisis geocronológico se llevó a cabo utilizando una técnica considerada para el caso de las espeleotemas como de alta precisión, conocida como fechamiento por desequilibrio en la cadena de decaimiento de Uranio (Richards y Dorale, 2003). Así, la estalagmita JR1a fue muestreada en cuatro puntos. Por supuesto un buen fechamiento supone el fechamiento de la base y la punta. Aquí muestreamos la base más no la punta debido a que la cantidad de calcita extraída en ella probablemente no hubiera sido suficiente para el análisis. Además recordemos que estaba activa al momento de ser cortada, por lo que la edad de la punta es tomada como cero. De cada punto extrajimos 250mg de calcita a lo largo de las bandas, en intervalos representativos, (es decir escogidos ante la evidencia de cambios en la textura y designados del 1 al 4, empezando por el más cercano a la base) para su posterior fechamiento. De cada muestra recolectada se tomaron por triplicado 20 mg, a los cuales se les agregó un estándar interno y fueron disueltas. Cada muestra fue analizada previamente en un ICP-MS para conocer el intervalo de concentración. Posteriormente fue fechada bajo el método de desequilibrio en la serie de ^{238}U - ^{230}Th (Ludwig *et al.*, 1992; Richards *et al.*, 1998), bajo la técnica desarrollada por Mortimer *et al.* (2002) para MC-ICPMS en la Earth Environment Research School of Earth Sciences de la Australian National University bajo la supervisión de profesor Malcolm McCulloch.

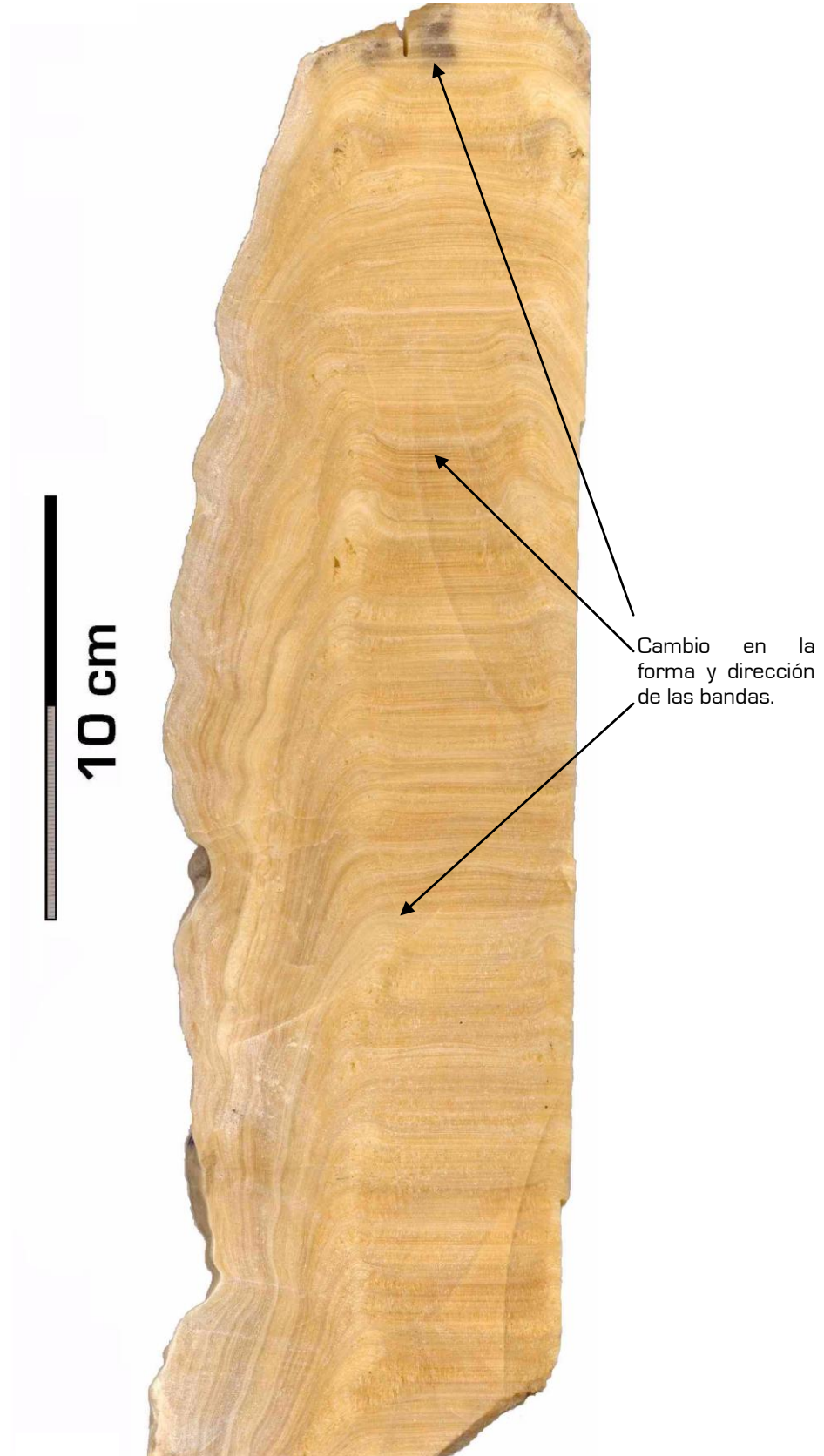


Figura 4.4. Corte paralelo al eje de crecimiento que muestra la cara interna de JR1a.

4.3.1 Preparación de la muestra

A continuación describiremos el tratamiento usado para una muestra recolectada de 20mg. La muestra es transferida a un vial de teflón, se cubre con 5 mL de agua desionizada y es disuelta al añadirse pequeñas cantidades de $[\text{HNO}_3] = 18\text{M}$. Si la muestra es pura, no quedarán residuos sin disolver. En el caso de existir éstos, dado que pueden contener también un porcentaje mínimo de estos isótopos, se disuelven con una mezcla concentrada de HF, HCl y HClO_4 . A las muestras se les añade un estándar interno de ^{229}Th - ^{233}U de concentración y composición isotópica conocida. Se adicionan gotas de HNO_3 concentrado para ser luego secada. La muestra es redisolta en $\text{HNO}_3 = 5\%$ y guardada en un frasco para ser nuevamente pesada.

4.3.2 Método de cálculo

El fechamiento por disequilibrio en la series de Uranio está basado en determinar qué tan cercana o lejana del equilibrio secular se encuentra cierta composición isotópica.

Es decir, a partir de mediciones de disequilibrio en las cadenas de decaimiento, es posible establecer la fecha a partir de la cual se rompieron las condiciones de equilibrio secular, con la ventaja de que no es necesario saber la cantidad inicial del isótopo padre. El cálculo de las edades de cada muestra se realiza empleando la siguiente ecuación de manera iterativa.

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

ó

Ecuación 1

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

Para mayor detalle sobre este método se puede consultar a Casteren y Thomas (2006). Hay que hacer énfasis en que la relación de actividades medidas fue corregida por contribución de material detrítico por una isócrona de dos puntos y usando ^{232}Th como indicador de material alogénico (Ludwig y Paces, 2002). Dicha aproximación asume que la fracción detrítica/alogénica tiene la típica composición de silicato que es $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U} = 3.6 \pm 2$, similar a la de la corteza terrestre (McDonough y Sun, 1995) y $[^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}]$ y $[^{234}\text{U}/^{238}\text{U}] = 1.0 \pm 0.10$ (Ludwig y Paces,

2002). Esta corrección ha sido exitosamente aplicada para fechar carbonatos “sucios”, como aquellos encontrados en ambientes pedogénicos (Ludwig y Paces, 2002; Sharp *et al.*, 2003) y estalagmitas (Cruz *et al.*, 2007). Una comparación reciente del uso de isócronas de dos y tres puntos, así como comparaciones adicionales con cronologías de ^{10}Be , han demostrado recientemente la robustez de dicha corrección. Las incertidumbres sobre la composición del material detrítico son propagadas en un factor cuadrático durante los cálculos de la edad.

4.3.3 Resultados del fechamiento

La Tabla 4.1 muestra la cantidad de ^{238}U y ^{232}Th medidos en cada muestra. Mientras que la Tabla 4.2 muestra las relaciones resultantes del análisis geocronológico sin ninguna corrección.

Tabla 4.1. Concentración de ^{238}U y ^{232}Th medido para el análisis geocronológico.

Muestra	^{238}U (ppb)	$\pm 2\sigma$	^{232}Th (ppb)	$\pm 2\sigma$
RJ1A-1	307.9	0.0004	0.85	0.0010
RJ1A-2	431.6	0.1000	1.87	0.0040
RJ1A-3	332.0	0.1000	3.22	0.0120
RJ1A-4	169.0	0.1000	0.21	0.0006

Tabla 4.2. Relaciones resultantes del análisis por series de U-Th, 2σ corresponde al error asignado a la medición, expresado en dos desviaciones estándar.

Muestra	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	\pm	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	$\pm 2\sigma$	$^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$
RJ1A-1	0.15622	0.007	2.512	0.002	161.000	0.580	1030.598
RJ1A-2	0.1574	0.001	2.608	0.002	110.000	0.600	698.856
RJ1A-3	0.1773	0.002	2.499	0.002	54.000	0.600	304.569
RJ1A-4	0.141	0.001	2.592	0.002	346.000	0.800	2453.901

La Tabla 4.3 muestra las relaciones resultantes del análisis por series de U-Th, a las cuales se les aplicó la corrección por efecto del material detrítico, así como la edad absoluta de las diferentes bandas analizadas. Las edades son congruentes entre sí, ya que muestran una edad más antigua conforme nos acercamos a la base. La edad para la base es de 6.854 ± 0.307 Ka antes del 2006 [Figura 4.5]. Para efectos de cálculo, en esta sección se utilizará esta última referencia.

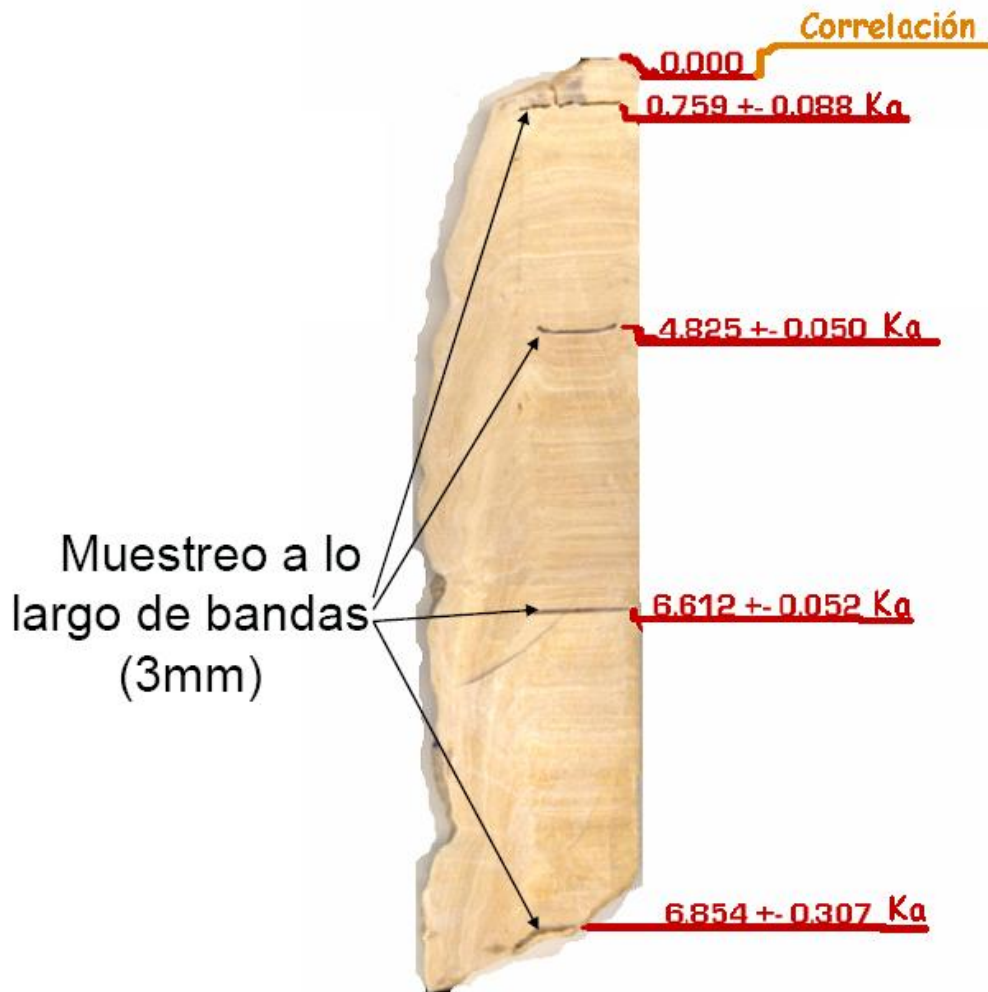


Figura 4.5. Edades asignadas a los diferentes puntos donde se muestreó. Nótese que la edad 0.0 de la punta no es producto del análisis geocronológico, sino del hecho de que estaba activa cuando se recolectó. El muestreo dejó brechas de 3 mm de grosor. A cada punto se le asignó un número ordinario consecutivo conforme a su distancia a la base.

Tabla 4.3. Análisis isotópico de U–Th a las cuáles se les aplicó la corrección por material detrítico, 2σ corresponde al error asignado a la medición, expresado en dos desviaciones estándar (fondo rojo). Las edades asignadas por el método de desequilibrio de series de Uranio (fondo amarillo), están referenciadas al año en que se cortó la estalagmita, que es el 2006.

	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	$(^{234}\text{U}/^{238}\text{U})_0$	$\pm 2\sigma$	r	Edad(Ka)	\pm (Ka)
RJ1A-1	0.154	0.007	2.512	0.002	2.542	0.013	-	6.854	0.307
RJ1A-2	0.155	0.001	2.608	0.002	2.639	0.013	0.638	6.612	0.052
RJ1A-3	0.113	0.001	2.592	0.002	2.614	0.013	0.475	4.825	0.050
RJ1A-4	0.017	0.002	2.499	0.002	2.502	0.012	0.013	0.759	0.088

4.4 Modelo de Edades

En base a las edades obtenidas y creando una relación entre éstas y la distancia (a la base) se pudo construir un modelo de edades. Los puntos ajustan a una ecuación de cuarto grado para los tres últimos puntos. Por ello terminamos creando un modelo con una componente que ajusta a la ecuación de cuarto grado entre estos tres puntos medidos, y una componente lineal entre los dos primeros puntos (Figura 4.6). Cabe señalar que este modelo lo pudimos extrapolar al presente, considerando que la estalagmita estaba en crecimiento al momento de cortarla, teniéndose así, que a la máxima distancia el tiempo, $t = 0$ (Figura 4.6).

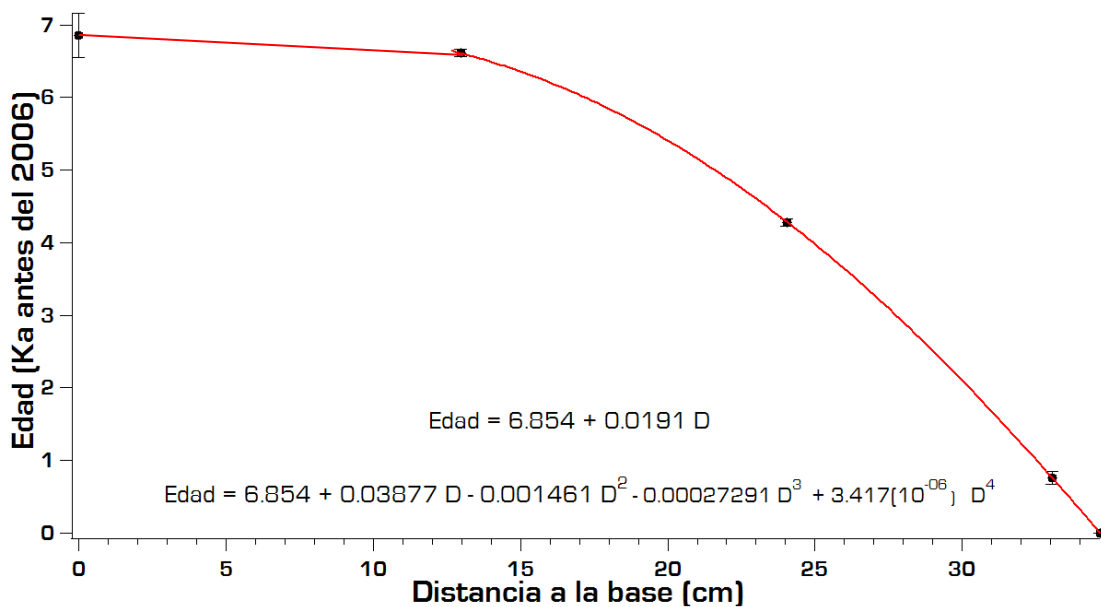


Figura 4.6. Modelo de edades para JR1a con una componente lineal y otra de cuarto grado. Esta última asigna la temporalidad para los puntos producidos durante los últimos 6000 años aproximadamente. Las ecuaciones mostradas indican la edad como función de la distancia para la componente lineal y de cuarto grado.

4.5 Tasa de crecimiento

Aunque los resultados del fechamiento no son propiamente parte de la metodología, era necesario crear el modelo de edades para los pasos subsecuentes (ver capítulo V). De la misma manera, es oportuno al tener dicho modelo, establecer la tasa de crecimiento, la cual nos servirá como referencia en las discusiones posteriores, ya que es en sí misma, un indicador paleoclimático de humedad.

Así, con base en el modelo de edades fue posible reconstruir la tasa de crecimiento, al obtenerse la primera derivada del tiempo en función de la distancia. La Figura 4.7 muestra la tasa de crecimiento en función del tiempo.

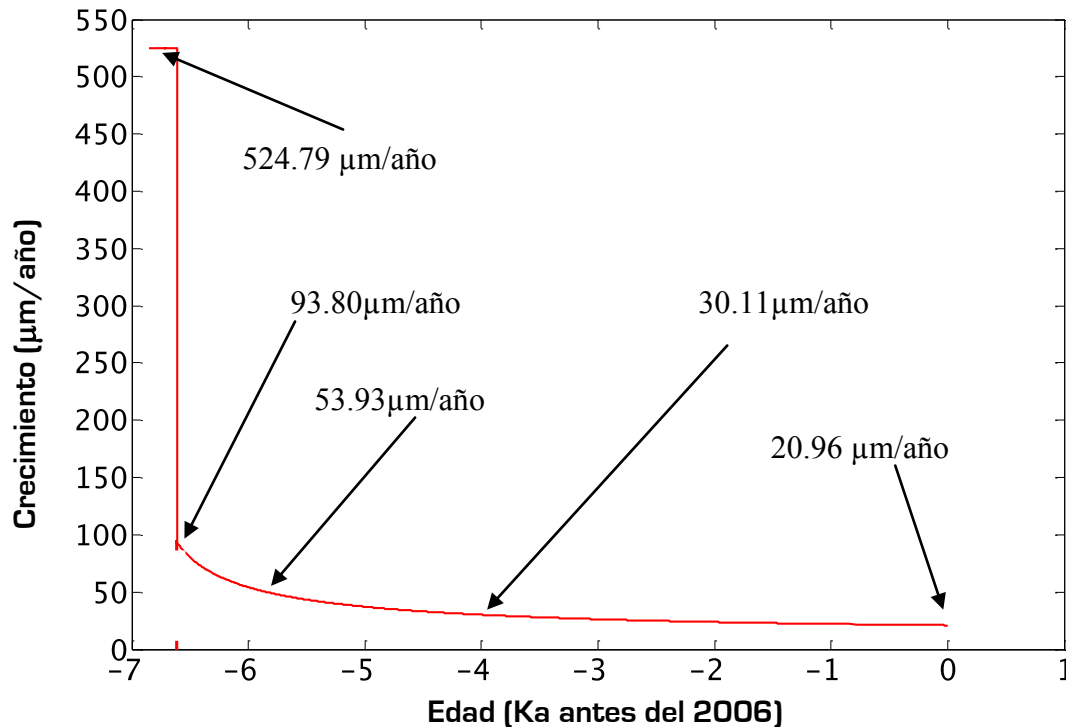


Figura 4.7. Tasa de crecimiento de JR1a.

En la Figura 4.7 se aprecia que la parte que tiene un comportamiento lineal, cuya temporalidad asignada corresponde a la mitad del Holoceno, tiene un crecimiento de $524.79 \mu\text{m/a}$. Mientras que observamos una disminución en la tasa de crecimiento que tiende a ser menos abrupta conforme avanzan los siglos. De esta manera tenemos para el segundo punto del fechamiento (6612 años), una tasa de $93.80 \mu\text{m/a}$, mientras que hace 6000, y 4000 años teníamos $53.90 \mu\text{m/a}$ y $30.11 \mu\text{m/a}$ respectivamente. Para el presente la tasa era de $23.06 \mu\text{m/a}$.

Cabe hacer notar que debido a la gran cantidad de factores físicos y químicos asociados con el crecimiento de la estalagmita (ventilación de la cueva, química del agua, tasa de goteo, conductividad hidráulica de la roca, etc), la tasa de crecimiento de la estalagmita no es rutinariamente utilizada como un indicador de condiciones paleoambientales.

4.6 Análisis multi-elemental por LA-ICP-MS

La estalagmita fue cortada en nueve tramos (Figura 4.8) para el análisis de los elementos Ca, Mg, Sr, Ba, Th, Ti por espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo, LA-ICP-MS.

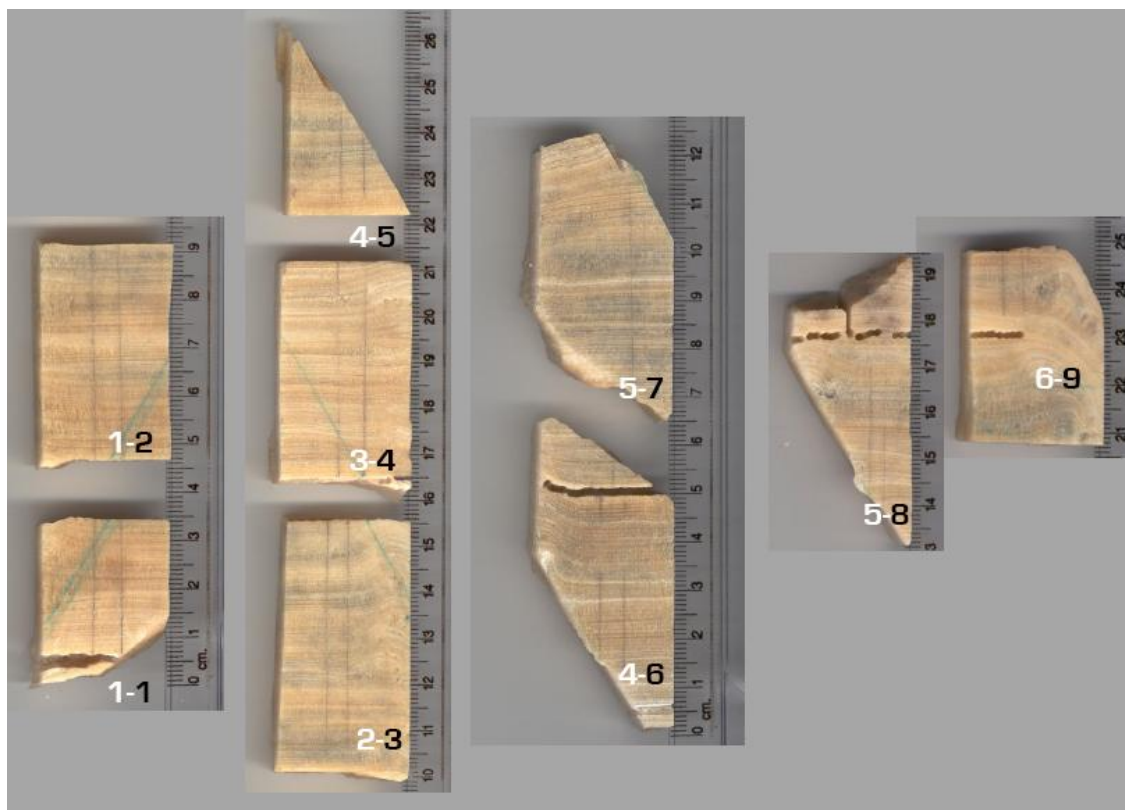


Figura 4.8. Los seis tramos cortados para el análisis por LA-ICP-MS mostrados consecutivamente de la base a la punta, el número en negro indica esta sucesión, mientras que el blanco corresponde al tramo cortado para la serie de tiempo en escala de grises (ver capítulo siguiente). Se pudo apreciar en ellos las marcas en lápiz que denotan la zona de donde se generó la serie de tiempo. Sobre esta misma zona se hizo el análisis químico.

4.6.1 Parámetros instrumentales LA-ICP-MS

El equipo de LA-ICPMS usado, consta de un sistema de ablación láser Lambda-Physik LPX 220 de excímero ArF ($\lambda = 193 \text{ nm}$) acoplado a un ICPMS Thermo X series II cuadrupolo. El tamaño del haz láser utilizado fue de $200 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$, a una frecuencia de disparo de 5 Hz. La muestra fue desplazada a una velocidad de $500 \mu\text{m}/\text{min}$. El láser se mantuvo con un voltaje constante de 22 KV, a energía de salida de 176 mJ, y una fluencia de $8 \text{ J}/\text{cm}^2$.

4.6.2 Metodología del LA-ICP-MS

Cada tramo fue sometido a un proceso de pre-ablación para eliminar posibles contaminaciones superficiales. Dicho proceso fue llevado a cabo a una velocidad de $200 \mu\text{m}/\text{s}$. Ya programados los tiempos de lectura y los trayectos que iba a seguir el haz, tanto en la muestra como en el estándar, (pues en este mismo es mejor no leer sobre una superficie ya ablacionada), el LA-ICP-MS empieza a analizar primero el estándar, luego la muestra y de nuevo el estándar (Figura 4.9). Este procedimiento fue realizado para los nueve tramos.

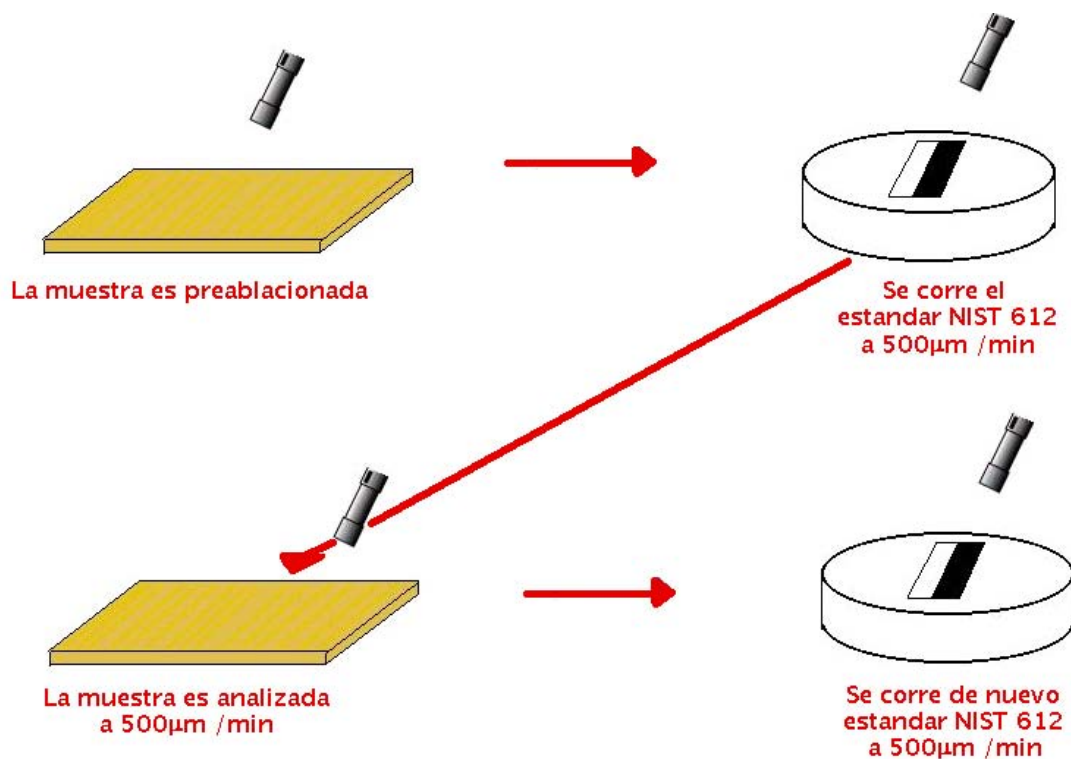


Figura 4.9. Metodología para la lectura en LA-ICP-MS.

Así, el estándar es el NIST612, una matriz de vidrio que contiene varios elementos en cantidades conocidas². El estándar es leído durante 100 segundos, mientras que el tramo promedio de 3.7 cm es leído en 73 minutos. [La Tabla 4.4 muestra el tiempo de barrido para cada tramo].

² <http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/> 3/III/2009 15:55

Tabla 4.4. Tiempo de barrido y distancia recorrida para cada tramo.

muestra	distancia (cm)	tiempo (seg)
tramo6-9	1.6	1,920
tramo5b-8	4.5	5,400
tramo5a-7	4.9	5,880
tramo5a-6	1.2	1,440
tramo4b-6	4.1	4,920
tramo4a-5	2.8	3,360
tramo3 -4	4.8	5,760
tramo2-3	5.4	6,480
tramo1b-2	4.5	5,400
tramo1a-1	2.9	3,473

4.6.3 Método de cálculo

El propósito del análisis por LA-ICP-MS es obtener las relaciones elemento-calcio, las cuales son indicadores paleoclimáticos. Para ello es preciso saber primero la concentración del elemento. Los siguientes pasos tienen este propósito:

- A la señal leída, tanto del tramo como del estándar, se le resta el promedio de la señal de ruido leída antes y después de cada corrida.
- En el estándar NIST612, se obtiene un solo valor para la señal leída de cada elemento, producto del promedio de la señal leída, antes y después de la corrida del tramo analizado.
- Se obtiene en el estándar la relación elemento-calcio $[El/Ca]$, tanto para la señal electrónica leída, $[El/Ca]_{Medido}$ como para las concentraciones conocidas, $[El/Ca]_{Estandar}$.
- Se obtiene el factor de discriminación de masa en el estándar, dado por la ecuación:

$$C = \frac{(El / Ca)_{Estándar}}{(El / Ca)_{Medido}} \quad \text{Ecuación 4.2} \quad (\text{Rosenthal } et al., 1999)$$

- Se obtiene la relación $[El/Ca]_{Medido}$ para la señal electrónica leída en el tramo.
- Utilizando el factor de discriminación y la relación $[El/Ca]_{Medido}$ se obtiene la concentración elemento-calcio en el tramo, $[El/Ca]_{Tramo}$ en base a la ecuación:

$$(El / Ca)_{Tramo} = C(El / Ca)_{Medido} \quad \text{Ecuación 4.3} \quad (\text{Rosenthal } et al., 1999)$$

4.7 Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Los tramos 1a-1 y 1b-1 fueron recubiertos con oro para su posterior análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) en el Laboratorio Universitario de Petrología de la UNAM.. Procedimos entonces a visualizarla en el SEM, buscando señales de bandeo y realizando un análisis semicuantitativo utilizando la microsonda electrónica de barrido JEOL JXA-8900R con dos espectrómetros WDS y sistema EDS. La platina de este equipo (para introducir muestras hasta de 100 mm X 100 mm X 50 mm) permite un área de análisis de 90 mm X 90 mm. Cuenta con cuatro tipos de cristales TAP (5.69 ~93.0 Å), PETJ (1.93 ~ 8.10 Å), LIF (0.889 ~3.73 Å) y LDE2 (23.2 ~ 88.0 Å) que combinados permiten medir concentraciones de elementos en un rango que va del ${}^5\text{B}$ al ${}^{92}\text{U}$. Dicho análisis se llevó a cabo en 10 puntos escogidos en base a la correlación entre los análisis por LA-ICP-MS y la escala de grises. Así mismo una sección de JR1a fue usada para crear una lamina delgada, la cual también fue recubierta por oro para su análisis al microscopio electrónico, al haberse previamente observado al microscopio petrográfico con el fin de escoger los puntos donde el bandeo era claro.

Capítulo V

La serie de tiempo generada a partir de la escala de gris

“The message is a discrete or continuous sequence of measurable events distributed in time – precisely what is called a time series by the statisticians.

The prediction of the future of a message is done by some sort of operator on its past... ”¹

Cybernetics, Introduction. Norbert Wiener

5.1 Presentación de los Tramos

La estalagmita cortada fue dividida en seis partes de longitudes diferentes (Figura 5.1), para la obtención de fotomicrografías. Dos de estas divisiones fueron hechas sobre los puntos del fechamiento, entre los tramos 2-3, y 5-5. Las divisiones entre los tramos 1-2 y 3-4 fueron accidentes cometidos durante el proceso de pulido y observación. La división entre el tramo 4 y 5 es muy cercana al penúltimo punto de fechamiento, sin embargo, producto también de un accidente, está de manera oblicua al eje de crecimiento, mientras que las restantes habían sido perpendiculares. El tramo 6 es la punta.

5.2 Obtención de una superficie lisa

Para obtener la imagen en la escala de grises, fue necesario contar con una superficie lisa con el fin de que las marcas dejadas por el corte no fueran leídas como señales inherentes a la naturaleza de la estalagmita. Para ello, pulimos utilizando un abrasivo de carburo de silicio, hasta dejar una superficie sin las marcas del corte. No procedimos a un grado mayor de abrasión, ya que el carburo de selenio dejaba manchada a la estalagmita. Esto agregaba tonalidades oscuras artificiales al bandeo que obviamente no eran deseables. Con el fin de eliminar las partículas incrustadas, pusimos la estalagmita en un baño ultrasónico, a una temperatura cercana a la del ambiente, por periodos de 1 hora, hasta que las huellas del abrasivo desaparecieran.

¹ El mensaje es una secuencia de eventos cuantificables discretos o continuos distribuidos en el tiempo, precisamente lo que es llamado series de tiempo por los estadígrafos. La predicción del futuro de un mensaje es hecha por algún tipo de operador sobre su pasado.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

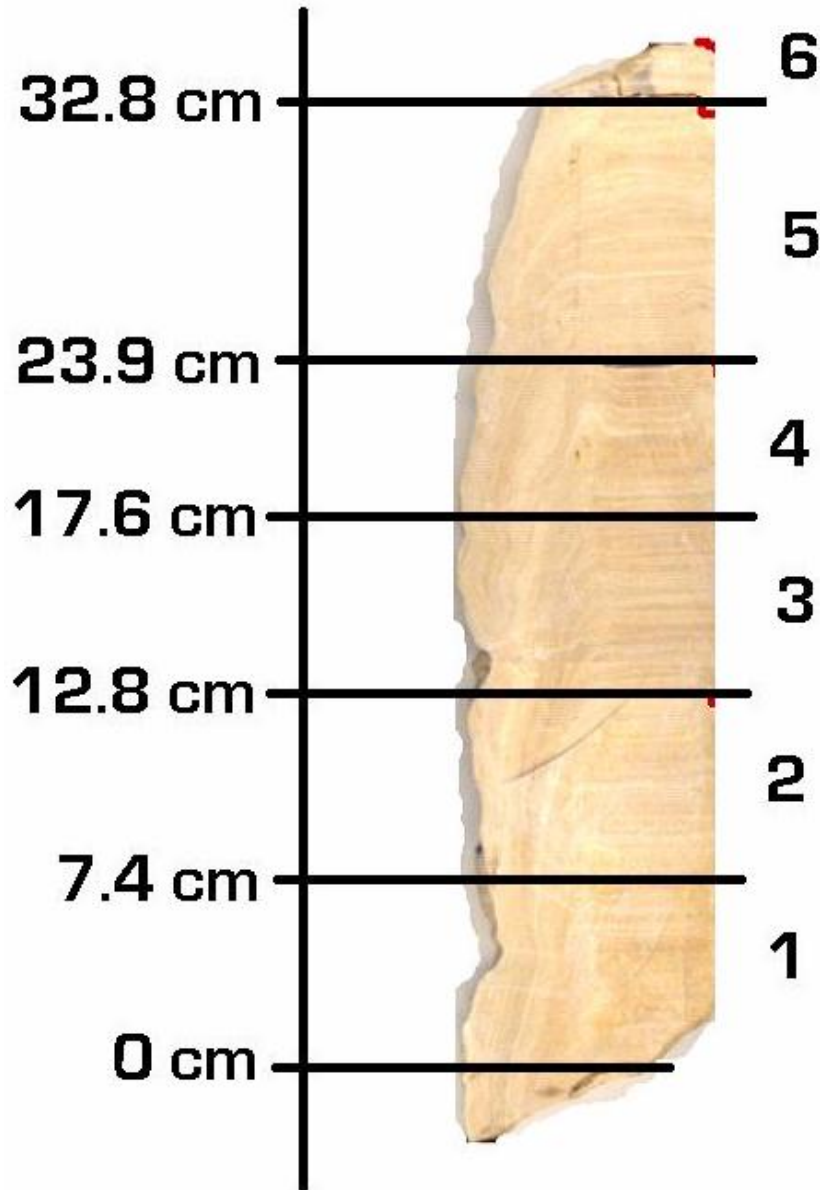


Figura 5.1. Diferentes tramos en que fue dividido JR1a para la creación de la serie de tiempo a partir de escala de grises. Las longitudes de cada tramo son presentadas (Izq.).

5.3 Obtención de la imagen

Los trabajos previos (Pérez Enríquez *et al.*, 2007; Ramírez Izquierdo *et al.*, 2007) habían mostrado que el uso del escáner para obtener una imagen de la estalagmita aun a altas resoluciones (3600 dpi) no daba imágenes lo suficientemente nítidas. Además como se había visto en trabajos previos, una tendencia podía ser generada artificialmente al obtenerse los datos. Esto pasó con la contracara de JR1a al digitalizarse la imagen, pues la superficie no era totalmente plana y no tocaba completamente la superficie del escáner, lo que llevó a que no

fuera iluminada de la misma manera. Con el fin de superar estos puntos decidimos utilizar el microscopio mineralógico. Así, una fuente de luz constante evitó la generación de tendencias artificiales, mientras que el aumento logrado por microscopio nos dio imágenes de mayor resolución.

5.3.1 Toma de Fotomicrografías

Así obtuvimos una secuencia fotográfica para cada tramo a lo largo del eje de crecimiento (Figura 5.2 a). Para fotografiarse fueron elegidas aquellas zonas en cada tramo que presentaban un bandeo continuo y bien definido.

Utilizando una iluminación media constante, fotografiamos con un aumento de 25x en el objetivo, pues a mayor aumento, las propiedades de reflectancia de la calcita, dependientes del ángulo de la fuente de luz, crean una falsa señal, al crearse puntos brillantes (Figura 5.2 b.).

En el caso del tramo 1 y 2, los transectos escogidos para fotografiarse no eran adyacentes, por lo que fue preciso que se juntaran los tramos y se obtuviera una fotomicrografía para cada transecto que contuviera la frontera entre los dos tramos (dicha frontera es casi imperceptible). Así fue posible, al momento de obtener la serie, que estos transectos se superpusieran en la parte que coincidían a pesar de no ser adyacentes.

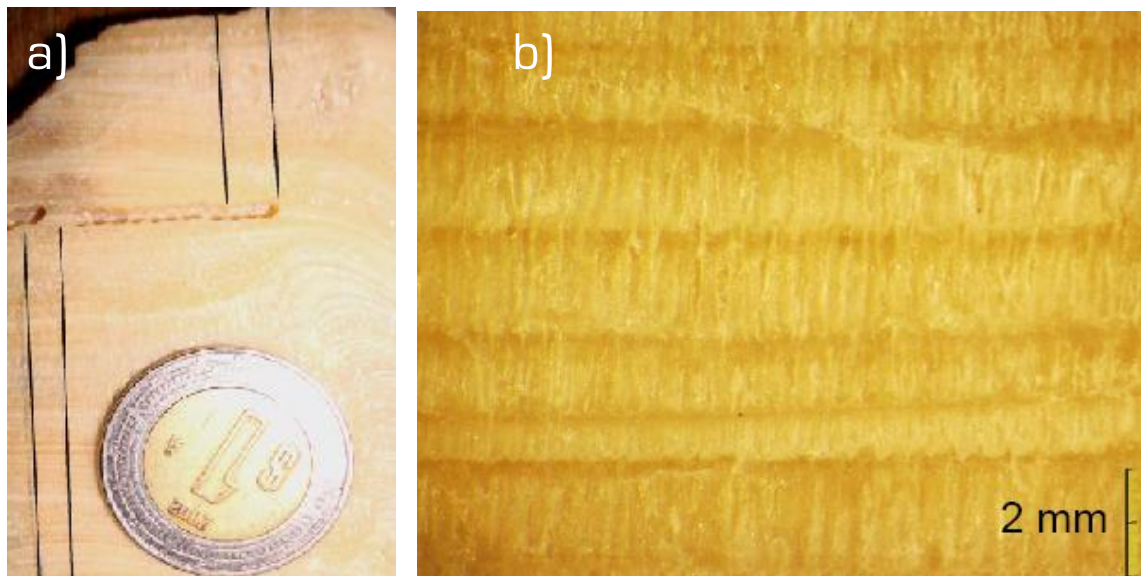


Figura 5.2. a) La foto muestra la zona 5 y 6 comprendida por las rayas paralelas en negro, a lo largo de las cuales fueron tomadas las fotomicrografías. b) Se muestra un ejemplo de las fotomicrografías obtenidas con la cámara conectada al microscopio.

5.3.2 Manejo en el procesador de imágenes y conversión a escala de grises

Las fotos resultantes fueron unidas con un procesador de imagen (ArcSoft Photostudio 2000™), sobreponiéndose al 100%. De esta manera obtuvimos una sola imagen para cada zona (Figura 5.3 a). Hay que hacer énfasis en que las imágenes son a color. Así, cada imagen fue leída en un programa matemático (Matlab©), y convertida en una imagen en escala de grises (Figura 5.3 b)

5.4 Obtención de la serie de tiempo

La lectura en Matlab© de la imagen en el formato de la escala de grises genera una matriz, cuyos elementos fueron iguales al número de píxeles. Dicha matriz tan sólo tiene que ser declarada en un formato numérico para ser leída (Figura 5.3 c).

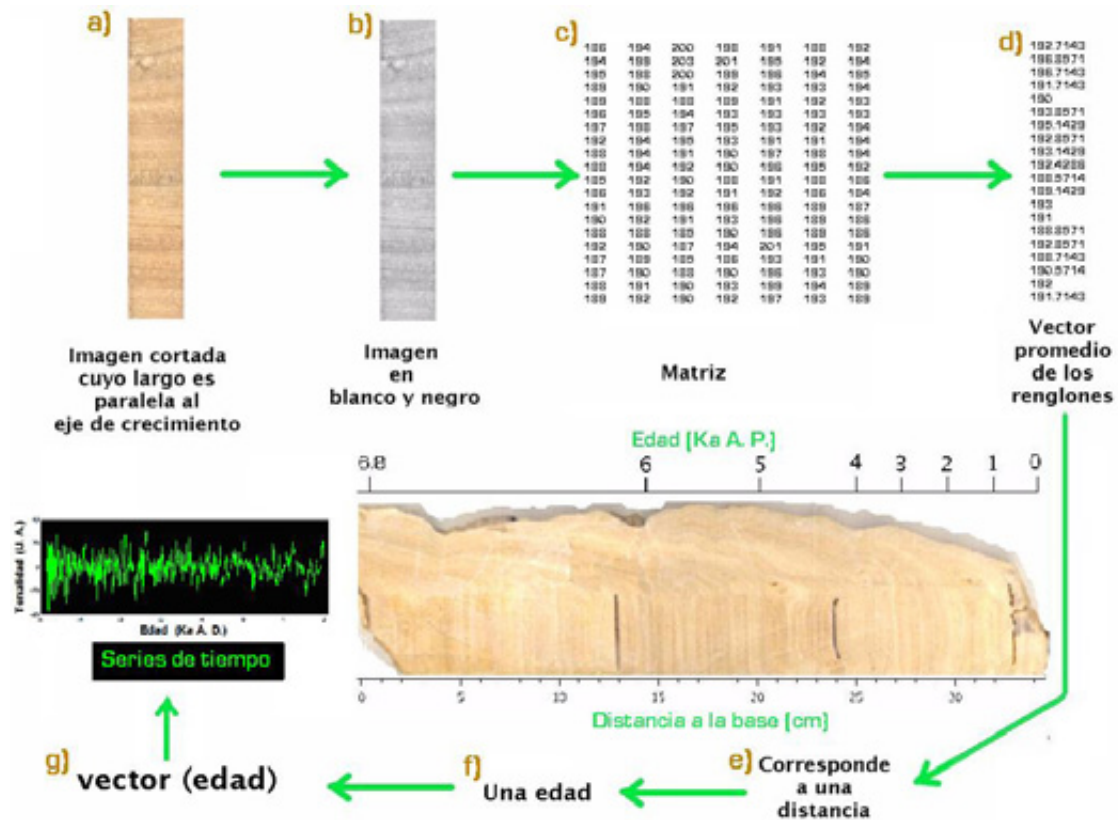


Figura 5.3. Esquema que explica la generación de la serie de tiempo a partir de la imagen a color de la estalagmita JR1a. a) La imagen es resultado de a superposición de fotomicrografías obtenidas con el microscopio mineralógico a lo argo del eje de crecimiento. b) La imagen es convertida a escala de grises. c) La imagen es procesada como una matriz de $r \times l$ elementos. d) Se obtiene una matriz columna a partir del promedio de todos los elementos pertenecientes a un mismo renglón. Este vector contiene entonces los tonos promedio. e) A cada elemento del nuevo vector generado le es asignado una distancia. f) Con base al modelo de edades se asigna a cada elemento una temporalidad. g) El vector es ahora una relación matemática de la edad, propiamente una serie temporal o serie de tiempo.

5.4.1 Obtención del vector

La serie de tiempo es un vector generado del promedio de todas las columnas para cada renglón, en otras palabras es un vector generado del promedio de diferentes intensidades (de cada píxel) para una misma temporalidad (Figura 5.3 d). La idea de hacer esto, fue en primera instancia buscar un dato que fuera más representativo de la variación de la señal, así como la disminución del ruido. La conveniencia de esto es clara en la figura 5.4, donde entre los 24 y 25 cm, se aprecia una ranura de color negro producida por el rompimiento de la estalagmita. Sin embargo, dado que esta ranura está en posición oblicua al eje de crecimiento, al promediarse las intensidades, la señal artificial producida por esta ranura no es significativa. Completamente contrario es el caso, cuando la ranura es perpendicular al eje del crecimiento, por eso en las zonas de las brechas producidas para muestreo de calcita para fechamiento, no se tienen datos para la serie de tiempo.

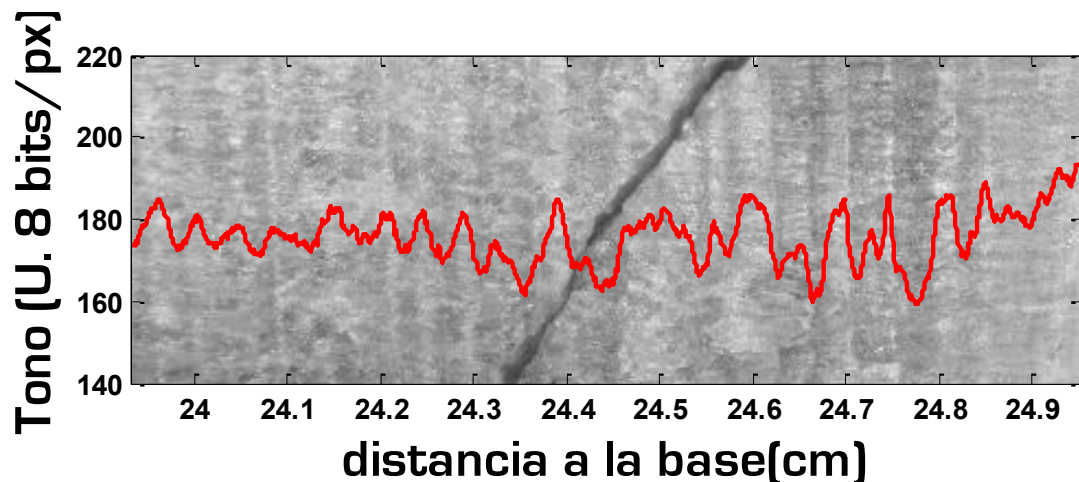


Figura 5.4. Ranura accidental hecha durante el proceso de pulido. Nótese cómo al ser oblicua al eje del crecimiento, su tono gris oscuro prácticamente no afecta el valor promedio de los tonos a partir de los cuales se genera la serie de tiempo. Por eso en la serie seguimos viendo un mínimo local cuando tenemos un tono oscuro y un máximo local cuando tenemos un tono claro.

Ya que también habíamos tomado la imagen de la escala del microscopio, pudimos definir, por el número de píxeles de ésta, la equivalencia entre píxel y distancia. En nuestro caso un píxel equivale a 4.082 μm . De manera que pudimos asignar la distancia de cada punto de la imagen a la base. Conforme al modelo de edades [Capítulo 4, apartado 4.3] y la distancia desde la base, se construyó la serie de tiempo, que corresponde a la última mitad del Holoceno.

Para tomar un marco de referencia más universal para el Holoceno, utilizaremos el año astronómico de numeración, también llamado calendario juliano proléptico, C. J. P., el cual aun

que está basado en el calendario juliano y gregoriano, establece la existencia del año cero (que no existe en dichos calendarios), lo que implica un desfase de los años anteriores a Cristo; así el primer año antes de Cristo corresponde al año cero, el 2 a. C. corresponde al año -1 , el 3 a. C. a -2 y en general n a. C. a $-n + 1$ C. J. P., (hay que hacer énfasis que el desfase es un orden de magnitud menor a la incertidumbre del fechamiento usado). Mientras que los años de la era cristiana, A. D. (Anno Domini) quedan igual. De manera que en adelante utilizaremos la referencia C. J. P. para los años anteriores a la era cristiana e indistintamente usaremos año C. J. P., A. D. o año d. C, para los años de la era cristiana.

5.4.2 Creación de la serie de tiempo (dominio de distancia, dominio de tiempo)

La Figura 5.5 muestra los tramos 1 y 2 respectivamente, correspondientes a la parte lineal del modelo de edades, muestran la correlación entre la serie de tiempo generada y las tonalidades en escala de grises de la imagen. Se aprecia, que se tienen máximos y mínimos, según la existencia de zonas claras y oscuras, respectivamente. Recordemos que las señales claras corresponden a calcita más pura, y las señales oscuras a calcita menos pura.

Retomaremos este punto en el siguiente capítulo, al discutir los factores que confieren el tono a la calcita en la estalagmita, así como su significado en la reconstrucción de paleoclimas. Esto es un resultado contrario al obtenido por Webster *et al.* (2007), el cual decía que en la señal de reflectancia (es decir la de la escala de grises), no había diferencia entre la calcita translúcida clara y la calcita rica en material pardo detrítico. Tal diferencia puede ser explicada por la diferencia en la resolución de la imagen y la textura de la estalagmita usada. Cabe señalar que en el trabajo de Webster *et al.* (2007) no se define claramente que entienden los autores por calcita translúcida.

Dado que el modelo de edades en los tramos 3, 4, 5 y 6 no es lineal, para mostrar la correlación entre la señal generada y las tonalidades en escala de grises de la imagen, se presenta la primera en función de la distancia (Figura 5.5a, 5.7a y 5.8a), con sus correspondientes series de tiempo (Figura 5.5b, 5, 7b y 5.8b). De nuevo podemos ver en la correlación que los máximos corresponden a tonalidades claras en oposición a los mínimos que corresponde a señales oscuras.

Cabe señalar que el tramo 5 (Figura 5.8) es el que abarca un mayor número de años, más de tres milenios, un intervalo igual a la mitad de la edad de toda la estalagmita.

La serie de tiempo generada a partir de la escala de gris

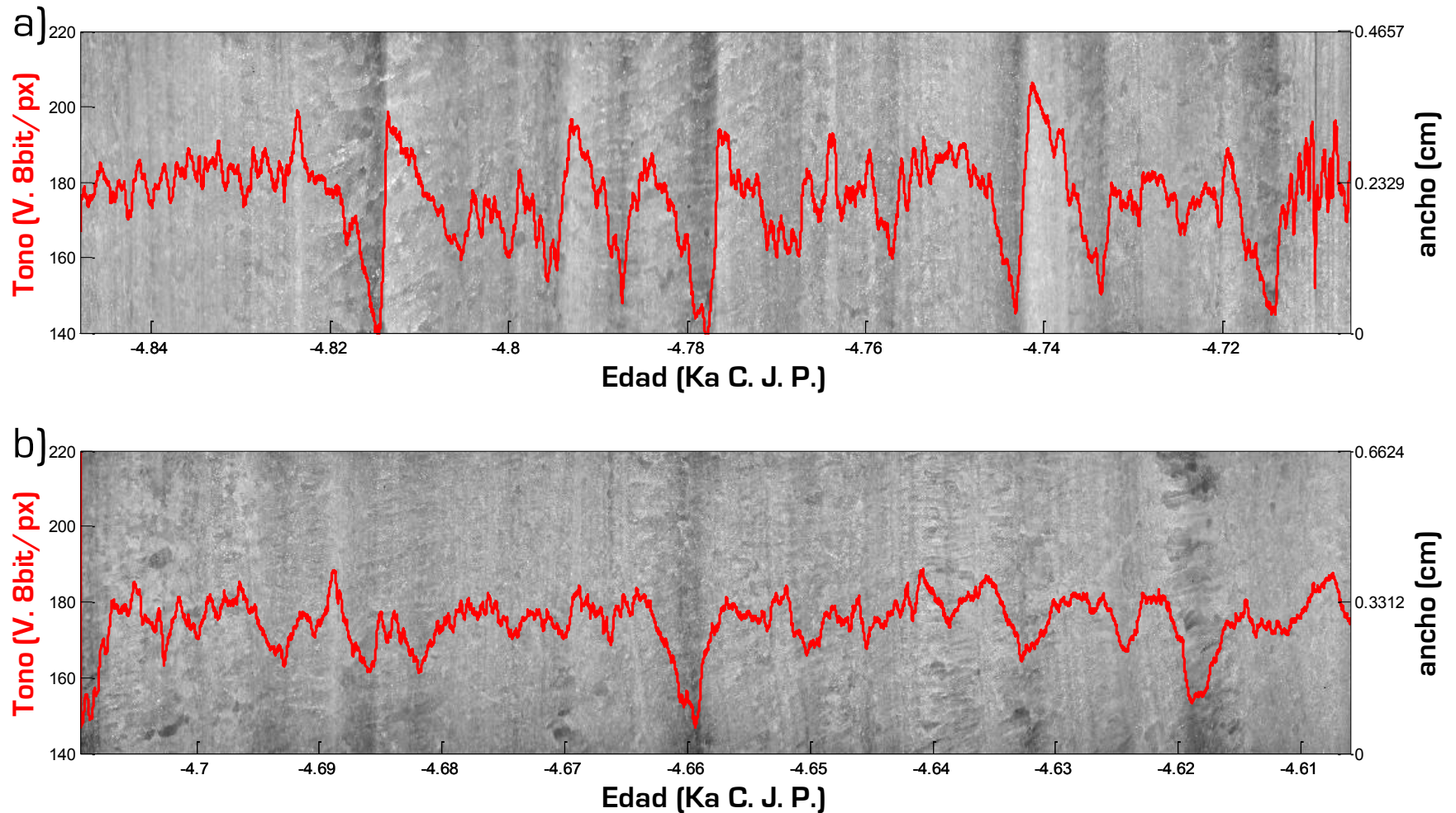


Figura 5.5. a) Serie de tiempo a partir de la escala de grises para el Tramo1. b) Serie temporal para el tramo 2; nótese la correlación entre los máximos y mínimos de la serie y las tonalidades claras y oscuras respectivamente. Las unidades del tono de la escala de grises están dadas en “unidades de 8 bits/pyxel o unidades de byte/pixel”, pues cada número de la escala que va de 0 a 255 es guardado en un byte por pixel (ver apartado 2.6.3). En ambos casos el eje de la derecha muestra el ancho de la sección fotografiada.

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

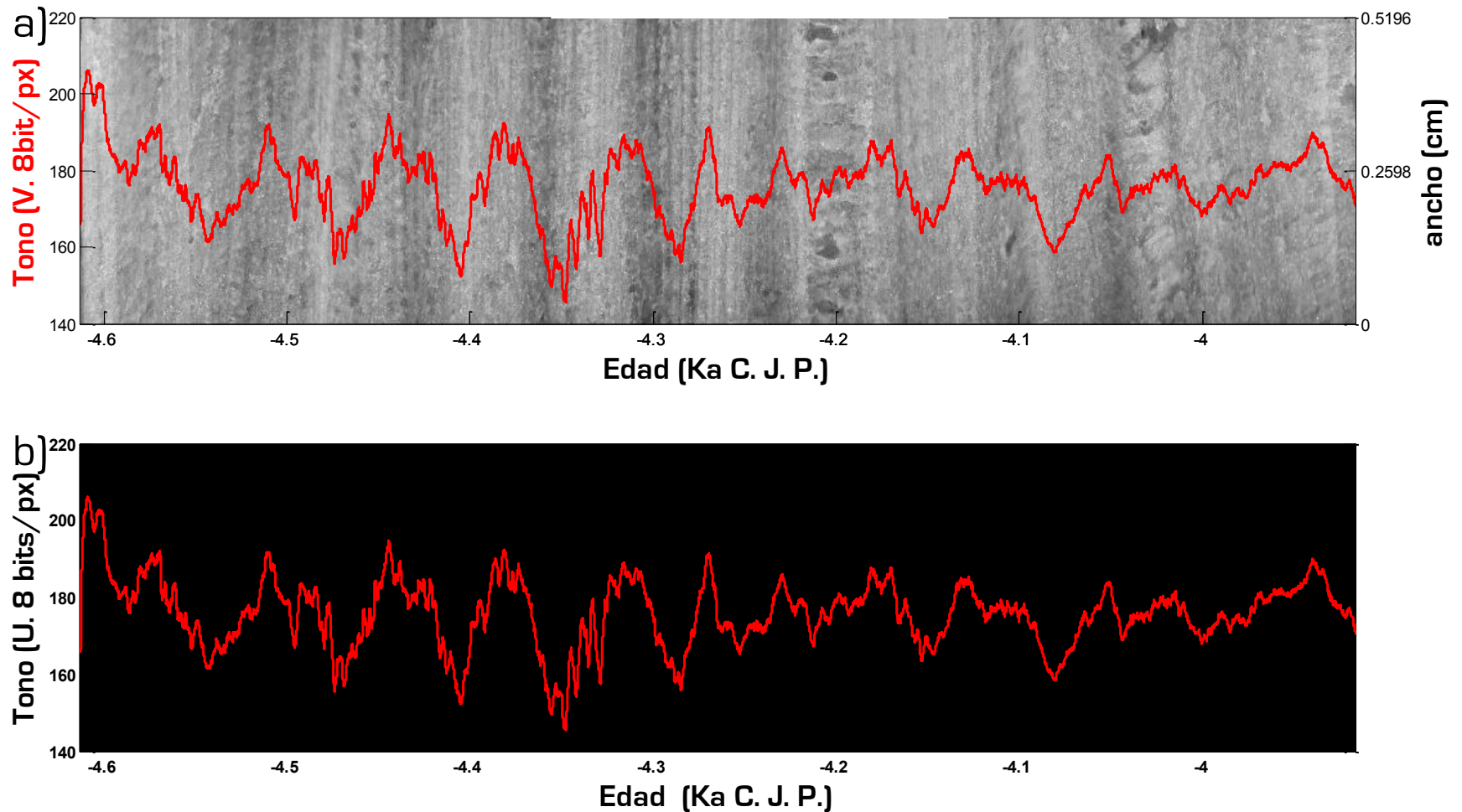


Figura 5.6. Tramo 3. a) Correlación entre el arreglo de intensidades como función de la distancia y la imagen en escala de grises. El eje de la derecha muestra el ancho de la sección fotografiada. b) Serie temporal para el tramo 3. El modelo de edades que aplica para este tramo es la ecuación de cuarto grado (capítulo 4), por ello es de notar la diferencia en estructura que existe al pasar la serie del dominio de distancia (sup.) al dominio temporal (inf.).

La serie de tiempo generada a partir de la escala de gris

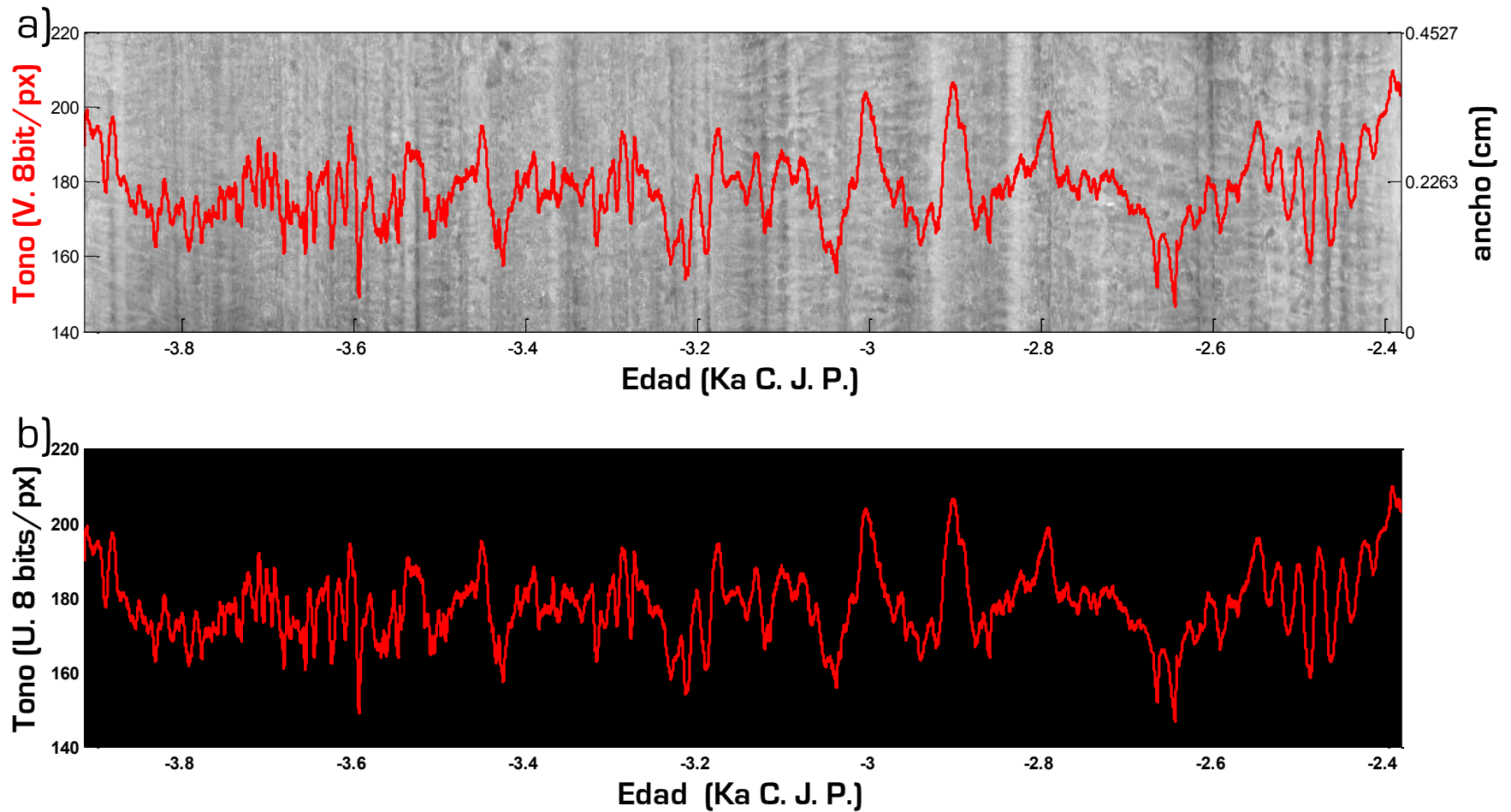


Figura 5.7. Tramo 4. a) Correlación entre el arreglo de intensidades como función de la distancia y la imagen en la escala de grises. El eje de la derecha muestra el ancho de la sección fotografiada. b) Serie de tiempo para el tramo 4. El modelo de edades que aplica para este tramo es la ecuación de cuarto grado (capítulo 4).

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

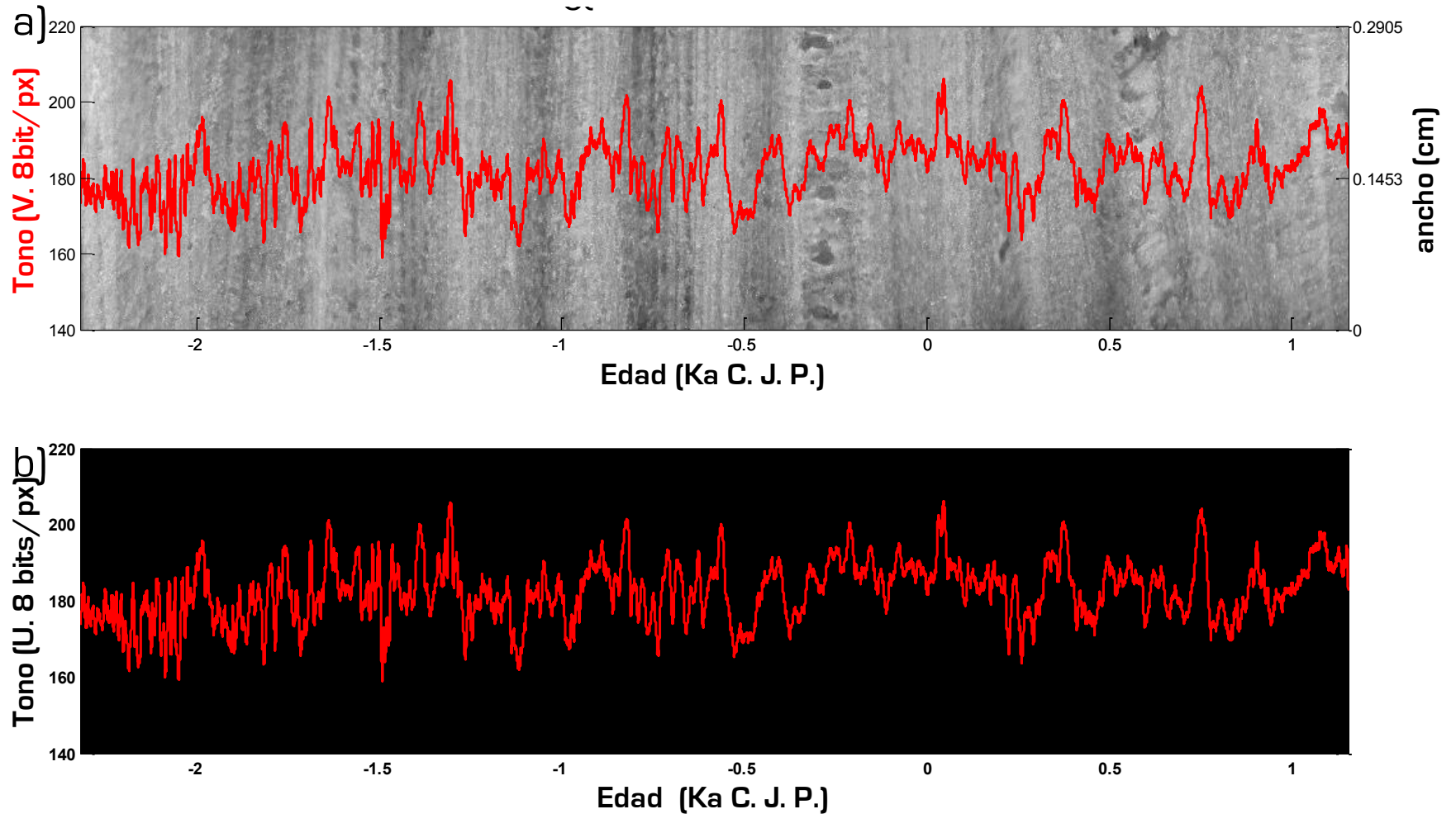


Figura 5.8. Tramo 5. a) Correlación entre el arreglo de intensidades como función de la distancia y la imagen en la escala de grises. El eje de la derecha muestra el ancho de la sección fotografiada. b) Serie de tiempo para el tramo 5. El modelo de edades que aplica para este tramo es la ecuación de cuarto grado (capítulo 4).

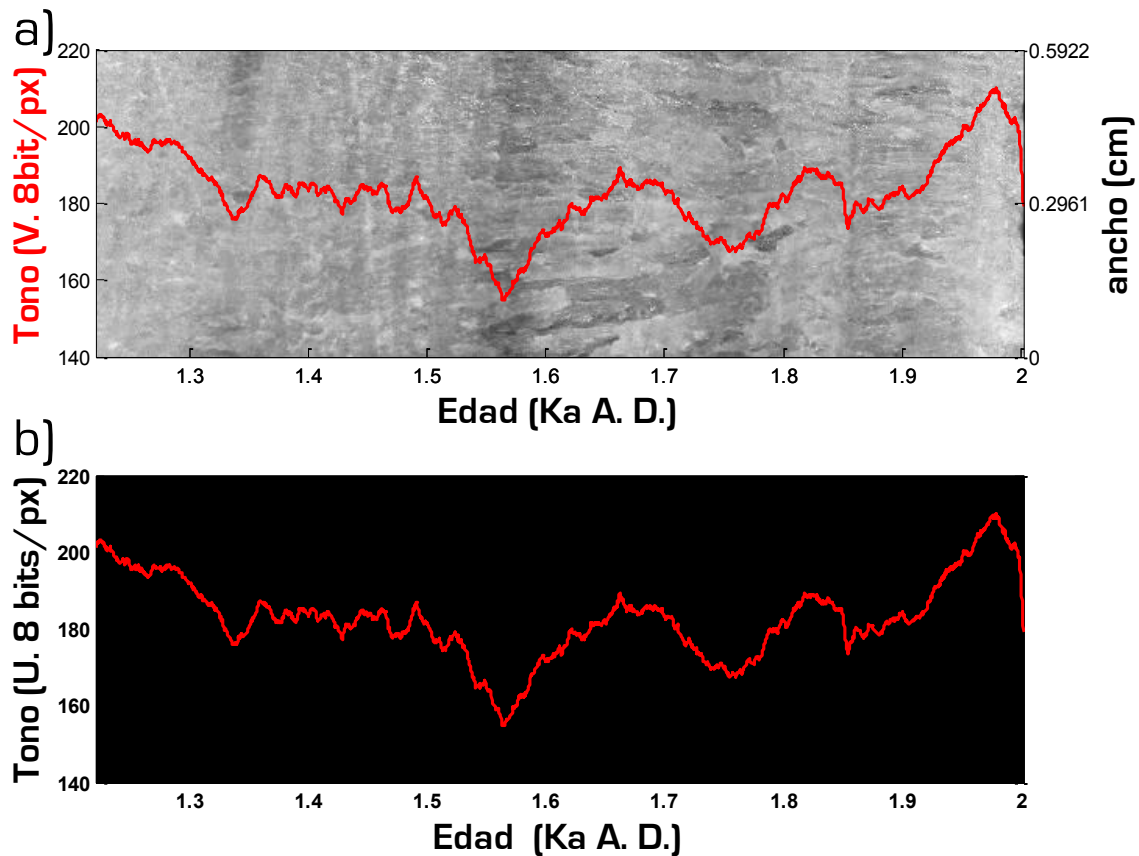


Figura 5.9. Punta. a) Correlación entre el arreglo de intensidades como función de la distancia y la imagen en la escala de grises. El eje de la derecha muestra el ancho de la sección fotografiada. b) Serie de tiempo para la punta. El modelo de edades que aplica para este tramo es la ecuación de cuarto grado (capítulo 4). Sin embargo la distancia que cubre es tan corta (1.5 cm) que bien podría haberse aplicado un modelo lineal, por eso no hay una diferencia en la estructura de la serie al cambiar del dominio de distancia (arriba) al dominio de tiempo (abajo). b) Serie de tiempo para la punta.

5.5 Análisis de la tendencia

El propósito de este análisis es conocer, primero, si existe una tendencia y segundo, si esta crece o decrece. En nuestro caso la tendencia es, en sí misma, otro indicador paleoambiental. La existencia de una tendencia general en la serie de tiempo muchas veces puede ser observada a simple vista.

Para saber estadísticamente si existe una tendencia y considerando la naturaleza de las series de tiempo se hace una prueba no paramétrica, conocida como prueba de Kendall. Dicha prueba correlaciona el número de datos contra los datos de la serie, en este caso la intensidad de tonos [aunque también podría correlacionarse la edad contra la intensidad] (Legendre y Legendre). La

idea es simple, habrá una tendencia si los valores de la serie temporal muestran ser más elevados o más bajos conforme avanza la serie de tiempo. Partimos entonces de una hipótesis nula, H_0 , que supone una $\tau = 0$, (donde τ es el homólogo del coeficiente de correlación en una prueba paramétrica, con un nivel de significancia de notado P_{val}), que implica la inexistencia de la tendencia, y una hipótesis alternativa, H_A , que supone $\tau \neq 0$, que acepta su existencia. Los resultados de la prueba de Kendall arrojaron para nuestra serie de tiempo una $\tau = 0.1922$, con un nivel de significancia, $P_{val} \ll 0.05$, lo que indica la existencia de una tendencia. Así, procedemos a realizar una regresión, que nos arrojará la tendencia (Figura 5.10). Podríamos elegir la regresión utilizando un modelo polinomial, sin embargo, por simplicidad utilizamos una regresión lineal.

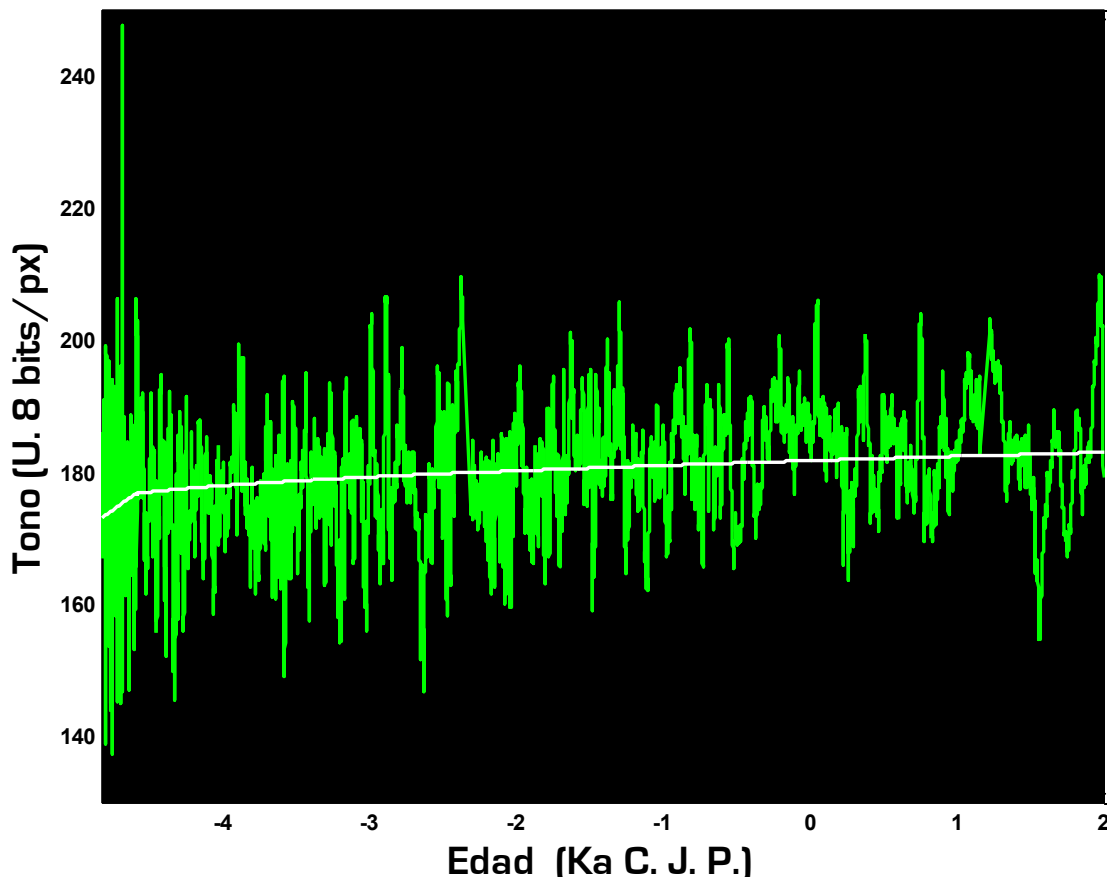


Figura 5. 10. Serie de tiempo de J R1a a par tir de la escala de grises (verde), donde se muestra la tendencia general que presenta, la cual fue obtenida aplicándose un modelo lineal.

Para los análisis posteriores que se harán de la serie de tiempo es necesario eliminar la tendencia, ya que al ser una componente de la serie de tiempo, puede ser interpretada como una ciclicidad (en nuestro caso una ciclicidad climática), al verse como una señal en el

periodograma, el análisis espectral, el espectro de potencias, etc. (Trauth, 2007). En muchas ocasiones la tendencia puede ser eliminada con la aplicación de una ventana de una cantidad apreciable de elementos. En nuestro caso, preferimos eliminarla al restarle a la serie de tiempo la regresión lineal, quedando sólo los llamados residuales de ésta. Estos últimos serán ahora nuestra serie de tiempo, con los cuales trabajaremos para mejorar la señal.

5.6 Conteo de bandas

El conteo de bandas en las estalagmitas es utilizado como método cronológico, con base en la idea de que cada banda se desarrolla durante un año, como resultado de las diferencias entre verano e invierno, que hacen variar el tipo de materiales percolados en el Karst. Así la frontera entre banda y banda corresponde al cambio hacia una tonalidad más oscura, la cual pensamos en primera instancia, sería el producto de la precipitación de calcita con material detrítico, el cual es menos denso y por ende tiende a mantenerse a flote preferentemente en las aguas cálidas del verano.

Inicialmente teníamos como uno de nuestros propósitos utilizar la serie de tiempo generada a partir de la imagen de la estalagmita en escala de grises para realizar un conteo digital de las bandas (Ramírez Izquierdo *et al.*, 2007). El término digital implica la idea de que se está haciendo un cálculo sobre una serie de valores discretos y cuantificables (ya que son finitos).

5.6.1 Método de conteo

El conteo digital de bandas es un algoritmo que se aplica sobre la serie de tiempo (Figura 5.11a), que consiste en contar los cambios de pendiente. Para ello, es obtenida la primera derivada del vector que contiene las intensidades de la escala de grises de la serie de tiempo (Figura 5.11b) Este nuevo vector es convertido a un vector de unos, ceros y unos negativos,

Se les asignó estos valores si el número original era mayor, igual o menor a cero, respectivamente (Figura 5.11c). Luego todos los valores menores a cero son transformados a este número (Figura 5.11d). Después es obtenida la derivada de este vector, cuyos valores diferentes de cero indican la existencia de un cambio de pendiente (Figura 5.11e). Como penúltimo paso los valores negativos son convertidos a cero, (también podríamos haber convertido los valores positivos dejando los negativos), de manera que nos quedamos sólo con las pendientes positivas, las cuales también indican el número de máximos o mínimos locales

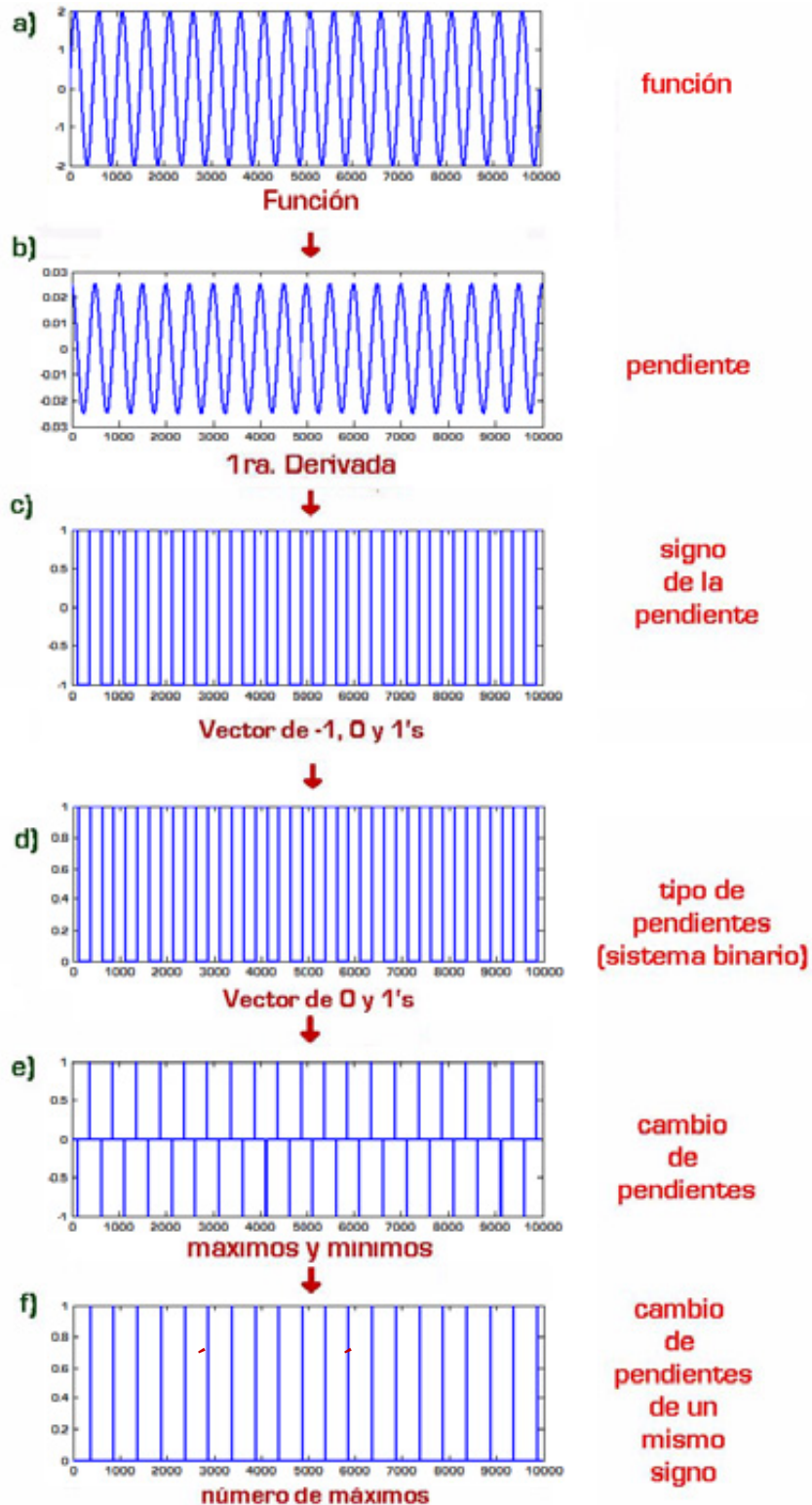


Figura 5.11. Algoritmo para el conteo de bandas en base al número de pendientes positivas. Para la fácil visualización del funcionamiento de este algoritmo, mostramos su aplicación a la función de onda $f = 2 \sin(2\pi t/5)$ para el intervalo de $0 < t < 100$; de manera que se pueden ver cada uno de los pasos claramente. En el último se aprecia que sólo los máximos de la función original tienen valores correspondientes a 1 a unidad, (todos los demás valores fueron igualados a cero), de manera que pueden ser sumados para obtener el número de ellos.

(Figura 5.11f). Luego son sumados todos los elementos del vector, con el fin de obtener el número de cambios de pendiente positiva existentes, este es el número de bandas.

Hay que hacer énfasis en que el número de cambios de pendiente corresponde al número de bandas, porque la frontera entre bandas es más oscura, de manera que el cambio de tonalidad clara a oscura y luego a clara, implica la existencia de dos cambios de pendiente en una banda. La del cambio hacia una pendiente negativa y la del cambio hacia una positiva, por lo que sólo contamos una. Con el fin de verificar la exactitud del algoritmo propuesto utilizamos la imagen al microscopio para realizar visualmente cuatro veces el conteo de bandas sobre el tramo 3, cuya temporalidad asignada va de 5.61 ± 0.050 Ka a 5.92 ± 0.050 Ka A. P. (el presente es el 2006).

5.6.2 Resultado del conteo de bandas

El promedio del conteo de bandas para la zona 3 es de 825 bandas. Este número es congruente con las 697 bandas esperadas con base en el fechamiento, bajo la hipótesis de que cada banda es generada anualmente. Sin embargo el análisis digital da un número con un orden de magnitud mayor, 5198 seudobandas. Lo mismo pasa para los tramos 1 y 2, [Tabla 5.1]. Esto se explica dada la mayor resolución para estas zonas, al tener una tasa de crecimiento mucho mayor, por lo cual debe haber mayor cantidad de ruido.

Tabla 5.1. Comparación entre los diferentes conteos realizados.

Tramos	Conteo digital	Años según fechamiento	Conteo visual
1	5898	142	
2	5309	103	
3	5198	697	825
4	2404	1533	
5	3066	3476	
Punta	820	721	701

La congruencia, entre el conteo digital, y el número de años conocido por fechamiento es mayor para el tramo 5 y 6, si bien ahora el problema es que para el quinto tramo el número de bandas es menor al esperado.

En los tramos 1, 2 y 3 donde la resolución temporal es mayor que el resto de la estalagmita, se tiene mayor cantidad de información climática, incluyendo la variabilidad sub-anual (como lo son las variaciones estacionales) y estocástica, los cuales se reflejan en la serie de tiempo también como cambios de pendiente.

De esta manera, es necesario contar con un criterio cuantitativo para decidir qué cambio de pendiente o qué máximo o mínimo local corresponde a una banda y cuál no. No existen criterios realmente buenos para hacer esto, aunque algunos de carácter estadístico, que toman en cuenta la tasa de crecimiento han sido establecidos por otros autores (Smith *et al.*, 2009),

Finalmente, decidimos utilizar el conteo de bandas como criterio para filtrar. De manera que ahora podemos filtrar la señal, hasta que el número de cambios de pendiente positiva o negativa iguale al número de años arrojado por el fechamiento. Así la eliminación de que es ruido y que no, deja de ser arbitraria.

5.7 Filtrado de la serie de tiempo

El algoritmo desarrollado para el conteo de bandas fue la base para poder filtrar. En este caso utilizamos un filtro de ventana de 3 elementos. De manera que se aplicó este filtro iterativamente, hasta que el número de máximos locales contados presentes en la serie fuera igual al número de bandas declarado, que a su vez es igual al número de años arrojado por el fechamiento (Figura 5.12). Dicho procedimiento fue hecho para cada uno de los seis tramos, cuidando que los máximos o mínimos locales estuvieran a intervalos de un año.

La serie de tiempo generada a partir de la escala de gris

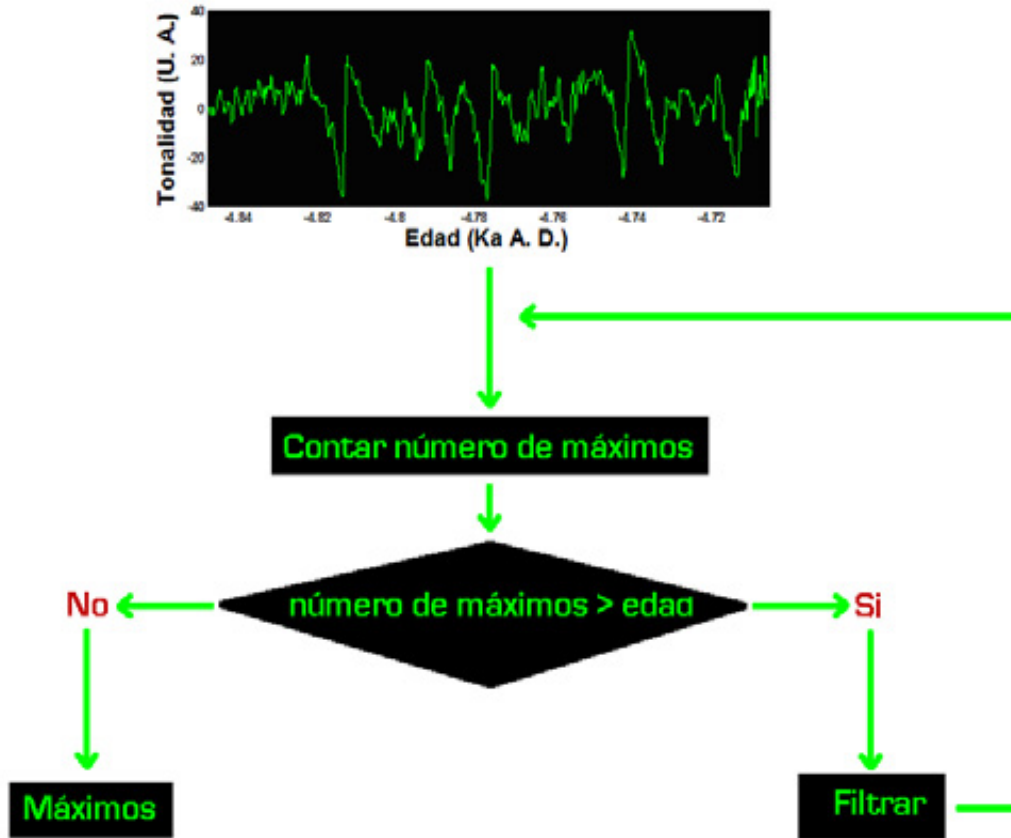


Figura 5. 12. Esquema que muestra el proceso iterativo de filtrado en base al conteo de máximos locales en la serie de tiempo.

Las figuras 5.13-5.19, muestran la serie de tiempo original [negro] y filtrada [rojo] para los tramos 1 a 6 respectivamente.

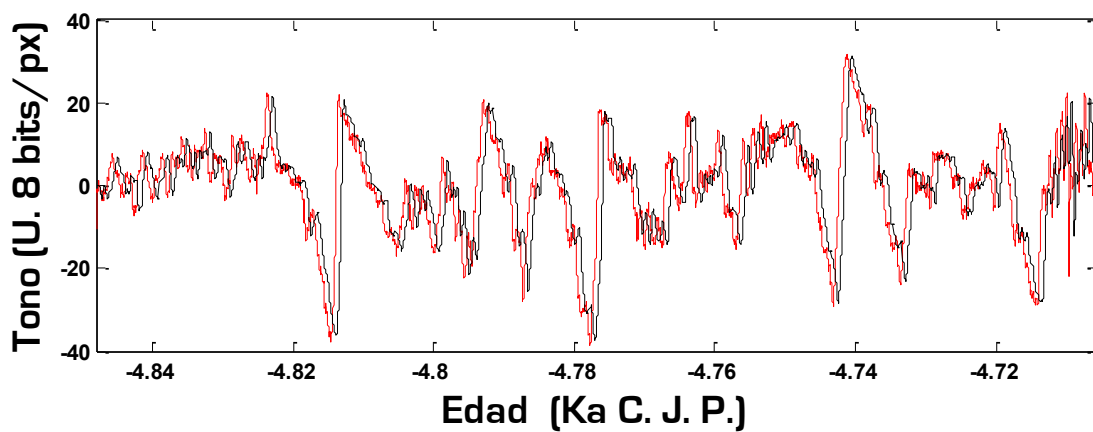


Figura 5.13. Comparación entre la serie de tiempo filtrada (negro) y la original (rojo) para la escala de grises del Tramo 1.

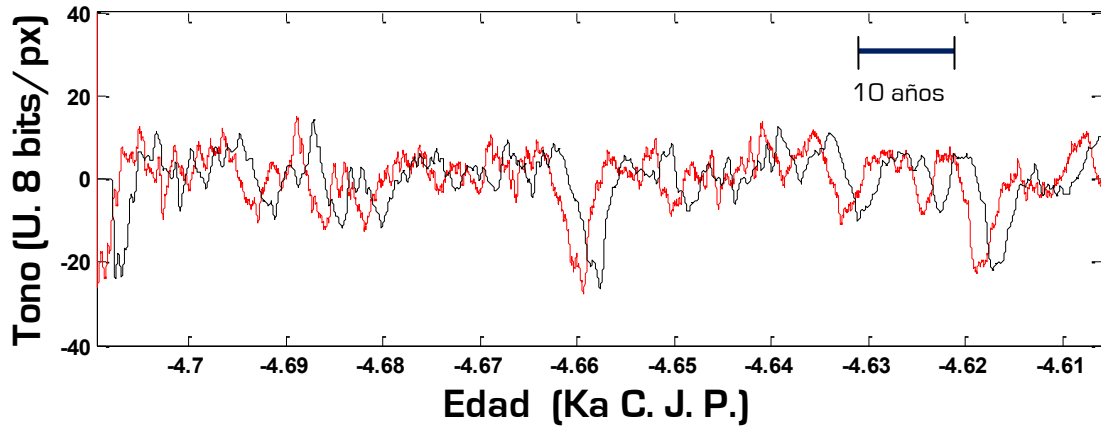


Figura 5.14. Comparación entre la serie de tiempo filtrada (negro) y la original (rojo) para la escala de grises del Tramo 2.

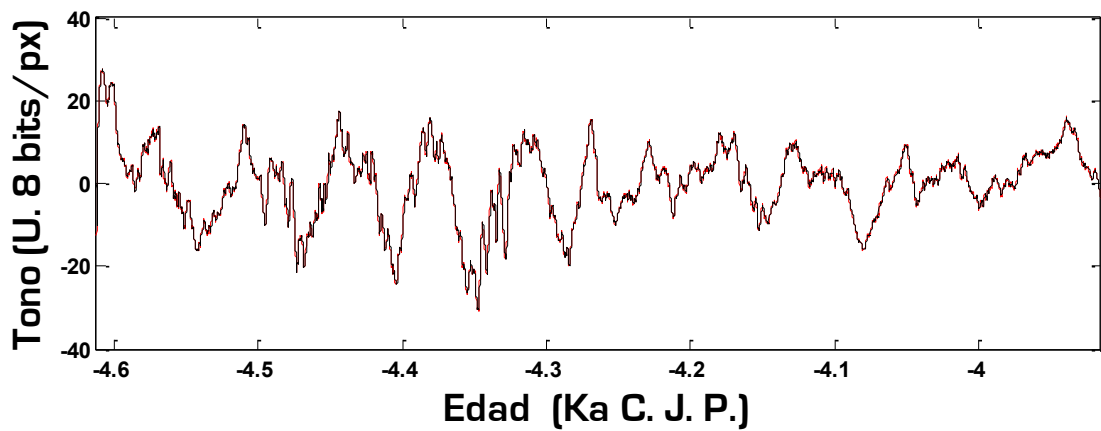


Figura 5.15. Comparación entre la serie de tiempo filtrada (negro) y la original (rojo) para la escala de grises del Tramo 3.

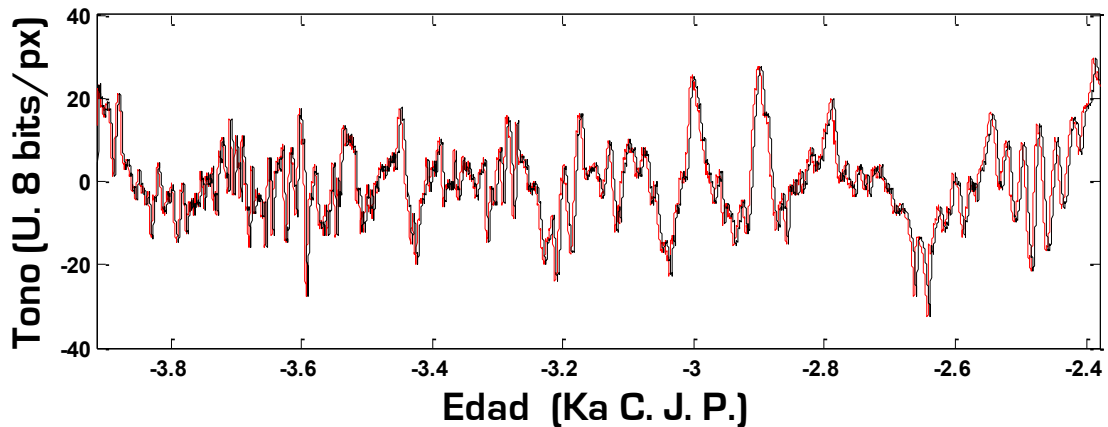


Figura 5.16. Comparación entre la serie de tiempo filtrada (negro) y la original (rojo) para la escala de grises del Tramo 4.

La serie de tiempo generada a partir de la escala de gris

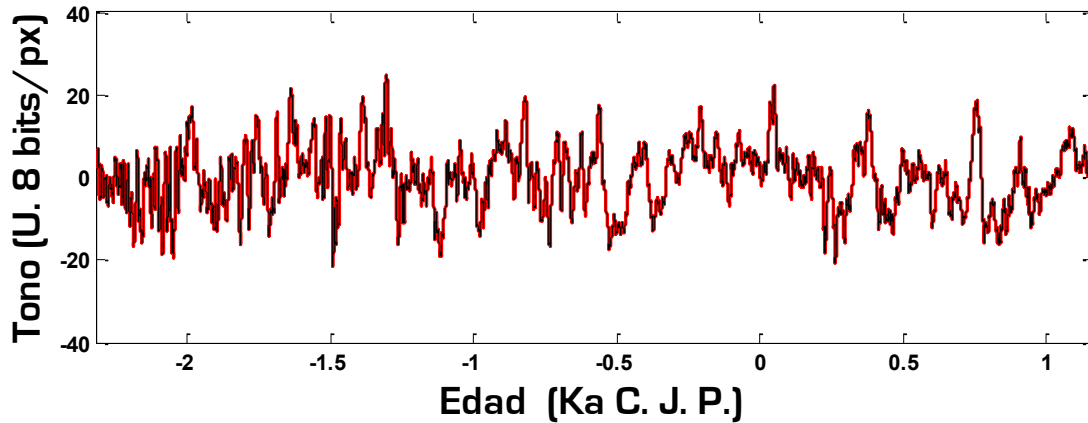


Figura 5.17. a) Comparación entre la serie de tiempo filtrada (negro) y la original (rojo) para la escala de grises del Tramo 5. b) Serie de tiempo Filtrada (verde).

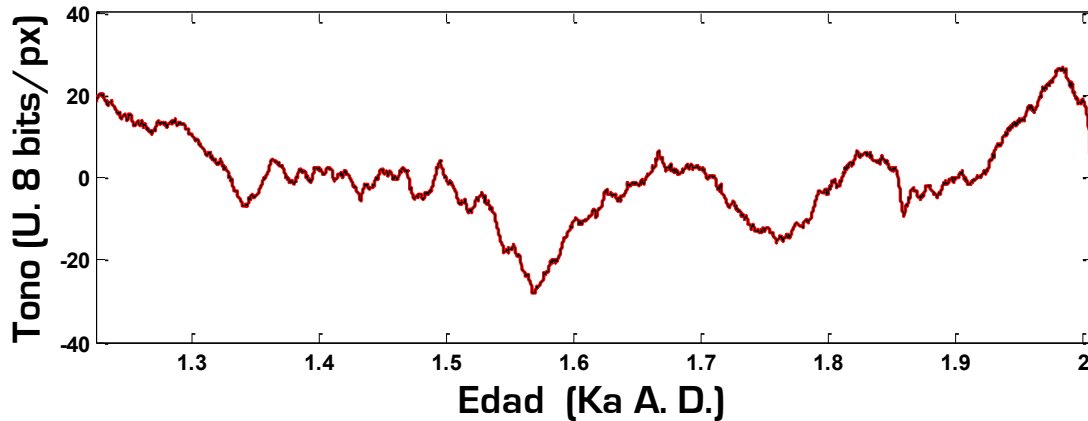


Figura 5.18. Comparación entre la serie de tiempo filtrada (negro) y la original (rojo) para la escala de grises del Tramo 6.

Al final, las series de tiempo para la punta y el tramo 5 no fueron filtradas (Figura 5.17 y 5.16). Esto debido a que el número de bandas contadas para la punta estaba en el intervalo dado por la incertidumbre mientras que el número de bandas contadas en el tramo 5 era menor que el número de años [ver apéndice 1]. La implicación de esto último, es que para estos dos tramos, en la escala de grises, JR1a no tiene información subanual.

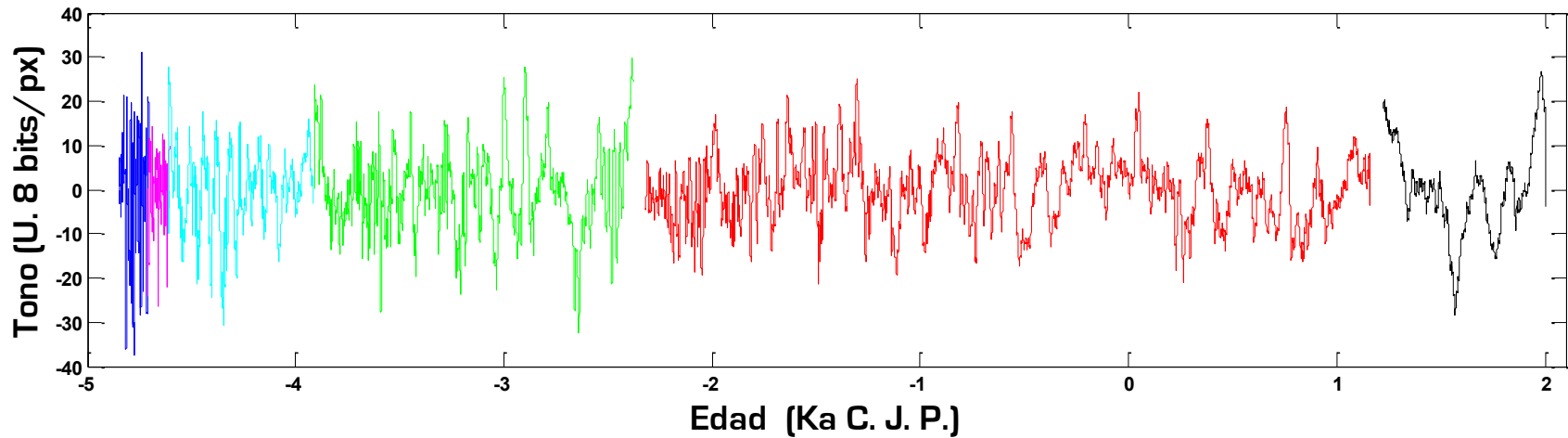


Figura 5.19. Serie de tiempo completa para JR1a a partir de la escala de grises, en la cual se le eliminó su tendencia general y se filtro para eliminar el ruido. Se destacan en diferente color cada tramo a partir del cual se construyo; tramo1 (azul marino), tramo2 (marrón), tramo 3 (azul claro), tramo 4 (verde), tramo 5 (rojo), punta (negro). Los tramos 1 y 2, en azul marino y marrón respectivamente cubren los primeros 13cm de la estalagmita, sin embargo cubren solo tres siglos aproximadamente, lo que conlleva a una muy alta resolución aunada a una mayor cantidad de información subanual y estocástica que tuvo que ser filtrada.

En general, si uno mira la comparación entre la serie de tiempo original y la serie de tiempo filtrada, se ve que, aun sin haberle practicado el filtro matemático desarrollado, la serie está bastante libre de ruido. Prueba de ello, es que los dos últimos tramos, que abarcan 3000 años, no fueron filtrados. Finalmente presentamos la serie de tiempo tanto sin tendencia como ya filtrada. Ésta será con la cual se trabajará en los siguientes capítulos para realizar las comparaciones y análisis deseados.

5.8 Consejos para crear una serie de tiempo a partir de una escala de grises

Recapitulando, estos son los pasos para obtener una serie de tiempo a partir de la escala de grises superando los errores que cometimos sobre la marcha.

1. Púlase la muestra con cuidado evitando la incrustación del abrasivo.
2. Obténgase la imagen de la estalagmita antes de hacer el muestreo para el fechamiento.
3. Utilícese un microscopio para esta finalidad; si la textura lo permite, tomar las fotomicrografías a lo largo de un transecto continuo paralelo al eje de crecimiento.
4. Únanse las fotomicrografías sin olvidar haber fotografiado la escala.
5. Trabaje con el menor número posible de imágenes de tramos, de ser posible con una sola imagen para la estalagmita.
6. Pase la imagen a color a escala de grises utilizando un software matemático como Matlab© 7.3.0. o R 2.7.2.
7. Lea la matriz de la escala de grises, asegurándose que sea unidimensional.
8. Promedie los elementos de cada renglón de la matriz, con el fin de obtener un renglón columna.
9. Conociendo a qué distancia corresponde un elemento de este vector, utilice el modelo de edades para asignarles una temporalidad, y crear así la serie de tiempo.
10. Haga la prueba de Kendall para verificar la existencia de tendencia.
11. En caso de encontrar una, elimine la tendencia, restando ésta a la serie original de manera que sólo se quede con los residuales.
12. Filtre los residuales de manera iterativa utilizando una ventana, hasta que el número de máximos en la serie sea igual al número de años arrojado por el fechamiento.

Bibliografía

- Legendre, P. y Legendre, L., 2003. Numerical Ecology. Elsevier, Montréal.
- Pérez Enríquez, R., Böhnell, H. y Bernal, J.P., 2007. Stalagmite analysis for Paleoclimate Studies, Centro de Geociencias. UNAM, Querétaro.
- Ramírez Izquierdo, H., Bernal, J.P., Perez Enriquez, R., Böhnell, H., Morales Malacara, J.B. y McCulloch, M.T., 2007. Band-counting and grey tone spectral analysis in banded stalagmites, a new proxy for paleoclimate reconstruction?, AGU- Annual summer meeting 2007.
- Smith, C.L., Fairchild, I.J., Spötl, C., Frisia, S., Borsato, A., Moreton, S.G. y Wynn, P.M., 2009. Chronology building using objective identification of annual signals in trace element profiles of stalagmites. *Quaternary Geochronology*, 4: 11-21.
- Trauth, M.H., 2007. *Matlab Recipes for Earth Sciences*. Springer, Berlin, 288 pp.
- Webster, J.W., Brook, G.A., Railsback, L.B., Cheng, H., Lawrence Edwards, E., Alexander, C. y Reeder, P.P.-. 2007. 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: 1-17.

Capítulo VI

Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

“Думал все то же о вреде избрания внешней цели для жизни. Моряк, руководись тем компасом, который в твоём корабле, - крошечной стрелкой, которая меньше в тысячу раз твоего корабля, - а не видимым предметом, даже не звездами: все обманывает, кроме того, что в тебе”¹

Лев Николаевич Толстой

Con los datos que a continuación aportaremos, en particular la relación Mg/Ca presente a lo largo de la estalagmita, se podrán refutar o apoyar las primeras hipótesis. No sólo determinaremos los factores que establecen la tonalidad en la estalagmita, sino si es un archivo paleoclimático y si es un archivo válido.

6.1 Resultados del análisis multi-elemental por LA-ICP-MS y Generación de la serie de tiempo de Mg/Ca

Debido a que las cantidades presentes en los elementos traza, de los que se indagó su existencia no eran considerablemente distinguibles del ruido, se terminó por realizar sólo el análisis químico por LA- ICP MS- de los isótopos ⁴⁴Ca, ⁴⁶Ca, ⁴⁷Ca, ⁴⁸Ca ²⁴Mg, ²⁶Mg, de los cuales al ser calibrados con el estándar NIST 612, se obtuvo la cantidad de Calcio y Magnesio presente, sin importar para ello cuál isótopo se estudió en primera instancia. Hay que tener en cuenta que la región analizada se encuentra dentro de la zona estudiada por escala de grises. Debido a la manera como se programó la corrida, la serie de tiempo generada, es un orden de magnitud más grande, es decir el número de datos es 10 veces mayor.

Para generar la serie de tiempo a partir de los datos geoquímicos, se estableció primero la relación Mg/Ca, para cada punto analizado a lo largo del eje de crecimiento. Esto genera en sí una matriz columna asociada a una distancia de la base. De nuevo el dominio de tiempo se generó con el modelo de edades. De manera que este vector columna es la serie de tiempo.

¹ “He pensado que todo el daño. es por qué se eligen propósitos ajenos a la vida. El marino se guía con la brújula, la cual está dentro de su barco, (una diminuta flecha, la cual es miles de veces más pequeña que su navío), sin objetos a la vista, incluso sin estrellas; todo engaña menos lo que está dentro de ti”.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Así, a esta serie de tiempo le realizamos el mismo procedimiento que le hicimos a la serie generada por escala de grises. Los resultados de la prueba de Kendall arrojaron para nuestra serie de tiempo una $\tau = 1$, lo que implica la existencia de una tendencia, por lo que realizamos una regresión lineal, que nos dio la tendencia. La pendiente de la tendencia indica su carácter positivo, señalando una tendencia a condiciones de menor humedad a lo largo de los últimos seis milenios para la zona donde está ubicada la cueva.

Tenemos que recordar que la relación Mg/Ca es un indicador de humedad, inversamente proporcional a esta variable ambiental. Después, como parte del proceso de refinación de la señal eliminamos la tendencia, para luego filtrar la misma utilizando ventanas relativamente pequeñas hasta que el número de máximos locales sea igual al número de años presentes en el tramo analizado.

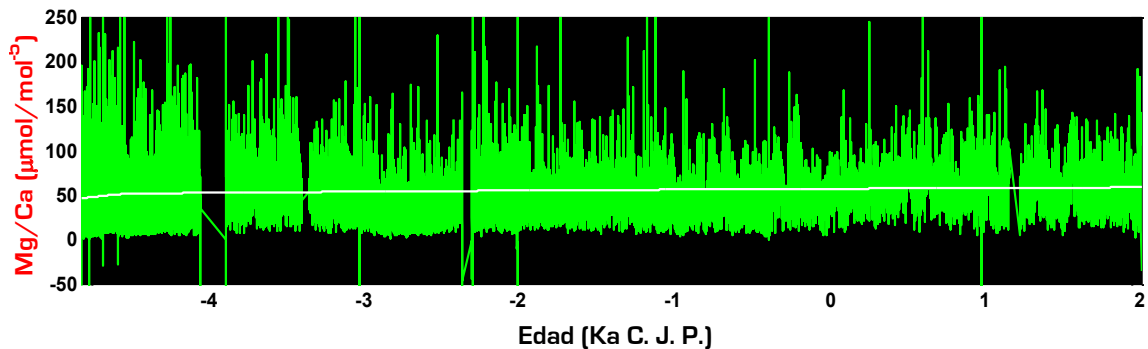


Figura 6.1. Serie de tiempo de JR1a a partir del cociente Mg/Ca (verde), donde se muestra la tendencia general obtenida por regresión lineal (blanco).

6.2 El cociente Mg/Ca y su relación con la escala de grises

Con el fin de comparar con la serie de tiempo generada a partir de la escala de grises, la serie generada a partir de los datos de la relación Mg/Ca es presentada junto con ésta en diferentes intervalos de tiempo (Fig. 6.2-6.25).

Ya que la relación Mg/Ca es inversamente proporcional a la humedad, el eje de las ordenadas de esta serie es graficado invertido, para la fácil visualización de las similitudes entre esta serie y la serie generada a partir de la escala de grises. (La conveniencia de esto se verá en el siguiente párrafo). Las líneas interlineadas, indican la correspondencia entre señales de ambas series. De esta manera, la correlación que esta comparación sugiere, es la de una correlación negativa.

Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

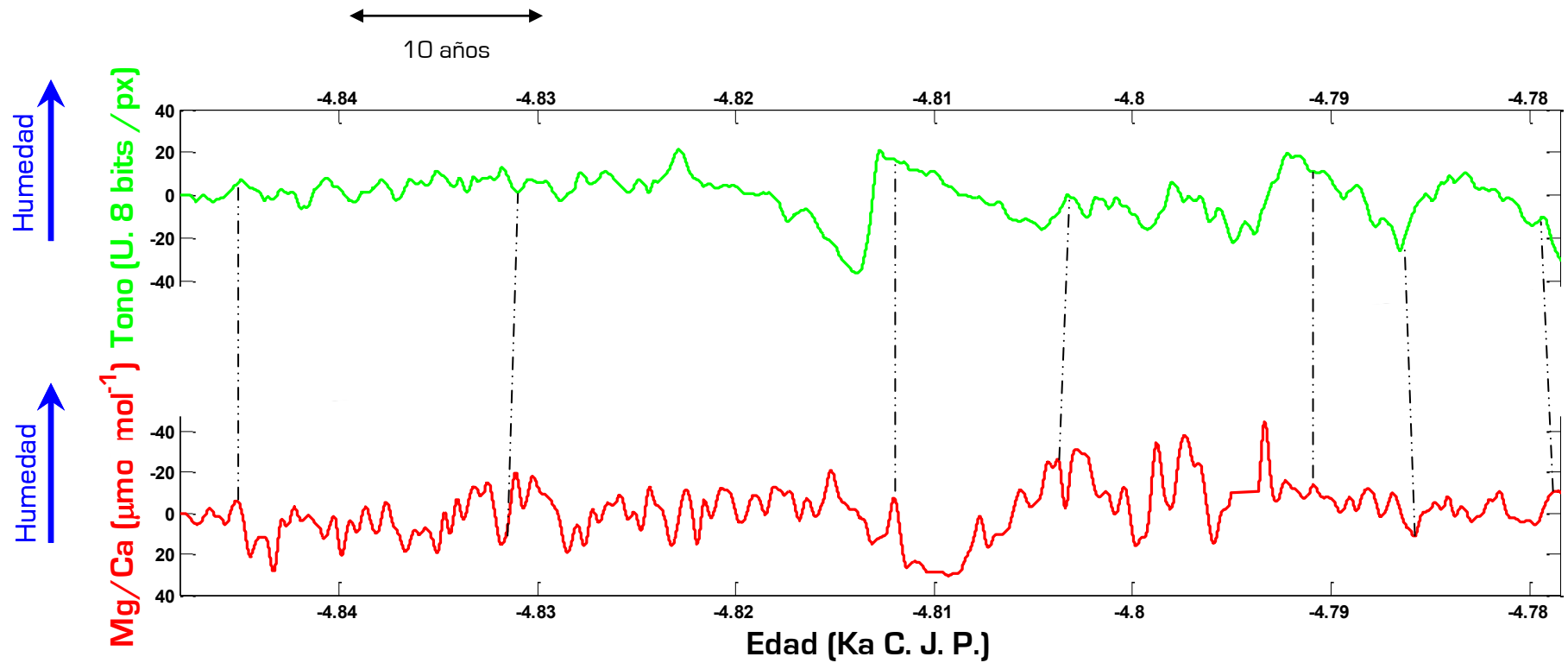


Figura 6.2. Comparación de las series de tiempo para los primeros 80 años del tramo 1 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series. Este tramo cuya longitud es de 7.4 cm al cubrir un tiempo de 140 años muestra resoluciones prácticamente iguales en ambas series.

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

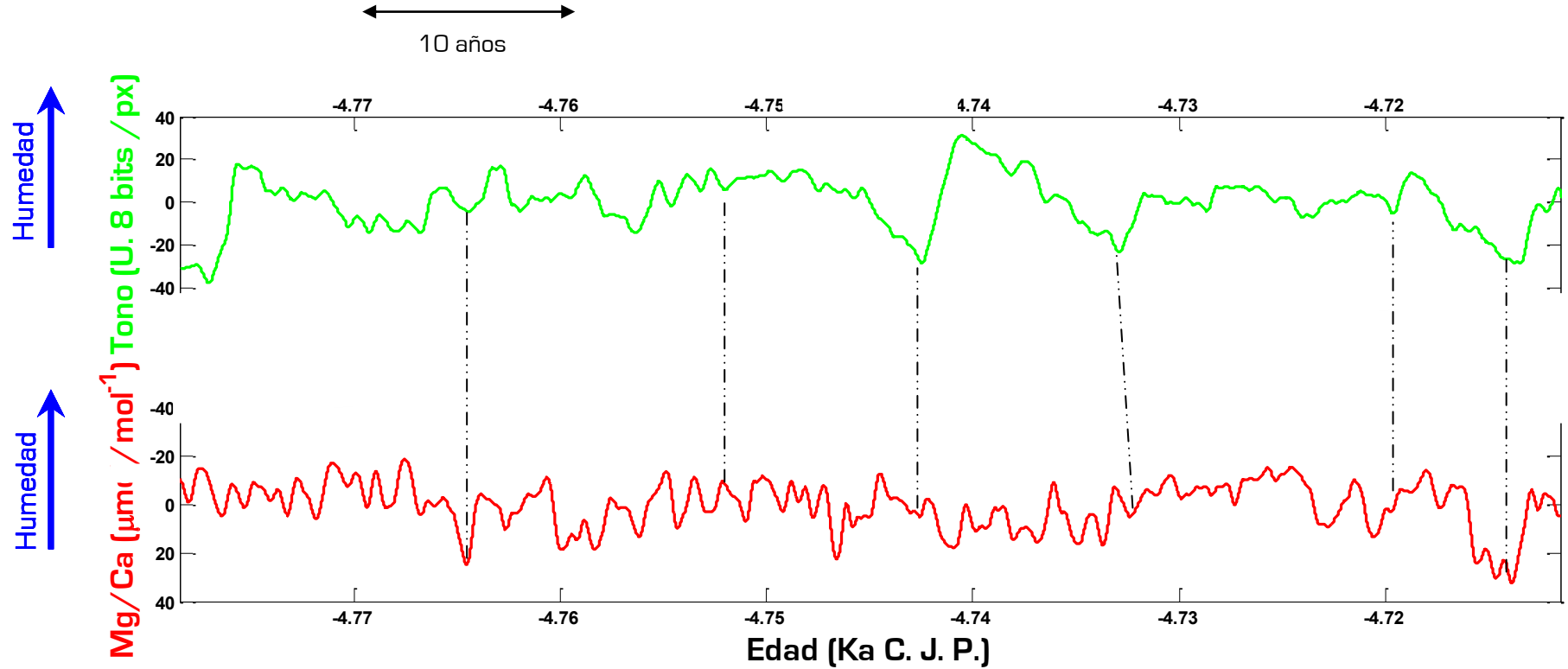


Figura 6.3. Comparación de las series de tiempo para los últimos 70 años del tramo 1 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series. Ya que la grafica pertenece al mismo tramo que la figura anterior, las resoluciones en ambas series son prácticamente iguales.

Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

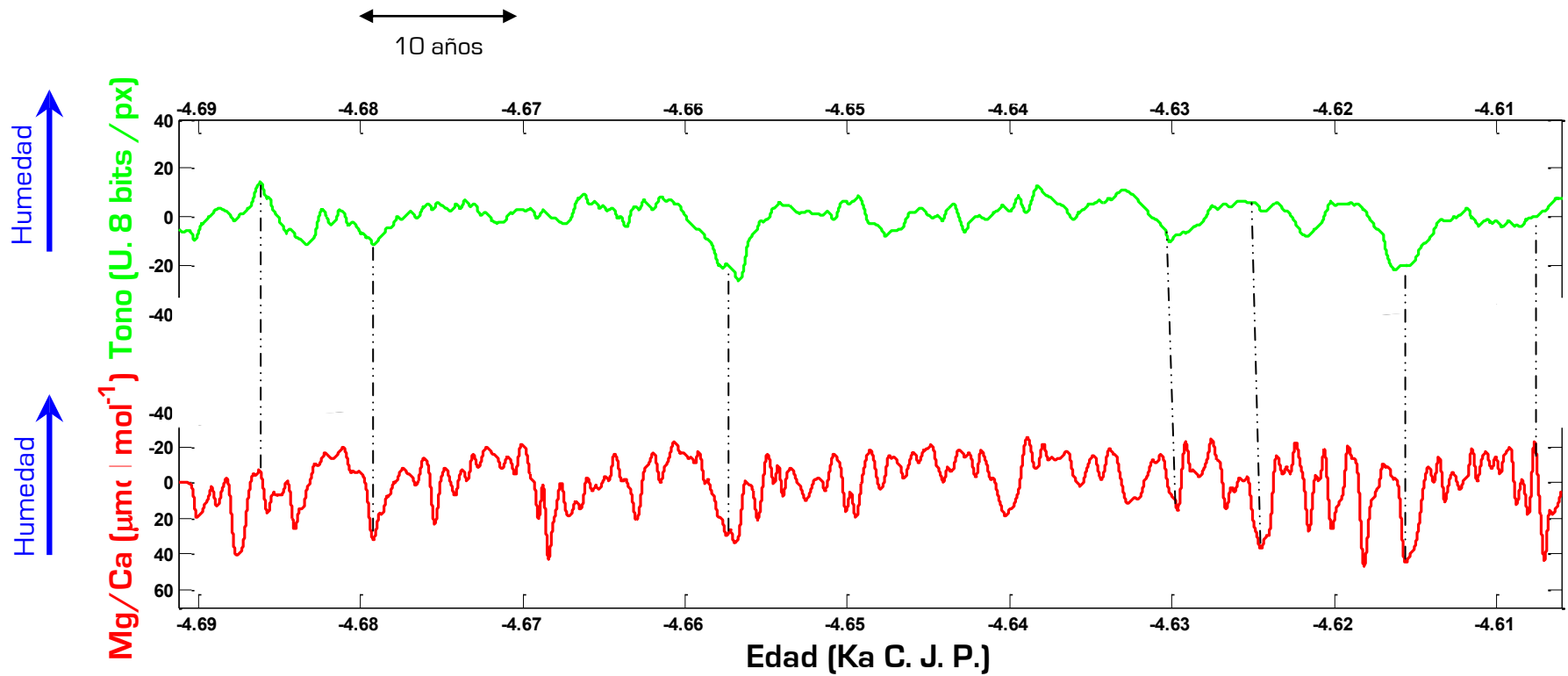


Figura 6.4. Comparación de las series de tiempo para el tramo 2 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series. Nótese cómo la resolución de ambas series ya no es la misma, siendo mayor la que tiene la serie de Mg/Ca.

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

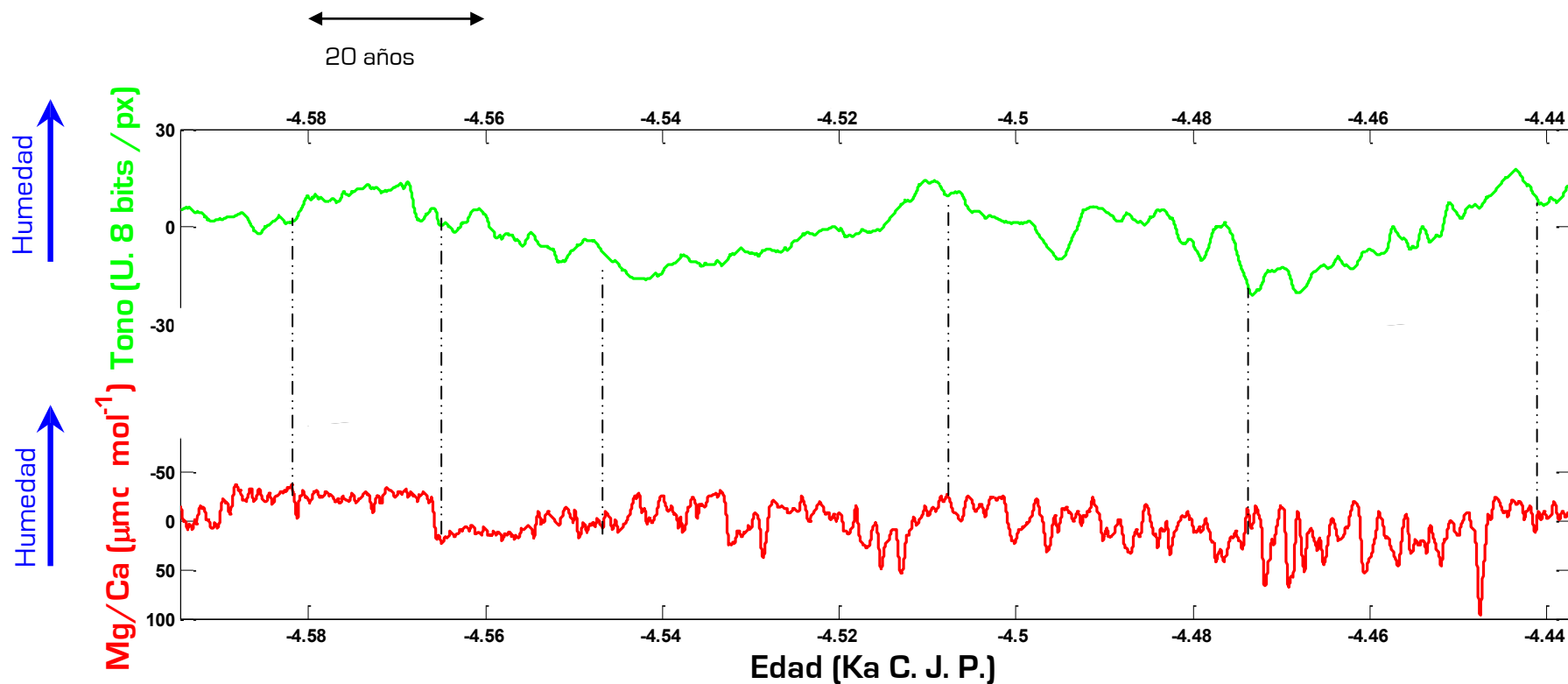


Figura 6.5. Comparación para los primeros 140 años de las series de tiempo para el tramo 3 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series. La resolución de la serie de Mg/Ca es mayor que la de la escala de grises.

Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

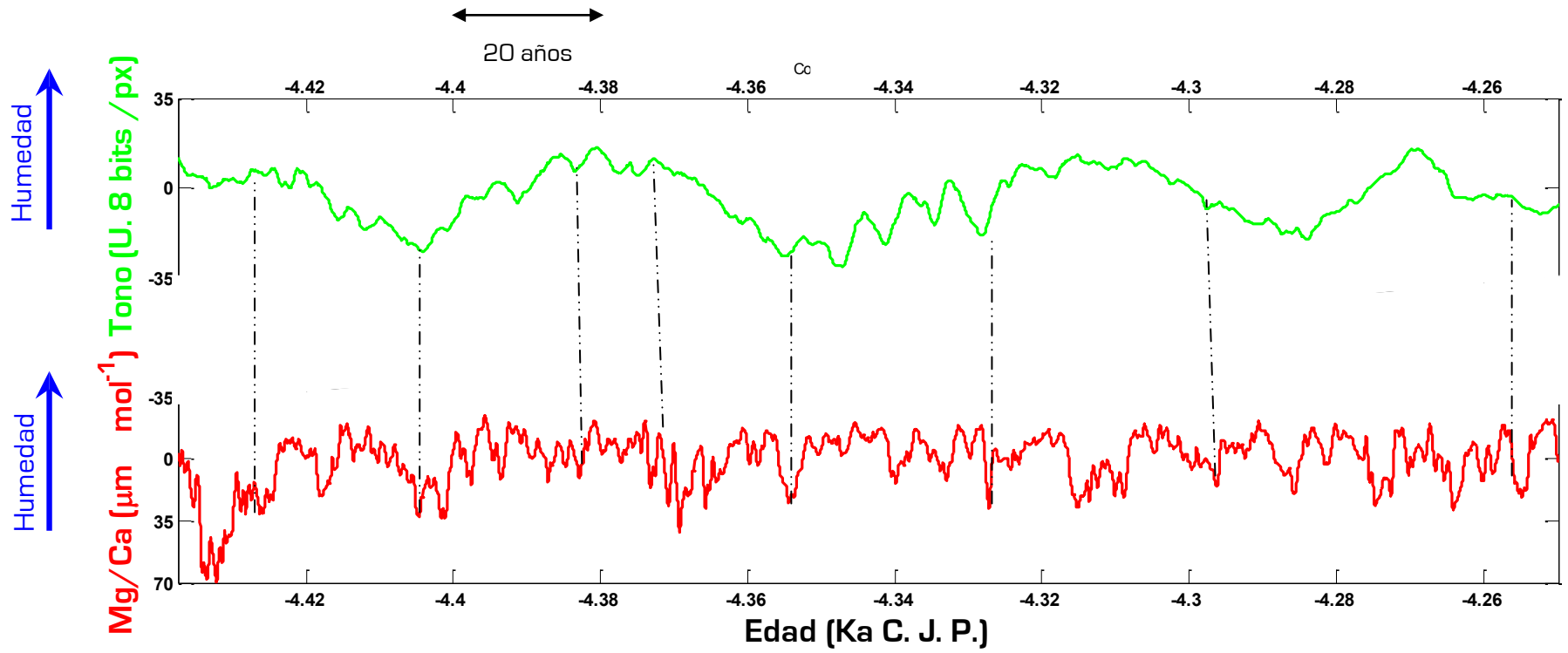


Figura 6.6. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 140 años del tramo 3 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

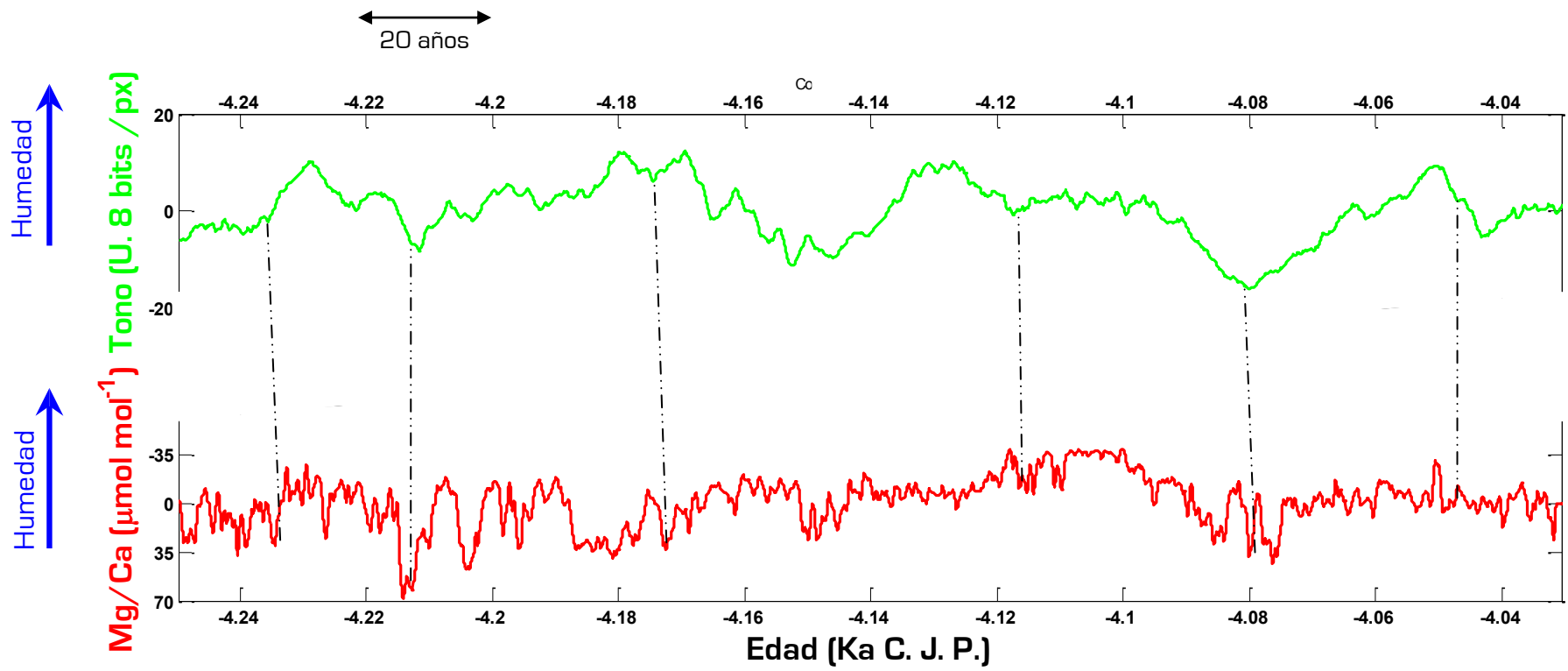


Figura 6. 7. Comparación de las series de tiempo para los últimos 200 años del tramo 3 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

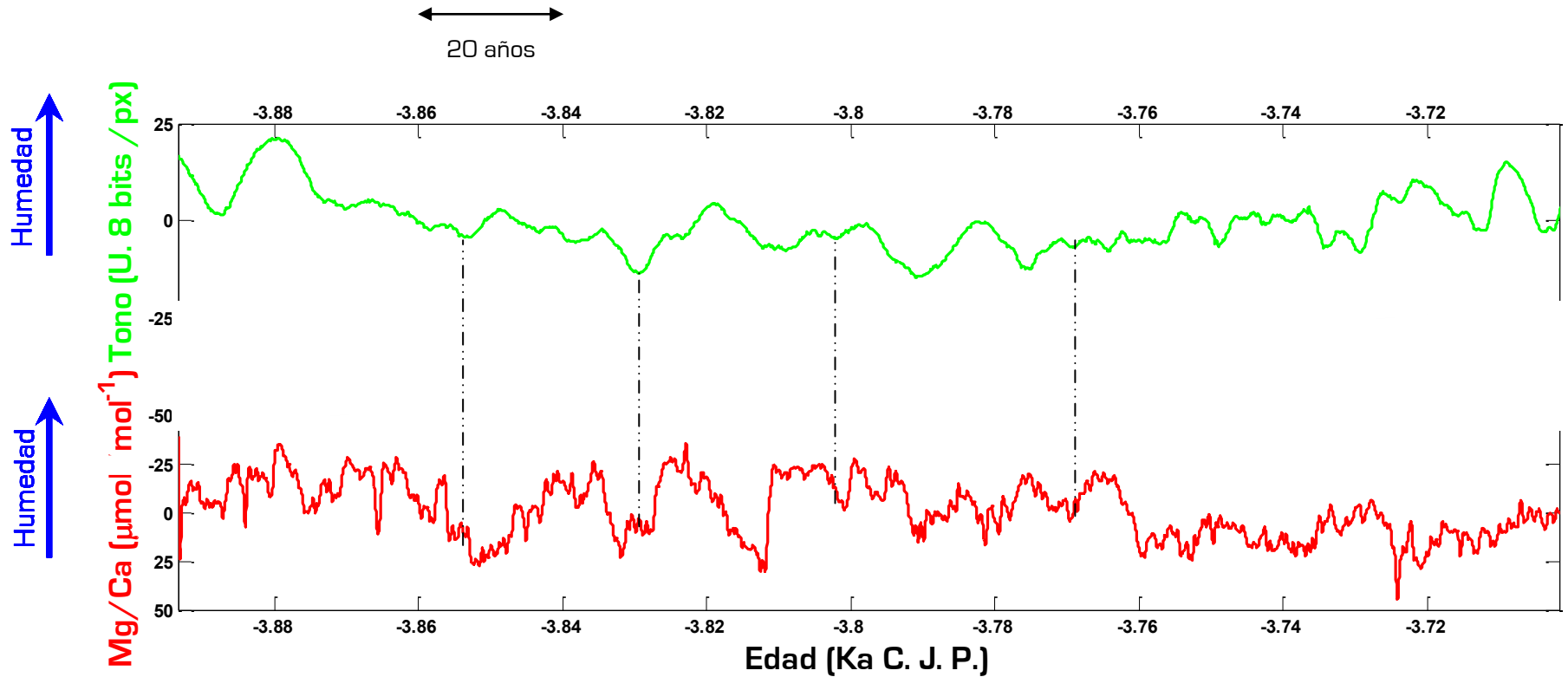


Figura 6.8. Comparación de las series de tiempo para los primeros 150 años del tramo 4 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

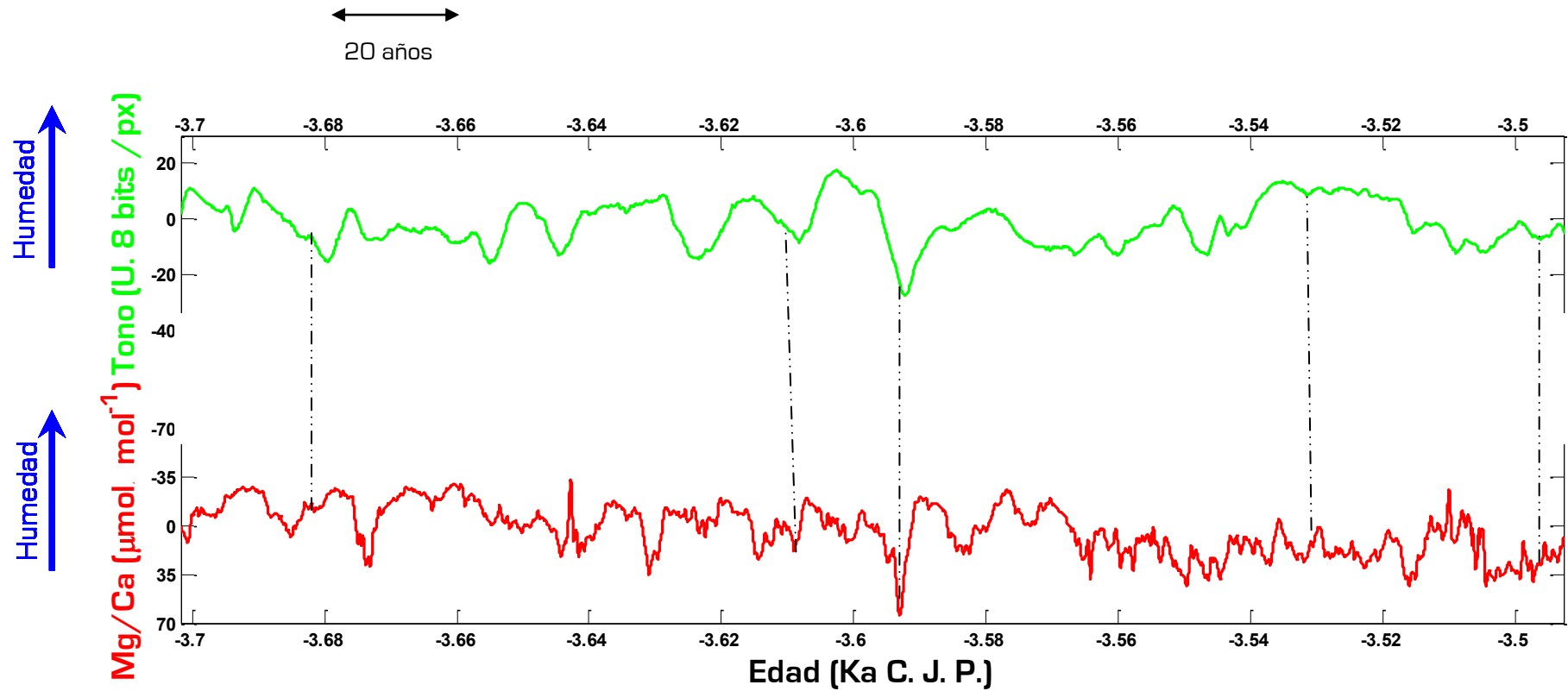


Figura 6.9. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 200 años del tramo 4 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

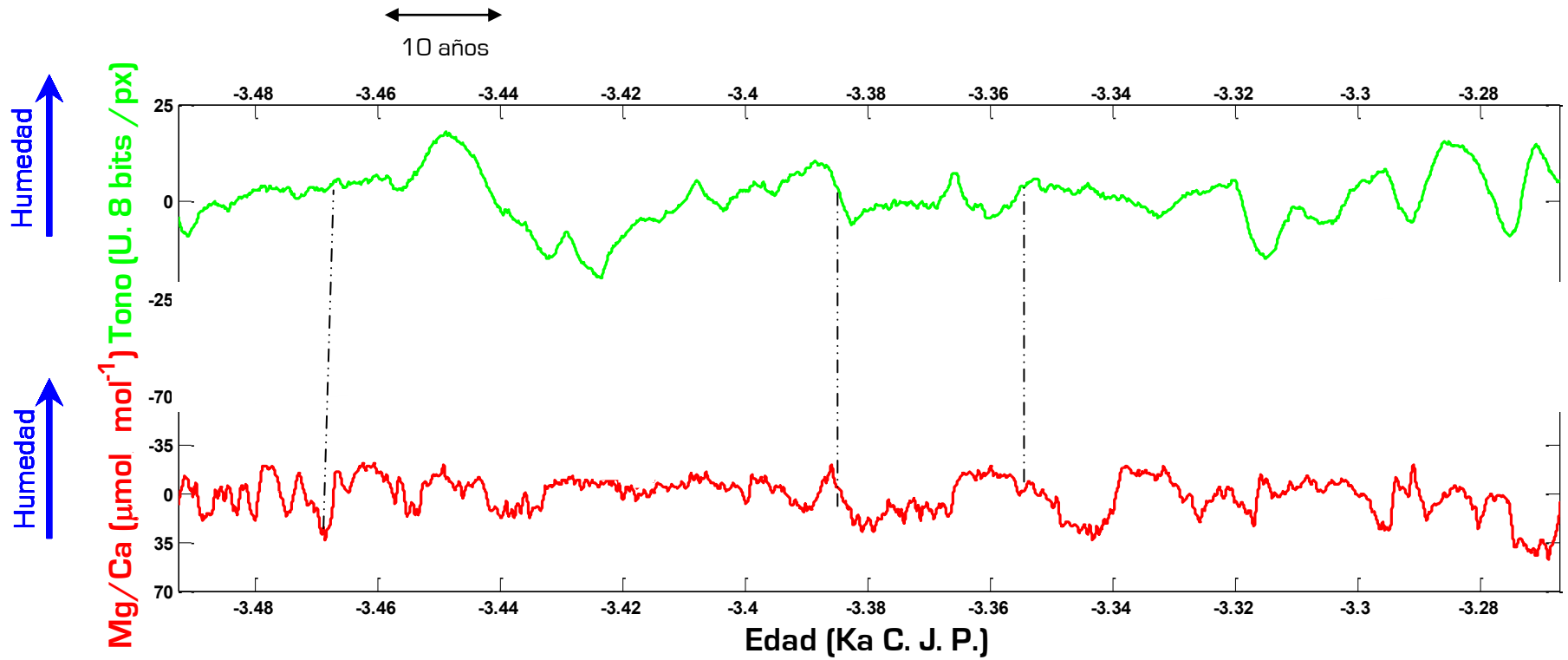


Figura 6.10. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 4 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

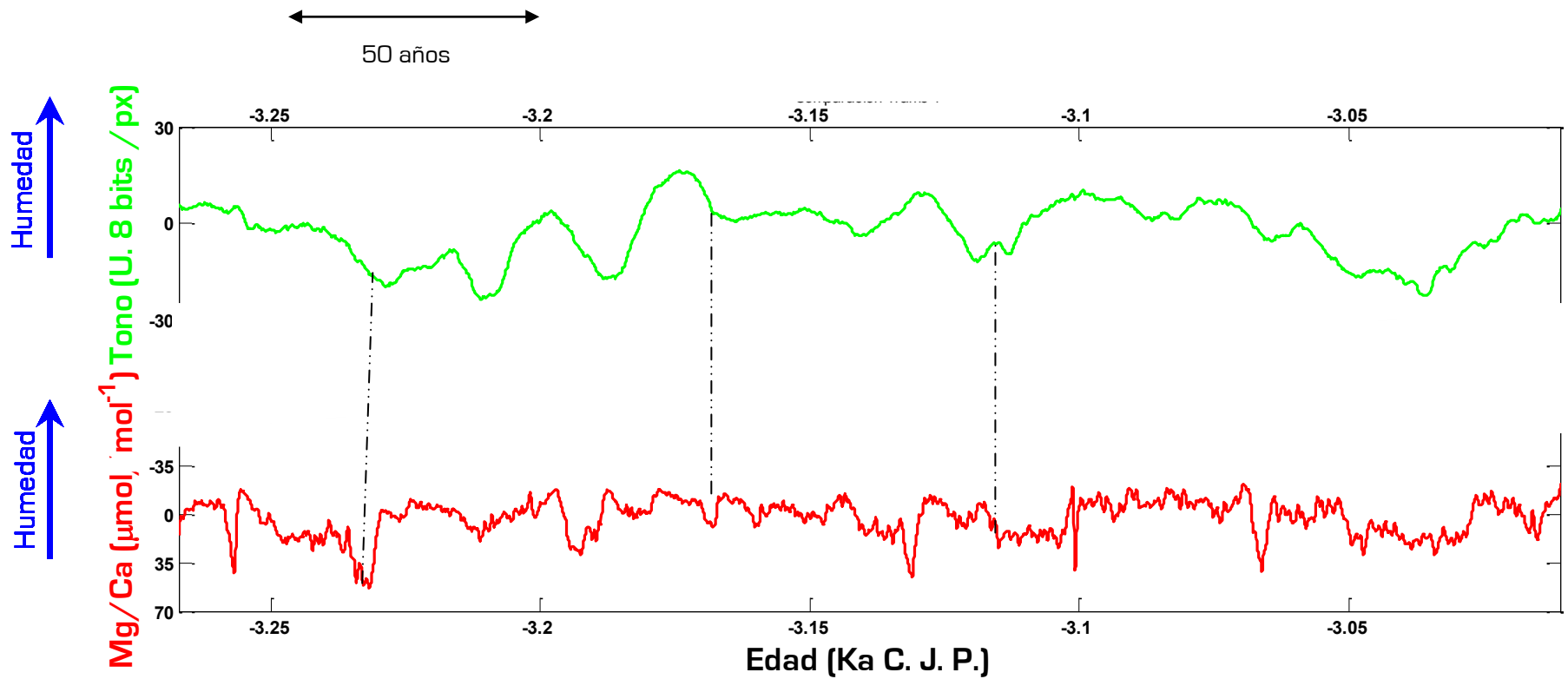


Figura 6.11. Comparación de las series de tiempo para los últimos 250 años del tramo 4 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

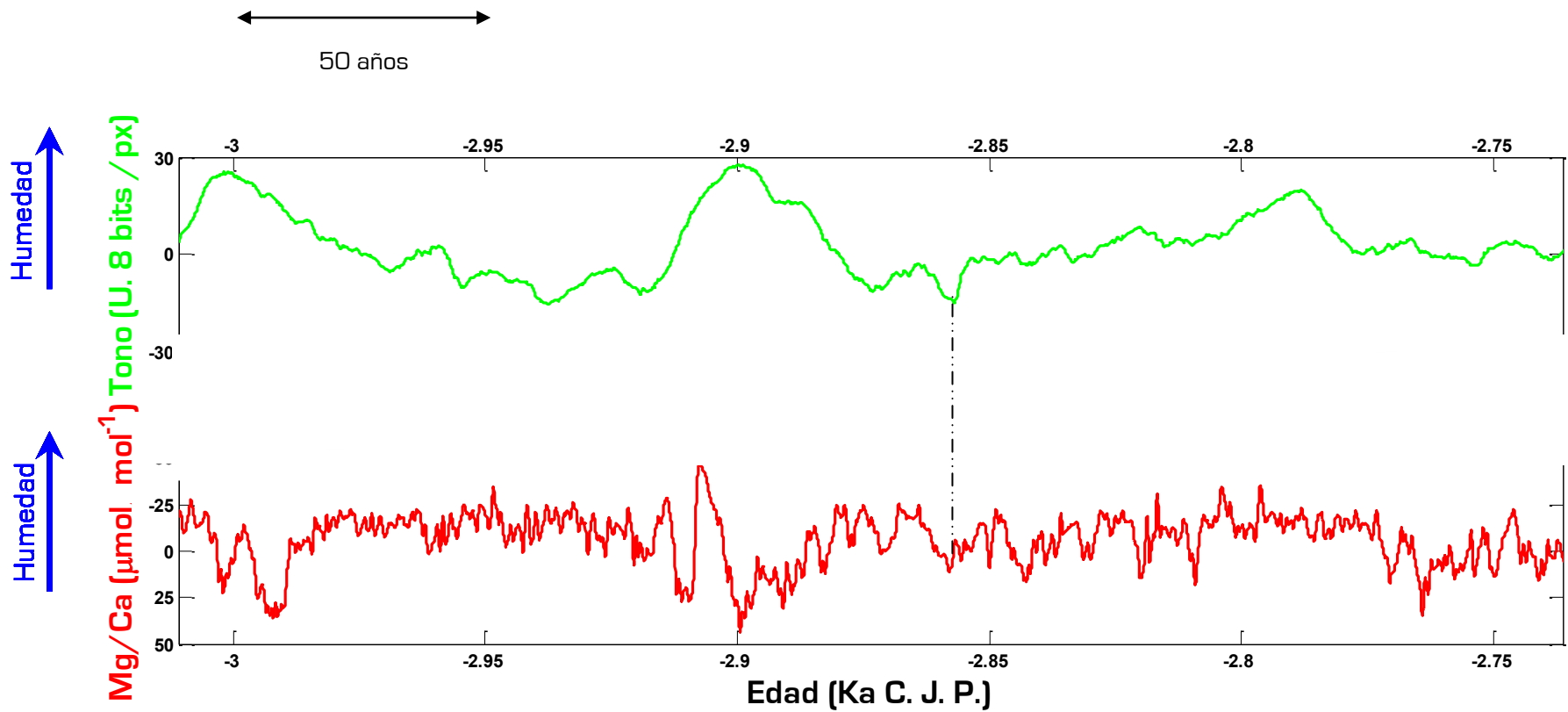


Figura 6.12. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 250 años del tramo 4 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

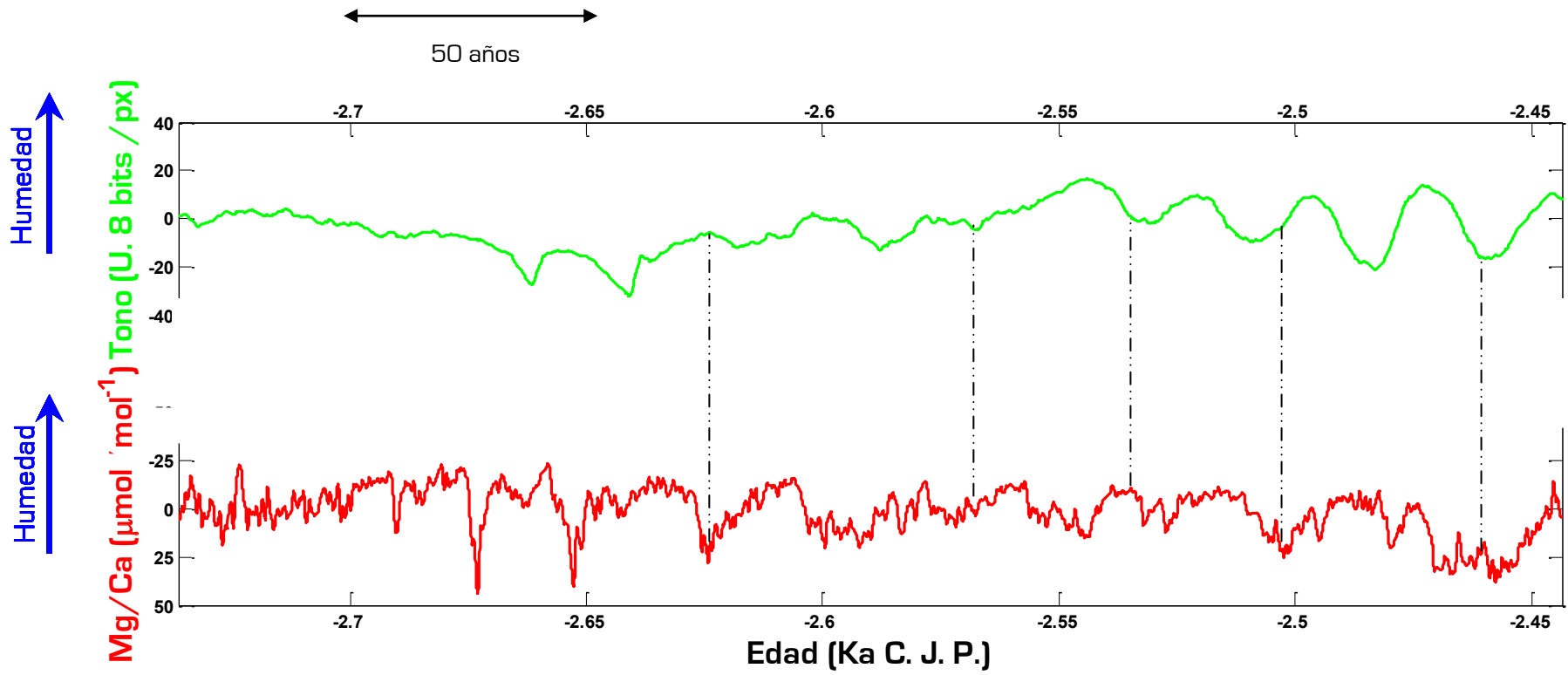


Figura 6.13. Comparación de las series de tiempo para los últimos 250 años del tramo 4 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

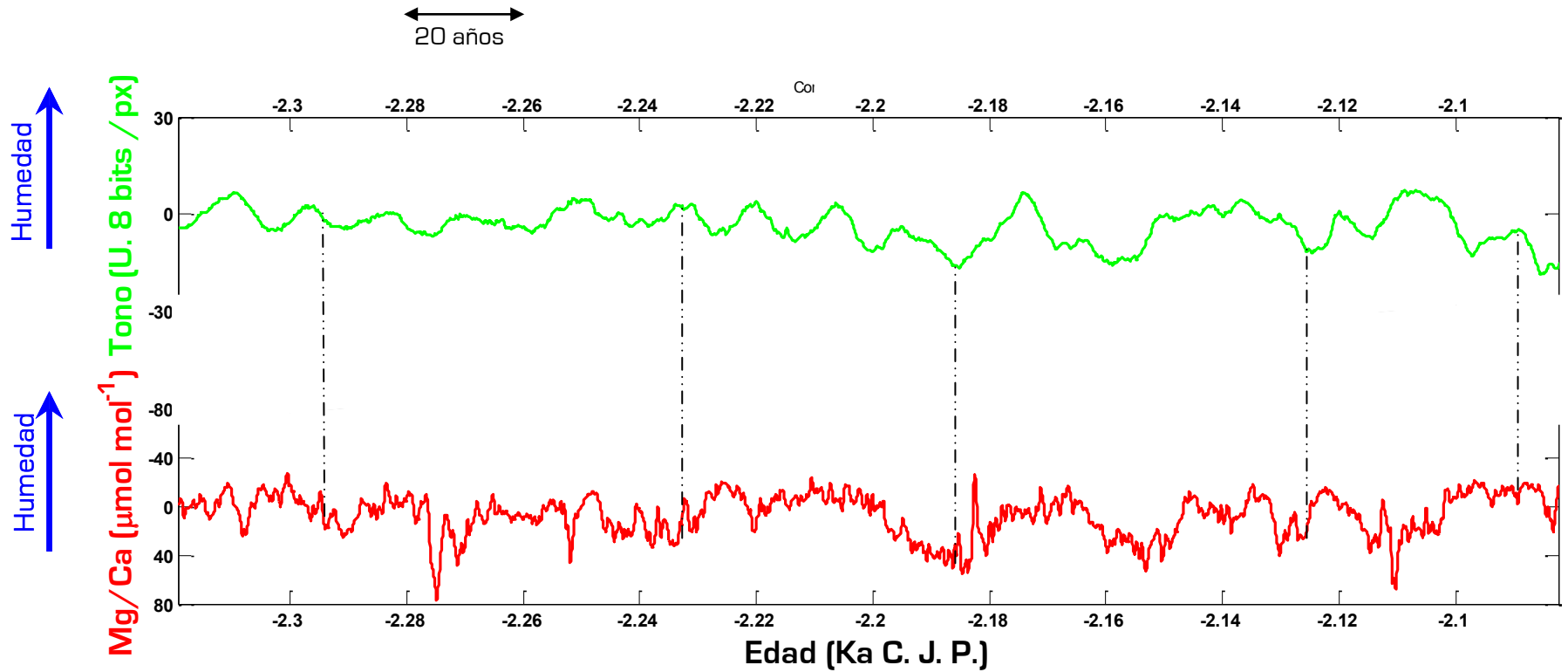


Figura 6.14. Comparación de las series de tiempo para los primeros 240 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

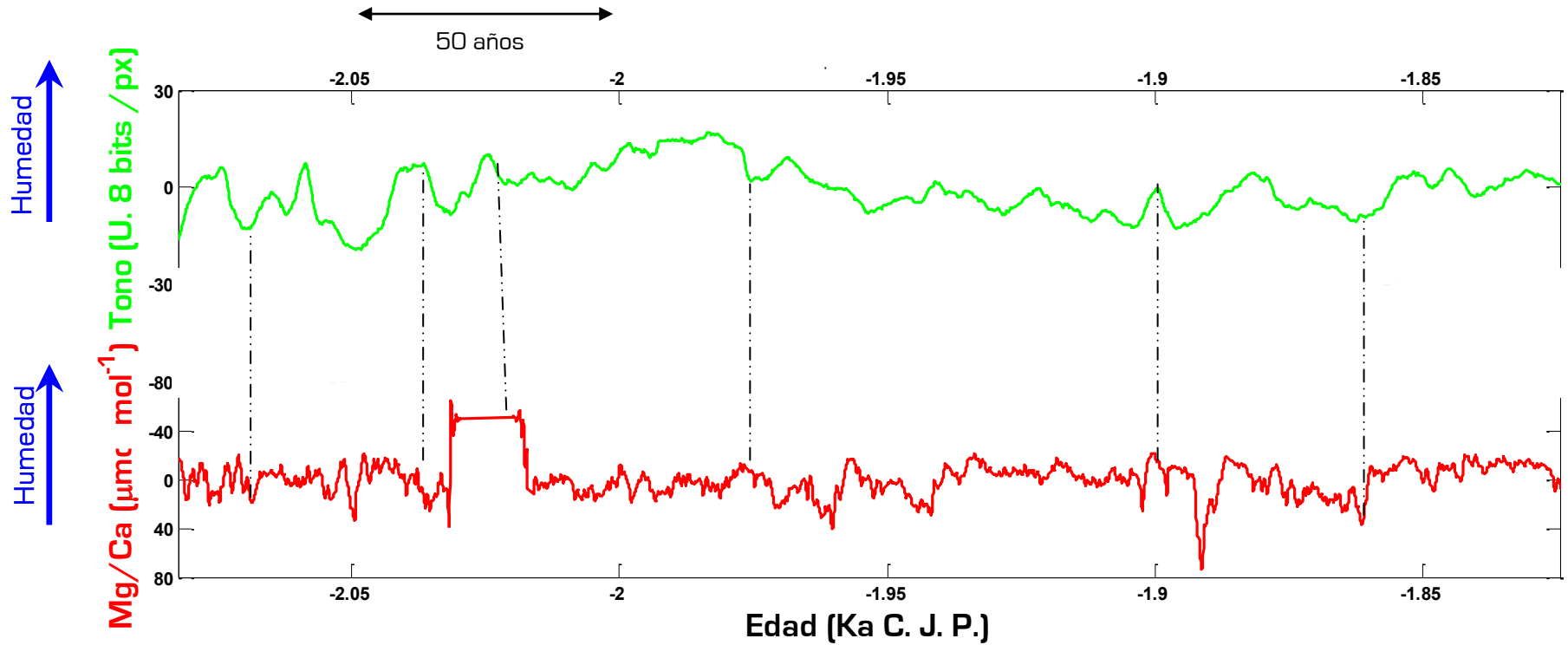


Figura 6.15. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

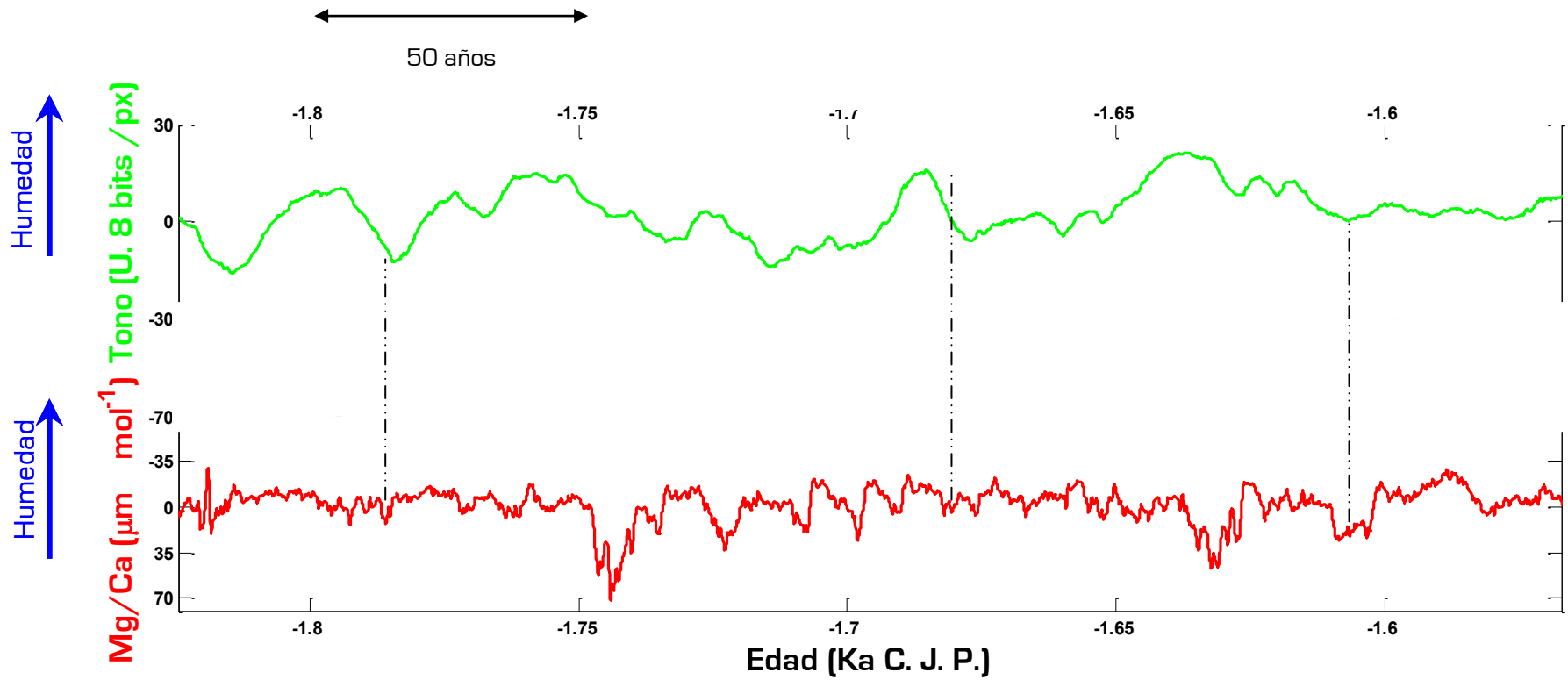


Figura 6.16. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

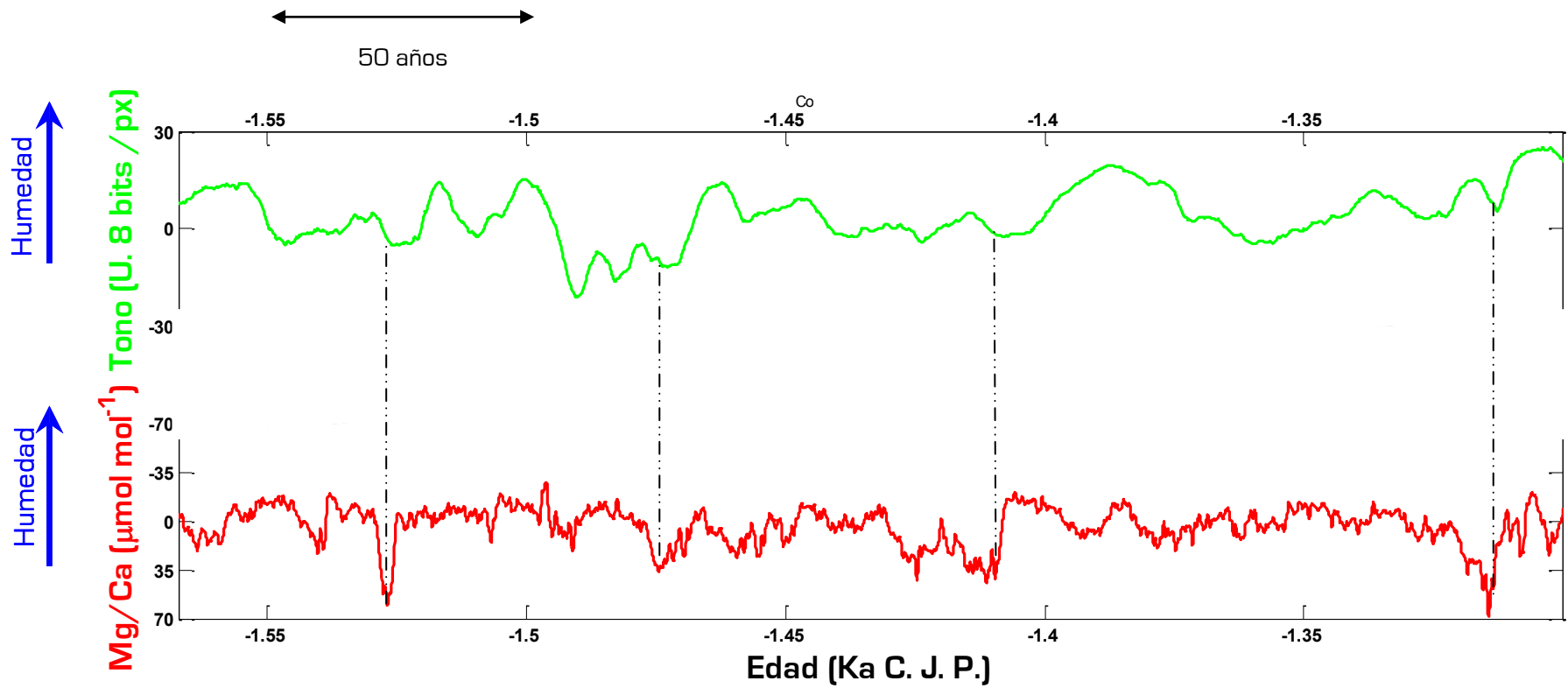


Figura 6.17. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

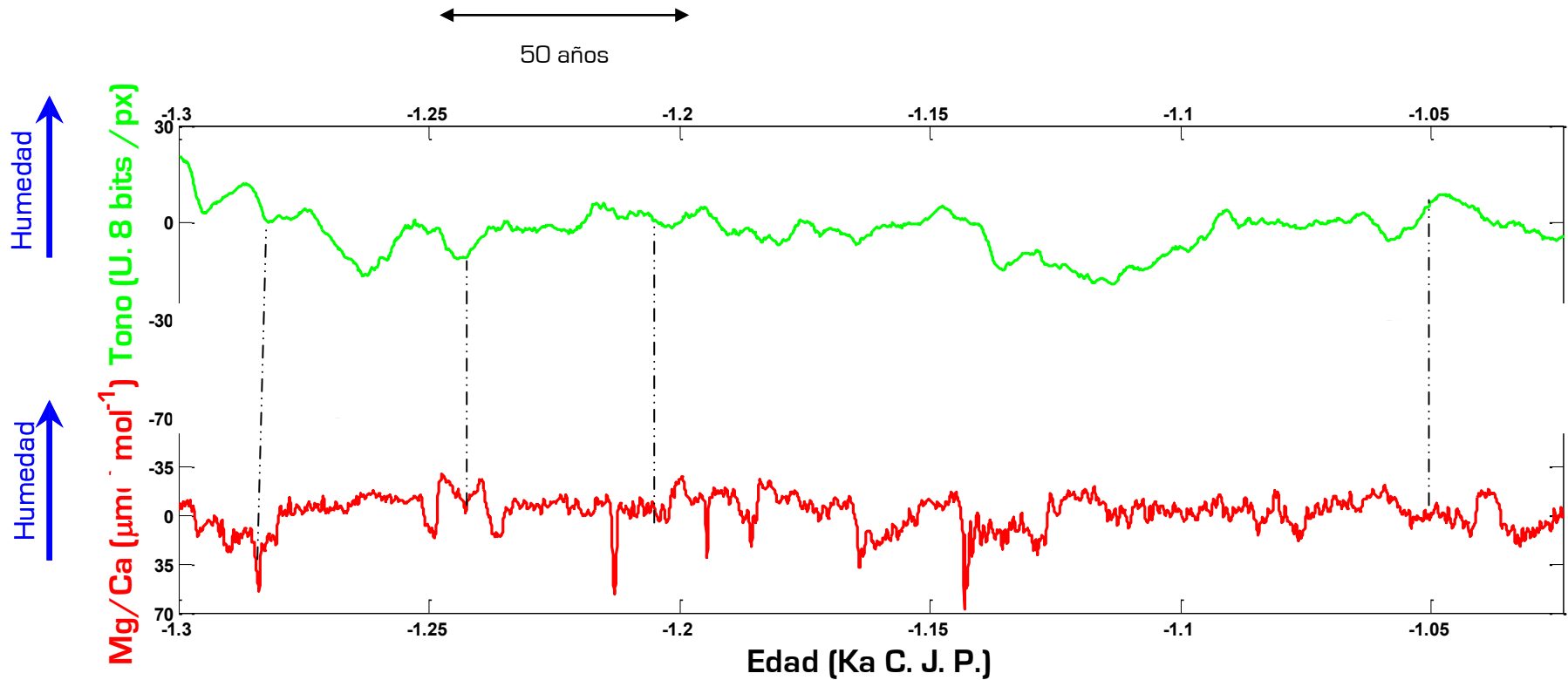


Figura 6.18. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

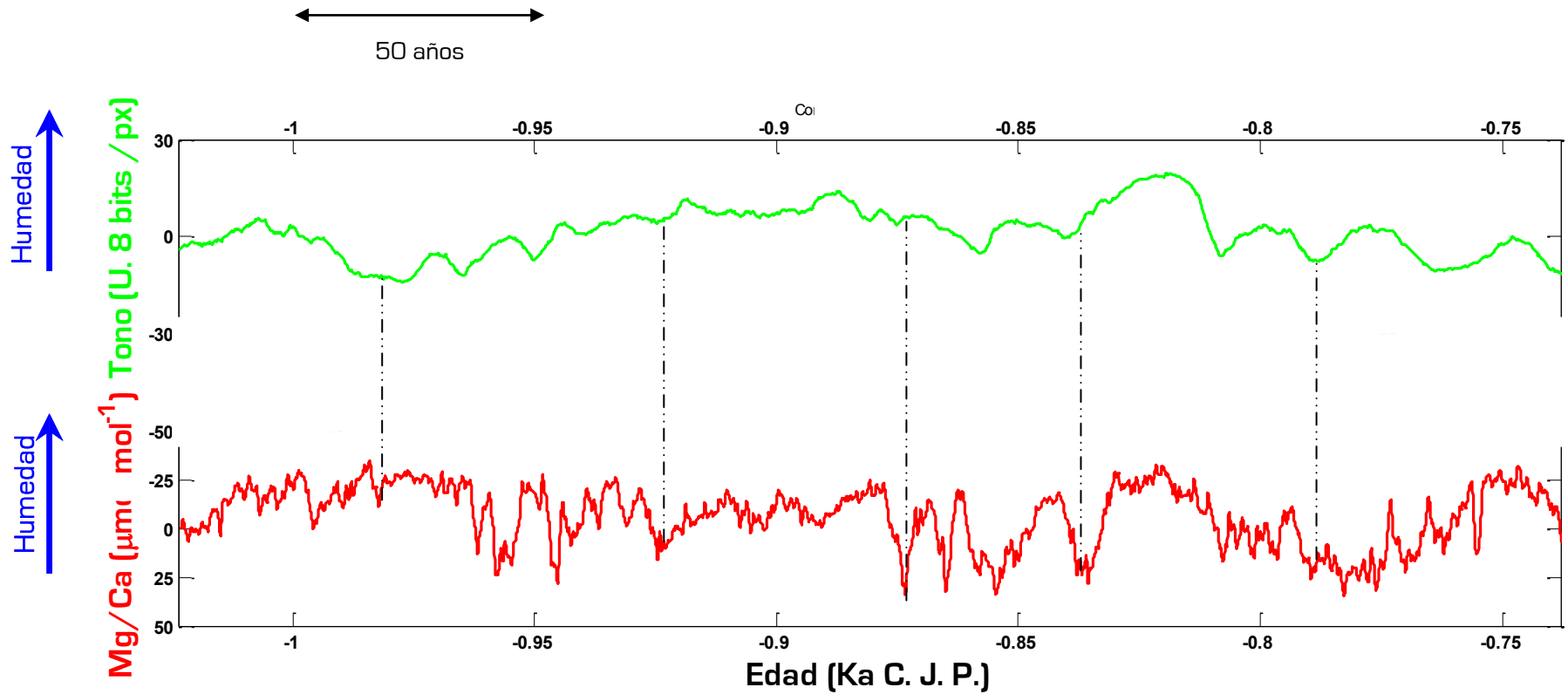


Figura 6.19. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

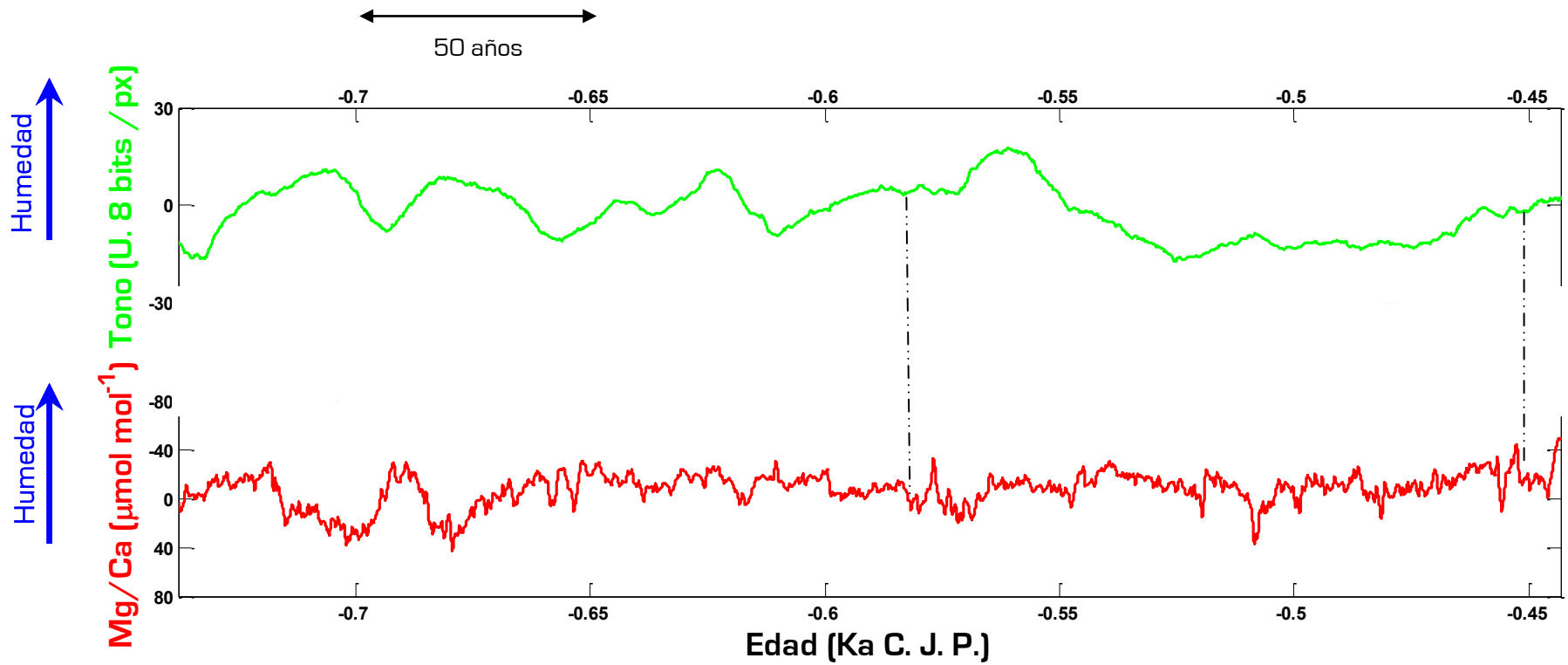


Figura 6.20. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

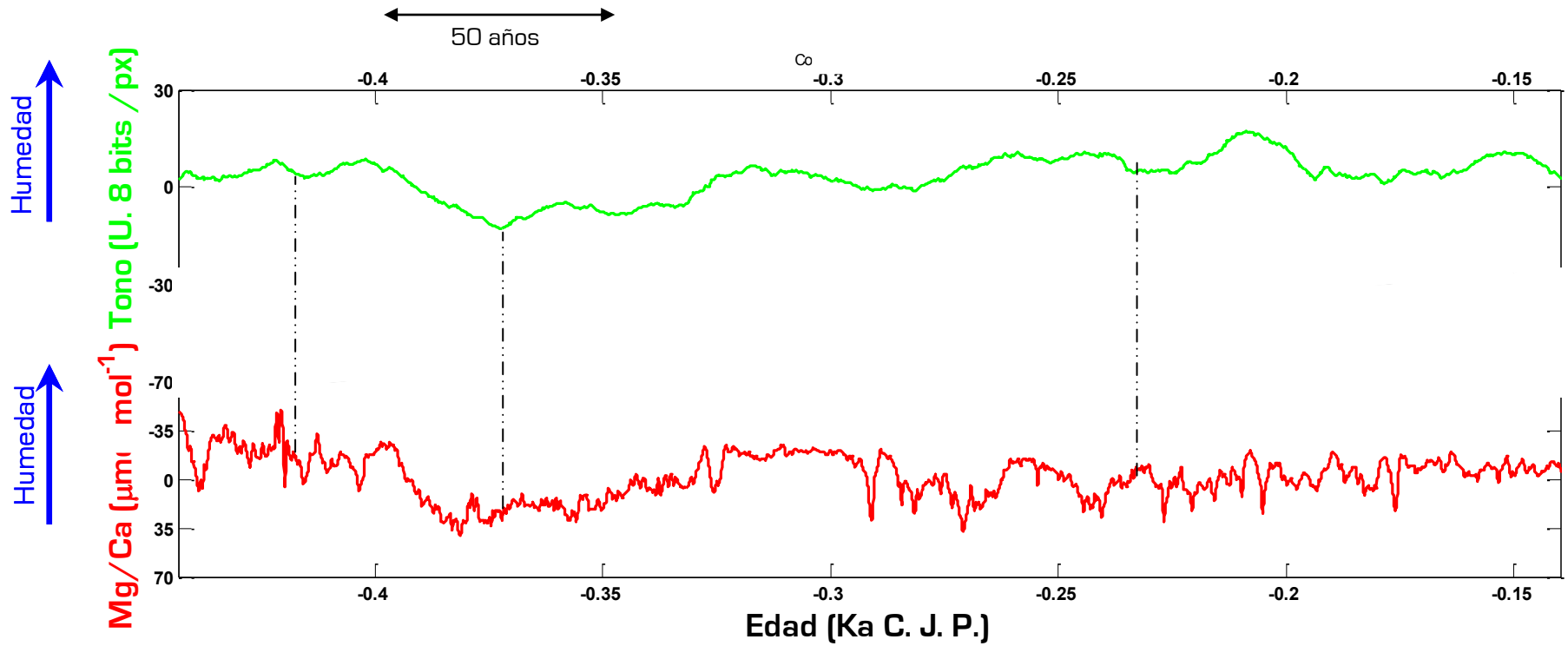


Figura 6.21. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

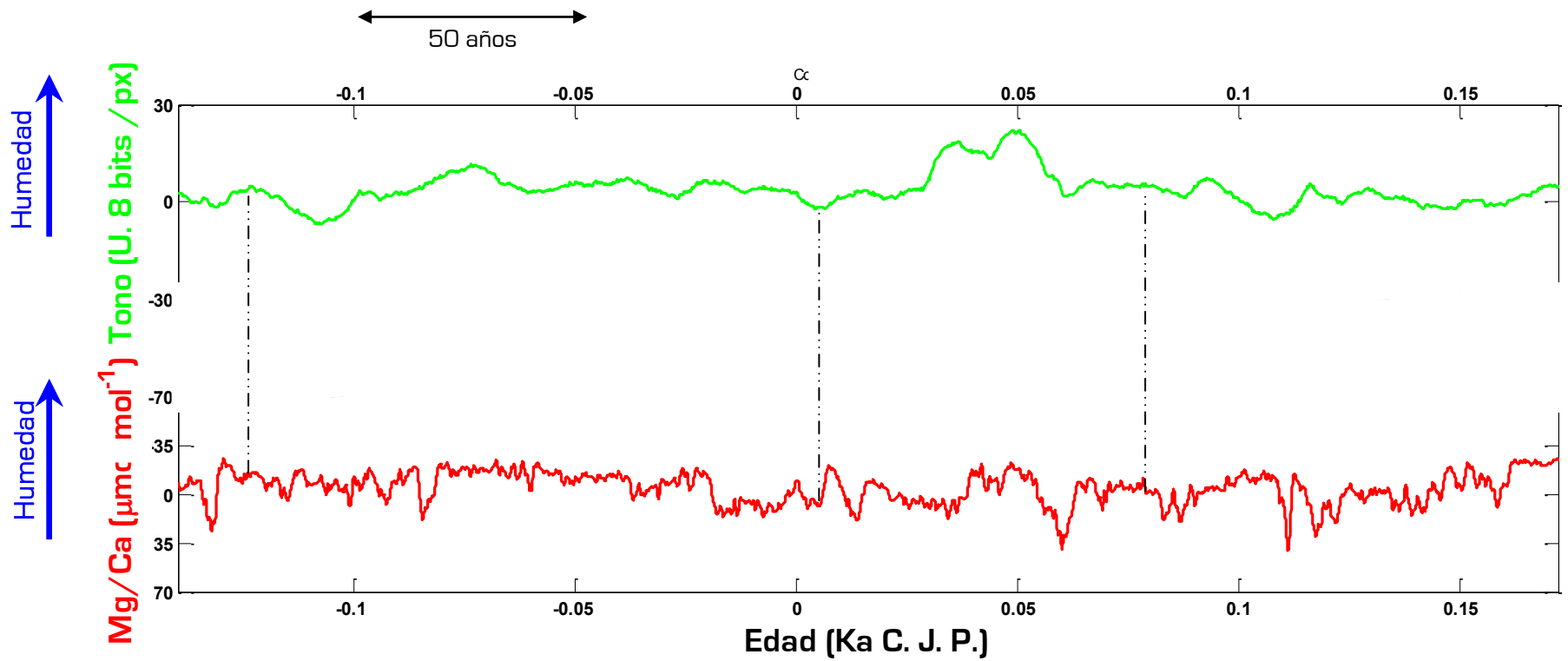


Figura 6.22. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

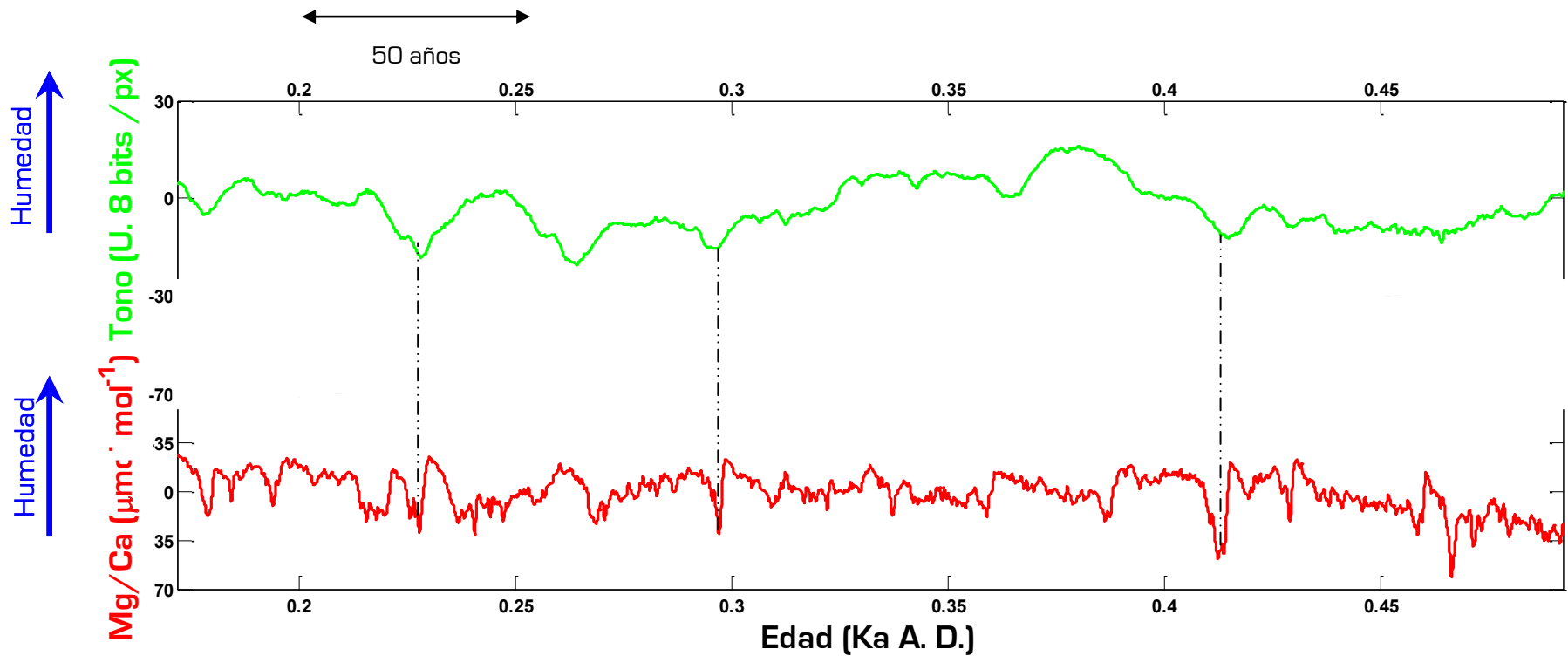


Figura 6.23. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

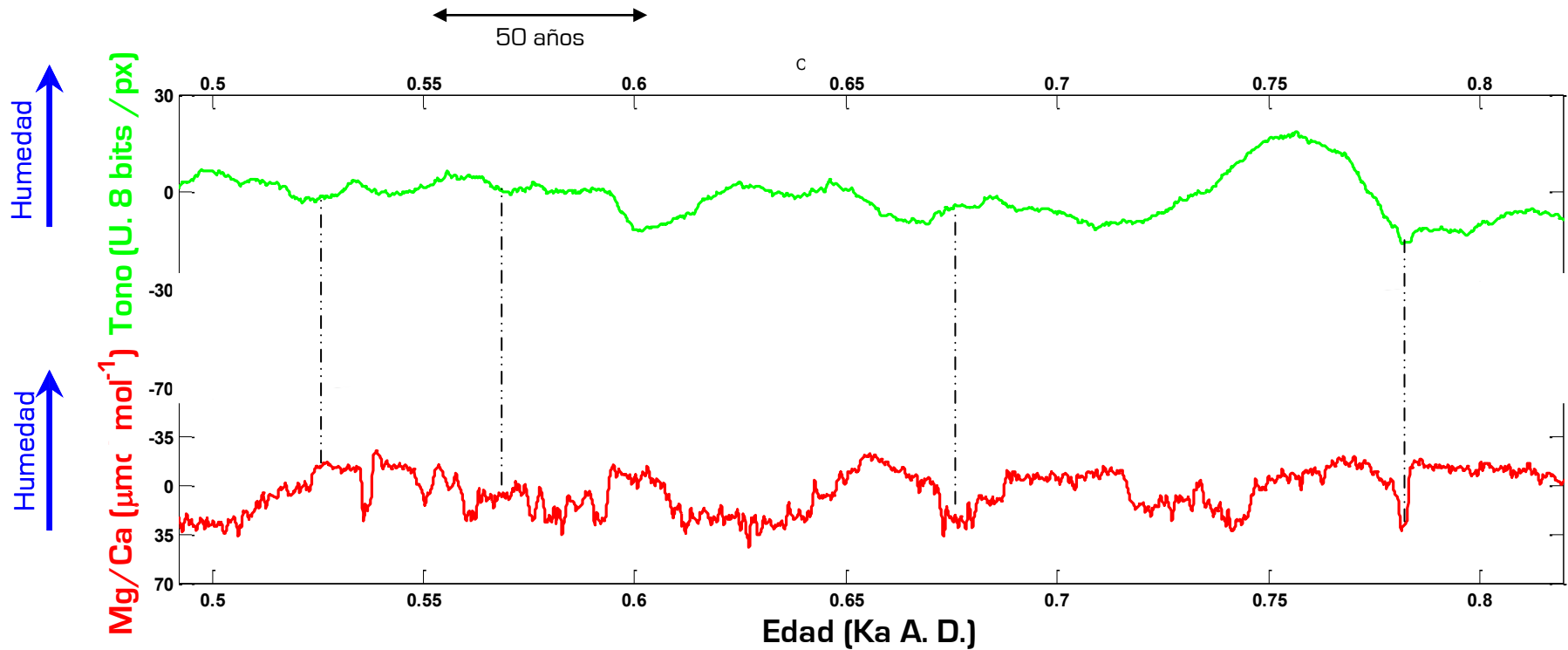


Figura 6.24. Comparación de las series de tiempo para los siguientes 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

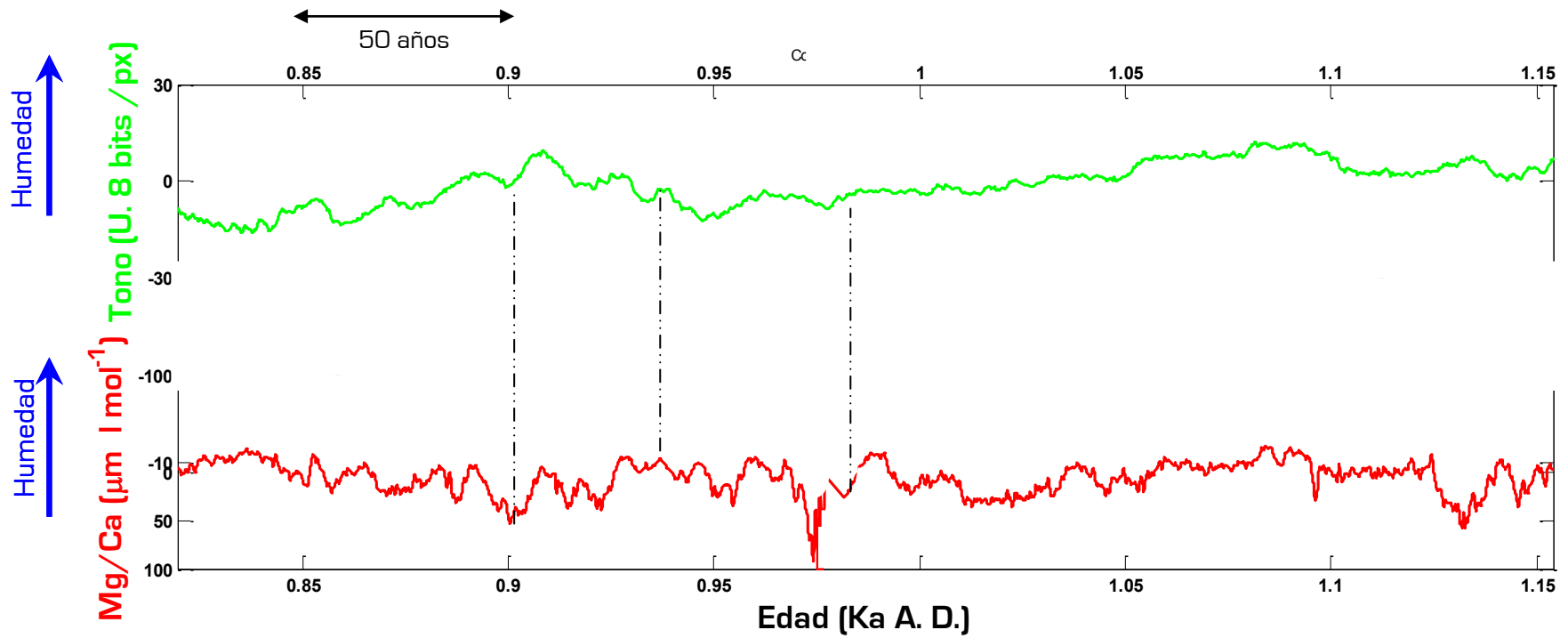


Figura 6.25. Comparación de las series de tiempo para los últimos 300 años del tramo 5 de JR1a producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). La línea punteada indica la correspondencia entre las señales de ambas series.

Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

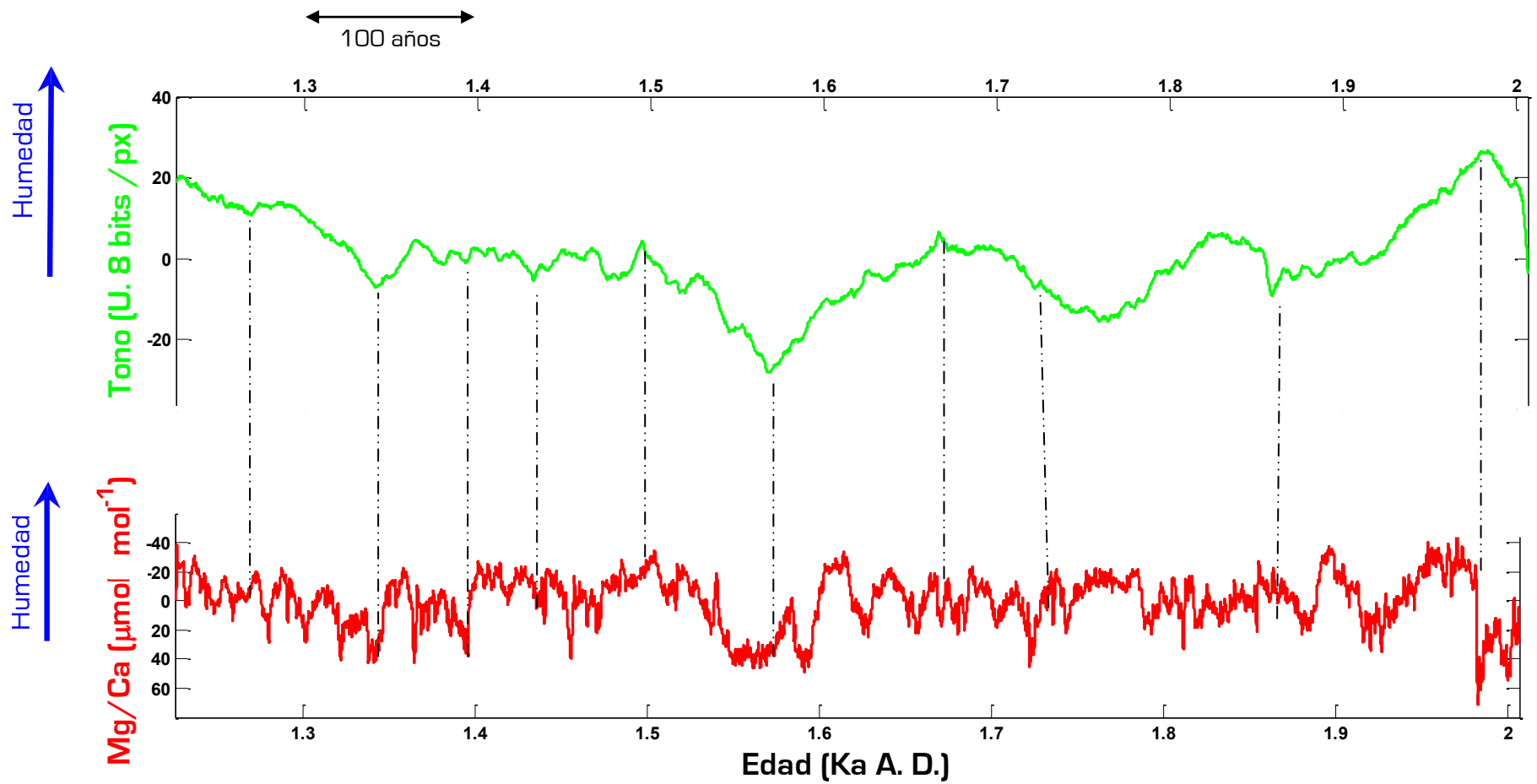


Figura 6.26. Comparación de las series de tiempo para la punta de JR1a, producidas a partir de la escala de grises (en verde) y de la relación Mg/Ca (en rojo, el eje “y” está invertido). Debido a la baja resolución de esta zona para la escala de grises, se presentan las graficas más alargadas en el eje de las ordenadas, con el fin de hacer notar las diferencias en las señales.

Esto era de esperarse ya que la relación Mg/Ca es un indicador de humedad, al igual que pensamos lo era el tono del bandeo. Así, el sentido de la correlación implica el hecho de que niveles mayores en la relación Mg/Ca, que señalan periodos de menor humedad corresponden con intensidades menores en la tonalidad y viceversa. De manera que podemos suponer que se tiene calcita menos pura (que da tonos más oscuros) en las condiciones de menor humedad, debido a que la impureza es presumiblemente de origen orgánico o detrítico, siendo su incorporación a la estalagmita, como en el caso de las varvas, donde a menor cantidad de agua hay una mayor oportunidad para la sedimentación o precipitación.

La correlación negativa visual sugiere que la escala de grises de la estalagmita contiene información paleoclimática, ya que, en general, correlaciona con otro indicador climático presente en la misma estalagmita.

Ahora bien, existen tres tipos de diferencias entre la escala de grises y Mg/Ca en JR1a. La primera tiene que ver con la estructura de las series. La segunda con la intensidad de la señal, es decir por qué hay mínimos o máximos que son muy intensos en Mg/Ca y casi imperceptibles en la escala de grises. Mientras que la tercera, tiene que ver con el hecho de que las señales de Mg/Ca a veces están desplazadas tanto hacia el pasado como hacia el futuro con respecto a la escala de grises.

Sobre la estructura de las series, es claro que Mg/Ca es más sensible a la variabilidad climática que la escala de grises. Sin embargo, en las figuras 6.2 - 6.25 es posible determinar que la sensibilidad de la escala de grises es dependiente con la resolución, espaciotemporal. Así los tramos 1 y 2 (figuras 6.2-6.4), que presentan mayor resolución pues tenían una tasa de crecimiento mayor, presentan una mayor variación en la señal que el tramo de la punta, de menor resolución (figura 6.25). Cabe mencionar que la resolución de la escala de grises es, a su vez, función del grado de magnificación utilizada para capturar la imagen, de manera que en futuros trabajos, se podría modificar esta variable para lograr una variación adecuada.

Sobre la intensidad de la señal, es probable que sea la cantidad de materia orgánica disponible y en mucho menor proporción de terrígenos disponibles, los que sean los responsables de esta variación. Así una señal de sequía es vista por Mg/Ca, pero puede llegar a pasar desapercibida por la escala de grises, simplemente porque aunque la cantidad de agua es menor, también hay menor cantidad de materia orgánica disponible al disminuir la productividad; de manera que combinados estos dos efectos, la señal no parece ser diferente a la de un régimen húmedo que tiene suficiente materia orgánica. El punto que apoya esta explicación, es que generalmente

fueron algunos mínimos en Mg/Ca los que no aparecen en la escala de grises y no los máximos. Pero también es posible, como sucede con otros indicadores en espeleotemas, que la escala de grises sea, además de un indicador de humedad, también uno de temperatura o incluso uno de intensidad de viento, pues la variación de la fuerza de estos últimos determinaría cuanta materia orgánica es sepultada y susceptible a descomposición, la cual, a su vez pensamos es una de los responsables de la variación en el tono de la estalagmita. Otro factor a considerar es que la escala de grises no es lineal (apartado 2.6.3, capítulo II), por lo que al graficar los valores de los tonos, tenemos respuestas que pueden parecer más o menos intensas de lo que fueron en realidad. Finalmente es necesario comentar que hay varios “valles” y “cimas” de decenas de años en los patrones del registro de la escala de grises que no aparecen en Mg/Ca que recuerdan que este último registro de humedad tampoco es perfecto, pues es influenciado por varios factores además de la humedad como la litología, el tiempo de retención y la fuente del material, entre otros (Fairchild y Treble, 2009).

En cuanto al desplazamiento, es probable que sea generado artificialmente en la forma como se recolectaron los datos. La primera causa tiene que ver con un error instrumental que tenía en el conteo el LA-ICP-MS, el cual consistía en una mala calibración del contador de tiempo. La segunda causa son errores humanos en el montaje de las muestras a analizar y la unión de la información recabada para crear la serie de tiempo tanto en la escala de grises como en Mg/Ca. Y la tercera causa tiene que ver con parámetros instrumentales como la abertura del haz del laser, el cual puede afectar el aspecto temporal de la señal.

Para probar matemáticamente la correlación entre la serie temporal en escala de grises y la de Mg/Ca, usamos la prueba de Kendall, la cual calcula el coeficiente de correlación no paramétrico τ , cuyo papel es cuantificar la relación entre dos descriptores. La prueba de Kendall supone como primer requisito una interpolación de la serie con mayor número de datos, para igualar el número de datos en ambas series.

De manera que la serie de Mg/Ca se interpoló para mantener la temporalidad establecida en la escala de grises. Una vez hecho esto, se realiza la prueba no paramétrica de Kendall, donde la hipótesis nula, H_0 , implica la no correlación, $\tau = 0$, mientras que la hipótesis alternativa, H_A , supone una correlación $\tau \neq 0$. La tabla 6.1 presenta los resultados de la prueba para cada tramo, con su coeficiente de correlación, τ , y su nivel de significancia.

Tabla 6.1. Resultados de la prueba de Kendall para cada tramo donde se compararon los dos indicadores estudiados de JR1a.

Tramo	Tao	Valor p
1	0.0538	< 0.05
2	-0.08918	< 0.05
3	0.0333	< 0.05
4	-0.0040	> 0.05
5	-0.0194	< 0.05
6	-0.0767	< 0.05

La prueba de Kendall arroja en cuatro tramos un coeficiente de correlación no paramétrico Tao negativo, que verifica el carácter de la correlación negativa entre las series. Hay que hacer énfasis en que la importancia de los valores de Tao radica en que éstos son diferentes de cero. De manera que se acepta la hipótesis alternativa; sin embargo, los coeficientes de correlación Tao, son en extremo bajos aunque al mismo tiempo tienen un alto nivel de significancia, con excepción del tramo 4. (Tabla 6.1).

Si bien la prueba de Kendall no parece un argumento concluyente para aceptar una correlación entre estos dos descriptores, hay que recordar que esto se debe en gran parte a la estructura de las series de tiempo, y los diferentes grados de sensibilidad de cada uno de ellos, como se discutió con anterioridad. De manera adicional, como lo muestra la comparación visual de ambos indicadores en las figuras 6.2-6.25, la misma estructura de las series, hace que en varios momentos la señal correspondiente en Mg/Ca aparezca en tiempos anteriores o posteriores a la de la escala de grises, (por las razones antes expuestas), de manera que esto es un factor más para el bajo valor de τ .

Una manera más ortodoxa de comparar las series de tiempo, es comparar las señales correspondientes a ciclos climáticos (Trauth, 2007), para lo cual realizamos un análisis de espectro cruzado (Figura 6.27). Dicho espectro cruzado requiere que los elementos de la serie temporal estén a intervalos de tiempo iguales por lo que es necesario interpolar la serie. Con la finalidad de optimizar la presentación de datos, obtuvimos el espectro sólo para frecuencias menores a 60 ka^{-1} (16 años), utilizando una serie interpolada que tuviera un tiempo de muestreo igual a 10 años.

Las figura 6.27a muestra el espectro cruzado entre la escala de grises y el Mg/Ca de JR1a, mientras que la figura 6.27b muestra la coherencia, la cuál es un número real entre 0 y 1, donde 0 indica la no correlación y 1 la máxima correlación entre dos series de tiempo $f(t)$ y $g(t)$; en este caso la escala de grises y Mg/Ca, en la frecuencia ν [Trauth, 2007]. Las frecuencias señaladas en el espectro cruzado tienen una coherencia mayor a 0.3, exceptuando la señal, cuyo periodo es de 217 años, que tiene una coherencia de 0.05, que sin embargo es la segunda señal de mayor potencia. La señal de mayor potencia [la primera en aparecer leyendo de izquierda a derecha], cuya coherencia está entre el 0.1 y el 0.2, está compuesta en realidad por señales cuyos periodos son de 1137, 1279, 1462 y 2047 años. Lo anterior indica que, aunque la escala de grises y la relación Mg/Ca presentan diferencias aparentes en estructura, ambos indicadores contienen la misma información climática a escala sub-centenal, mas no sub-anual.

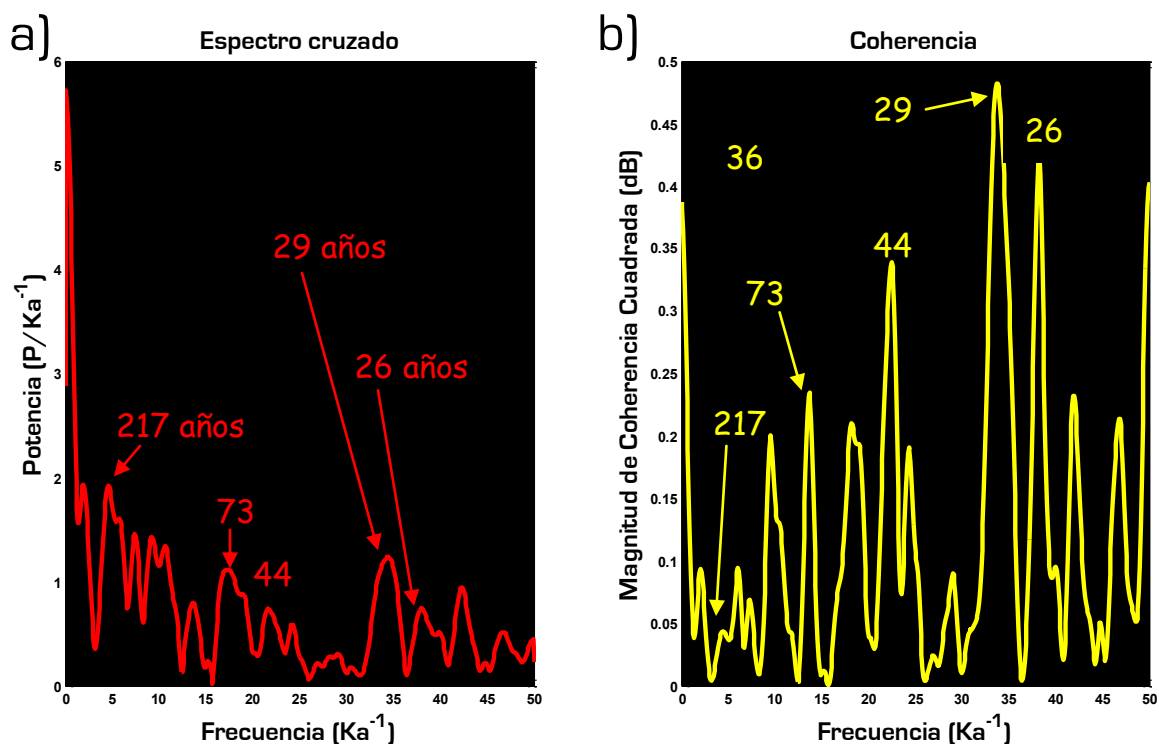


Figura 6.27. a) Espectro cruzado de las series en escala de grises y de la relación Mg/Ca de JR1a. b) La Coherencia de estas series muestra el nivel de correlación de cada una de las frecuencias. Es graficada en escala logarítmica por lo que sus unidades están dadas en decibeles (dB). Los índices indican la duración del periodo de la frecuencia en años para las señales con un nivel de coherencia mayor a 0.3, exceptuando la señal de 217 cuya coherencia es de 0.05.

6.3 Causantes del color analizados por microscopio

Con el fin de conocer la naturaleza del bandeo era necesario observar al microscopio electrónico indicios en la mineralogía o en la textura que confirieran esta cualidad.

Observamos el tramo 1-I y el tramo 1-II y ante el hecho de que la muestra visualmente presenta una textura homogénea (Figura 6.28). Elegimos 15 puntos a lo largo de los dos pedazos del tramo1 (Figura 6.29), donde se analizó la presencia de CaO , MgO y SiO_2 , en zonas alrededor de mínimos locales en la escala de grises, con el fin de encontrar alguna diferencia. Al mismo tiempo se buscó ver si la variación de SiO_2 era congruente con la tonalidad. De serlo, serían las arcillas las responsables de los tonos oscuros en la estalagmita.

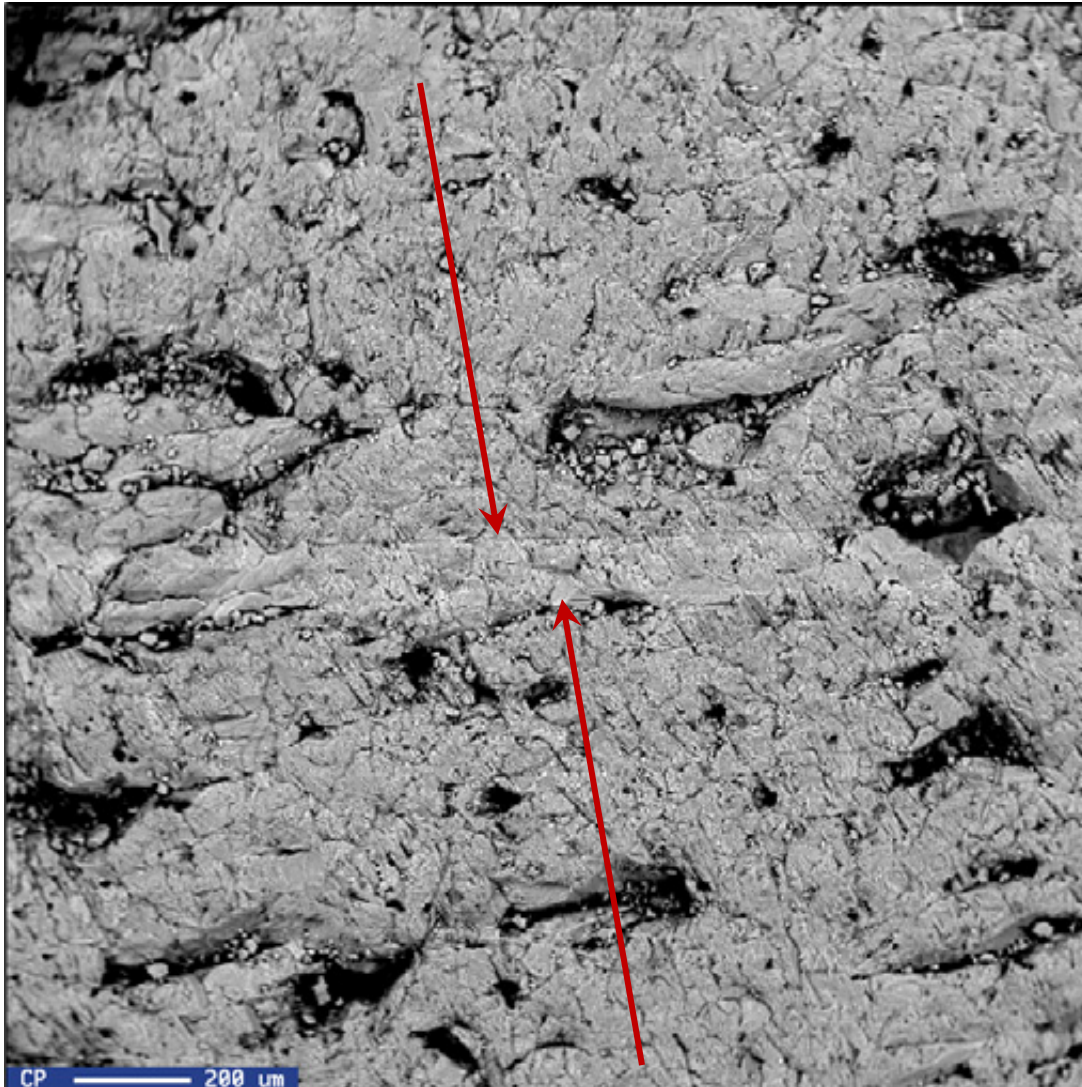


Figura 6.28. Imagen del punto 15 (señalado en la siguiente figura) del tramo 1 de JR1a. Las flechas señalan los límites inferior y superior de la franja por donde se realizó la ablación con el Laser en el análisis por LA-ICP-MS.

La tabla 2 muestra que no hay correlación entre la variación en la tonalidad y la cantidad de SiO_2 . Incluso hay puntos como el 8 y 13, de tonalidad relativamente oscura, cuya cantidad de silicio es nula.

Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

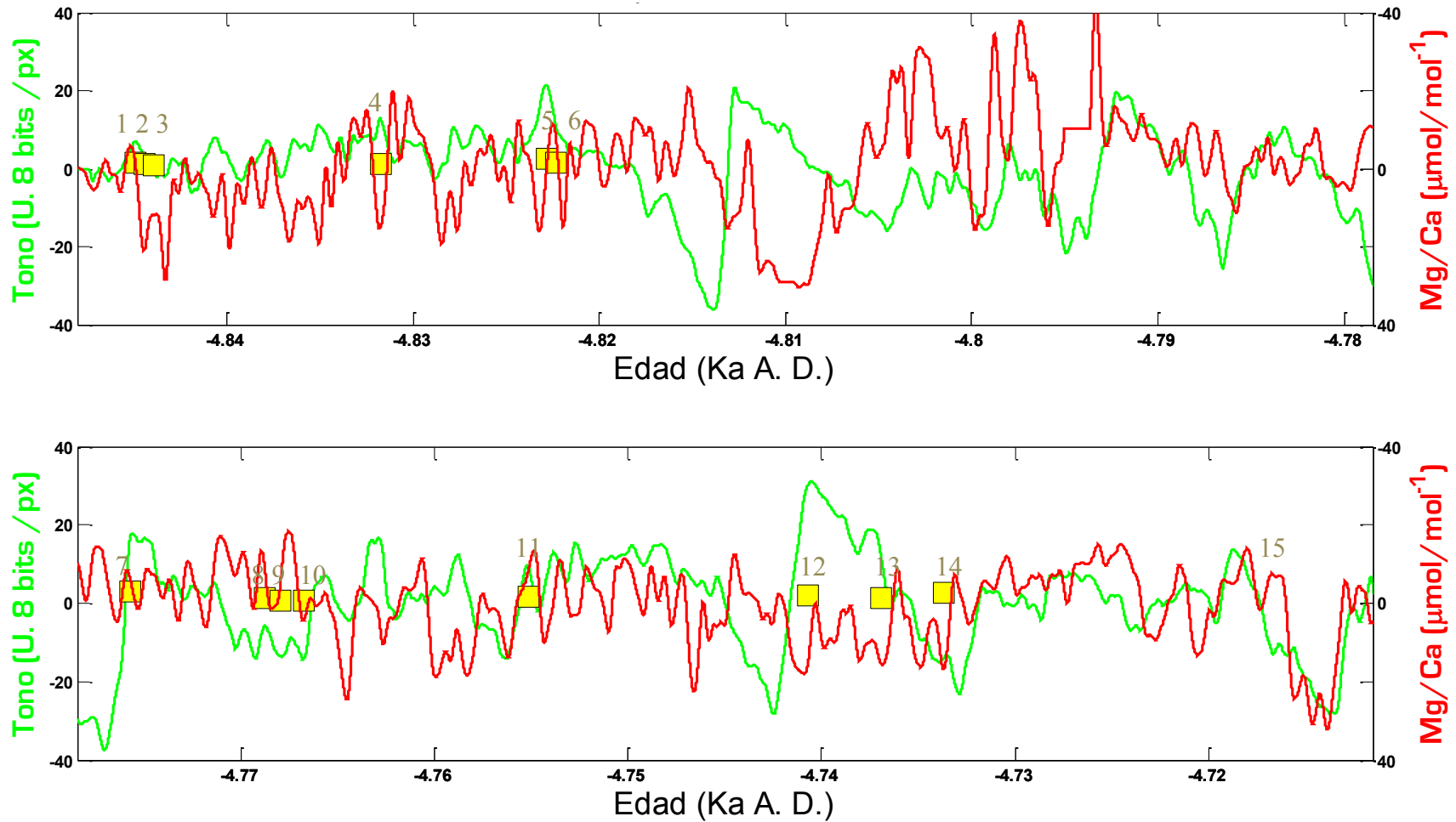


Figura 6.29. Puntos sobre el tramo 1 (en amarillo) graficados sobre la serie de tiempo de escala de grises (verde) y Mg/Ca (rojo, el eje “y” está invertido), que se vieron y analizaron al microscopio electrónico de barrido. Los índices arriba de los cuadros indican el número asignado a cada punto.

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

Tabla 6.2. Mediciones hechos por MIB sobre 15 puntos, registraron la abundancia r relativa de CaO, MgO y SiO₂, comparadas con los valores filtrados de tonalidad y Mg/Ca.

Punto	Distancia (cm)	CaO (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	tonalidad	Mg/Ca
1	0.1596	97.118	0.868	1.517	7.0548	0.002880
2	0.1878	97.137	0.954	1.27	3.4831	0.011820
3	0.2111	99.227	0.000	0.773	1.3337	0.006417
4	0.8552	98.129	0.645	1.225	12.4340	0.006330
5	1.3197	96.65	0.792	2.557	21.4700	0.005084
6	1.3453	96.884	0.261	1.462	11.5450	0.000574
7	3.7916	96.864	0.000	2.901	16.2100	0.001379
8	4.1578	98.087	0.000	1.453	-5.7766	0.001554
9	4.2015	98.461	0.620	0.813	-13.4930	0.008558
10	4.2643	98.809	0.037	0.595	-14.2350	0.004637
11	4.8717	97.559	0.350	1.739	9.6621	0.001434
12	5.6301	97.465	0.000	2.03	30.1000	0.000846
13	5.9987	97.442	0.000	2.558	-14.0710	0.002350
14	6.6301	98.207	0.023	1.487	3.3222	0.003298
15	7.1902	98.025	0.000	1.975	1.8315	0.004368

Por eliminación, la variable que queda como posible responsable, es la materia orgánica. Si bien esta técnica, por el nivel de pulido, no permite verla directamente, sí sería capaz de detectarla por la forma del espectro, ya que su presencia se vería en forma de ruido. Hecho no registrado en ninguno de los puntos estudiados (Figura 6.30).

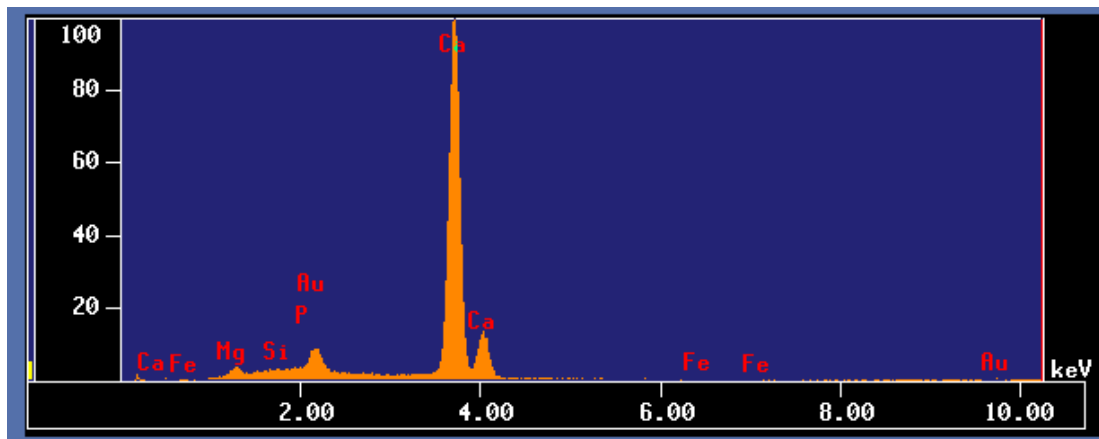


Figura 6.30. Señales de los elementos presentes en un punto particular. Nótese la inexistencia de una panza de ruido, indicadora de materia orgánica.

Estudio de los factores que establecen la tonalidad en la escala de grises

De esta manera, es necesario replantear lo que pensábamos acerca de las variables que causaban los diferentes tonos en la estalagmita. Recapitulando, sabemos por inferencia al no encontrar presencia significativa de sílice que no hay arcillas. También pensamos con base a la ausencia de ruido significativo en el análisis por MIB, que tampoco hay materia orgánica en gran cantidad.

Ante este panorama tomamos un pedazo sobrante en el proceso de cortado de JR1a e hicimos una lámina delgada con el fin de observar su textura en el microscopio petrográfico. La lámina muestra que la textura de JR1a es simple, al ser clasificada en el nivel dos, en el orden de los multi-agregados y en particular de los cuerpos minerales tufáceos (ver capítulo 2, pag.20), lo que indica un crecimiento masivo rápido. Tomando en cuenta que este pedazo era parte de un tramo que estaba entre los primeros 10 cm cercanos a la base, coincide con lo aportado por la tasa de crecimiento, que indica una tasa alta para estos tramos.

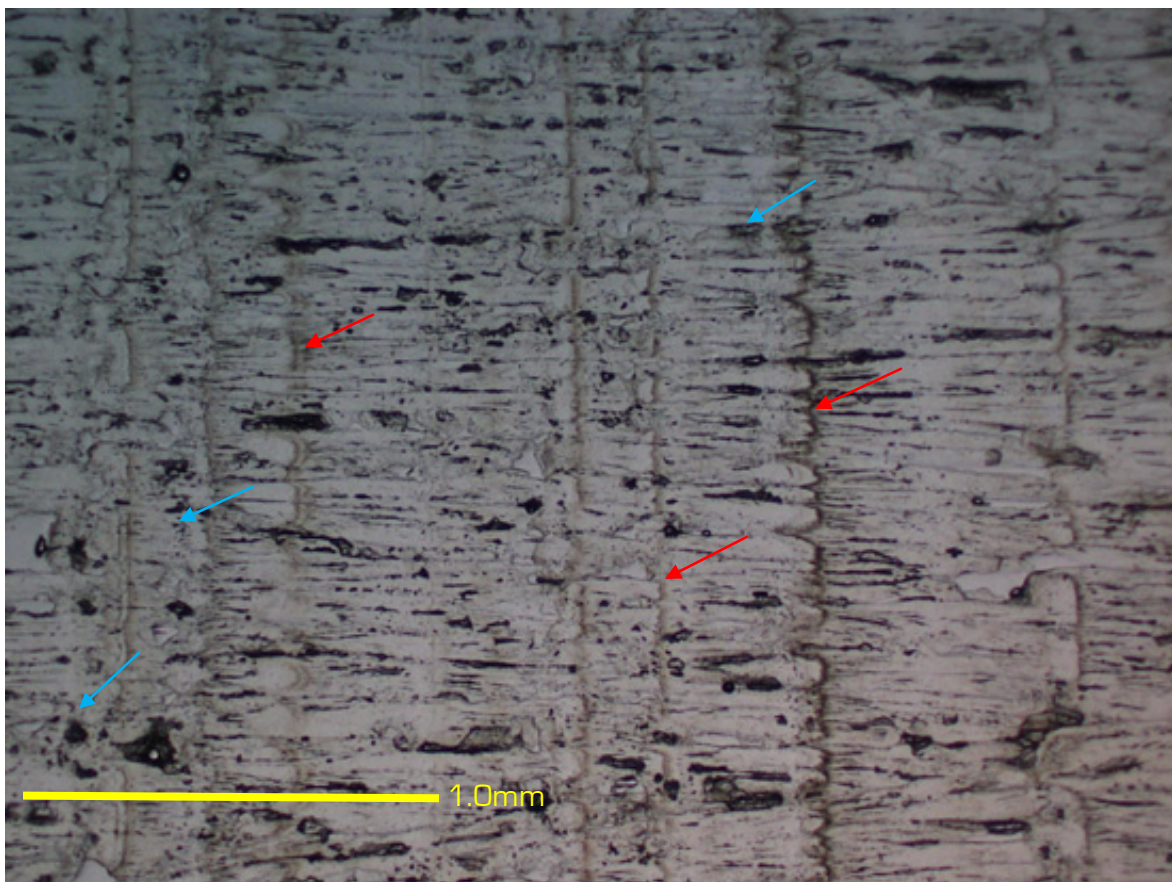


Figura 6.31. Fotomicrografía de la lámina delgada de un pedazo de JR1a donde se ve claramente el bandeo. Las flechas rojas indican el bandeo producido por un material pardo, mientras que las flechas azules indican un bandeo producido por porosidades alineadas que serían ortogonales al

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

En primera instancia pudimos ver claramente el bandeo (Figura 6.31), el cual estaba dado por líneas paralelas pardas. Al mismo tiempo observamos una gran cantidad de porosidades alineadas que son también paralelas a estas líneas pardas y que al verse más oscuras en la escala de grises, serían también responsables del bandeo.

Es probable que la existencia de estos poros sea causado por inclusiones fluidas como se ha descrito en otros trabajos (Boch y Spötl, 2008), mientras que las líneas pardas estarían dadas por materia orgánica (Baker *et al.*, 1999; McGarry y Baker, 2000; Perrette *et al.*, 2005).

De manera que se seleccionaron tres zonas, observadas al microscopio petrográfico, donde existía presencia de estas líneas pardas para su análisis en el Microscopio electrónico de barrido, los cuales se marcaron con tinta (figuras 6.32 a, 6.33 a y 6.35 a)

Tabla 6. 3. Mediciones he chos por Microscopia electrónica de barrido sobre puntos en la lámina delgada que mostraban presencia de líneas pardas paralelas, los cuales registraron la abundancia relativa de CaO, MgO y SiO₂.

Zona	Punto	CaO (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	FeO (%)
1	derecha	97.267	0.000	0.733	0.000
1	izquierda	98.921	0.000	0.738	0.341
2	-	98.61	0.501	0.856	0.033
3	derecha	99.152	0.000	0.848	0.000
3	izquierda	97.939	0.000	1.575	0.000

Las figuras 6.32 b, 6.32 c, 6.33 b y 6.35 b muestran las imágenes obtenidas por el microscopio electrónico de barrido, donde se aprecia de nuevo una textura uniforme, que indica también una composición química uniforme. Se analizaron algunos puntos en estas zonas, (Tabla 6.3), cuyos resultados muestran que no había presencia de sílice (por lo tanto arcillas), ni óxidos de hierro. De manera que estos definitivamente no son los responsables de las líneas pardas. De nuevo, el espectro no mostró el ruido originado por presencia de materia orgánica (Figura 6.36).

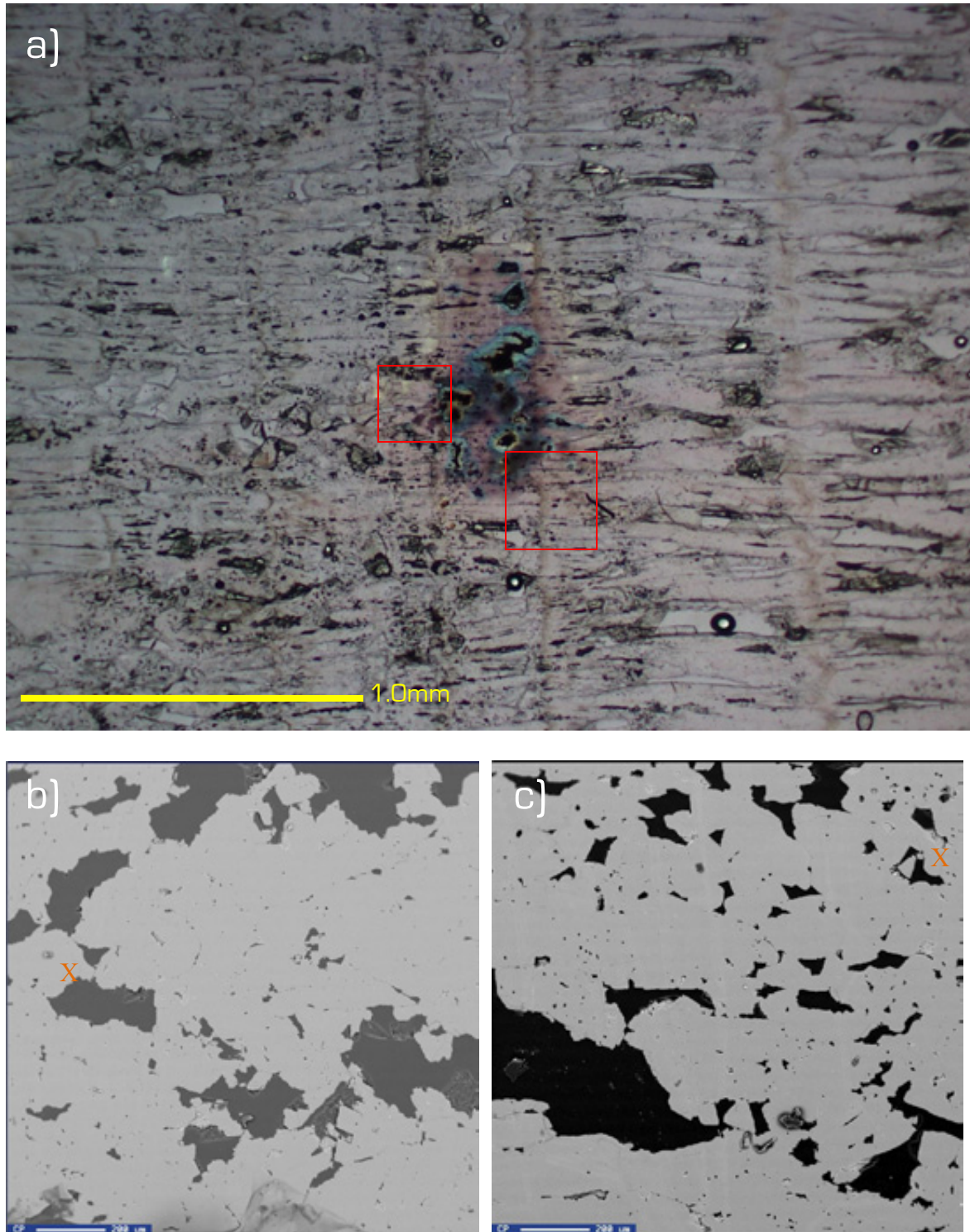


Figura 6. 32. Zona 1 de la lámina delgada. a) Fotomicrografía vista con el microscopio petrográfico. Los cuadros rojos indican las zonas vistas al MIB. b) Imagen al microscopio electrónico de barrido, señalada en el cuadro rojo de la derecha en a). c) Imagen al microscopio electrónico de barrido señalada en el cuadro rojo de la izquierda en a). Las imágenes del MIB indican una composición química uniforme. La X indica el punto donde se realizó el análisis de elementos por MIB.

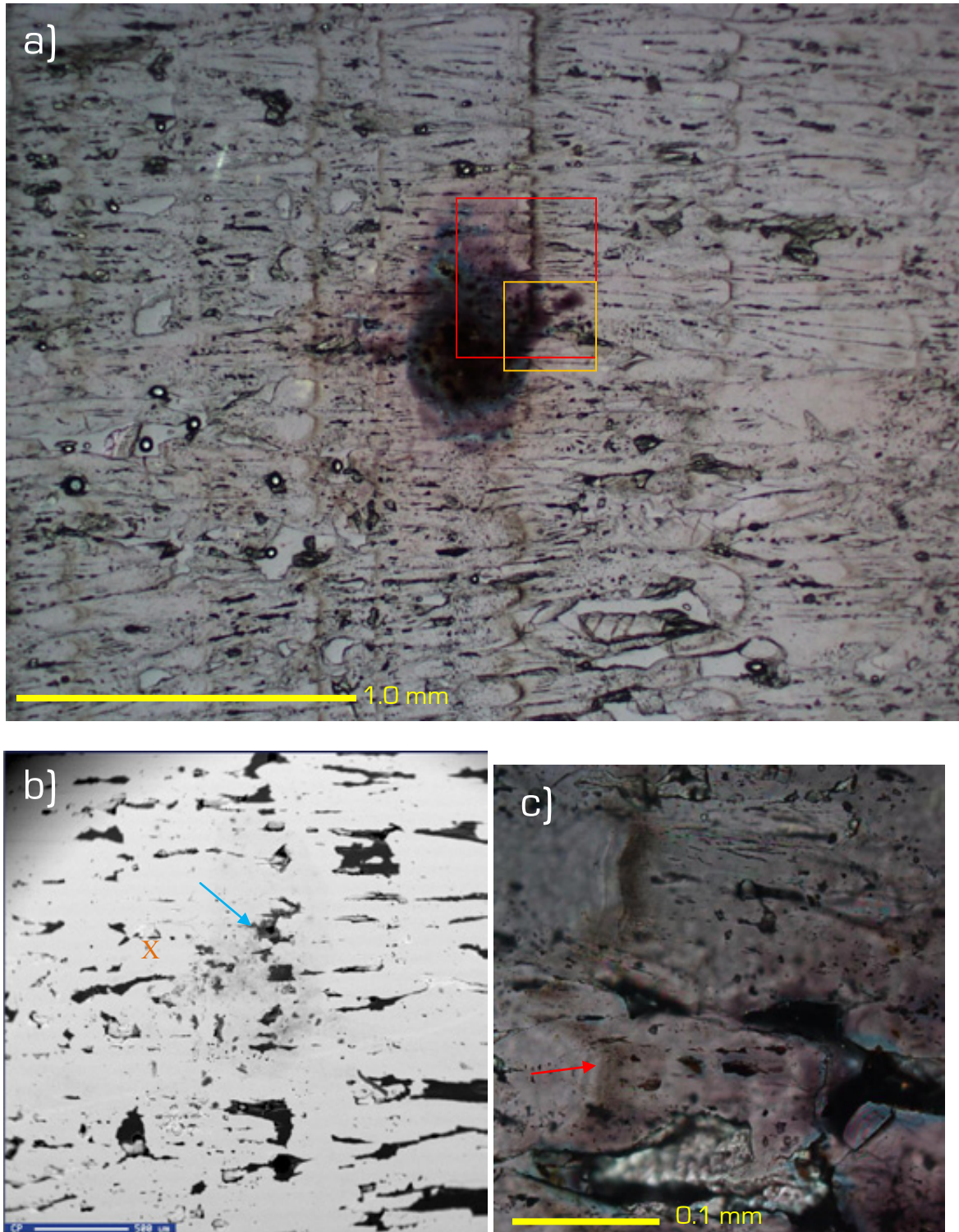


Figura 6. 33. Zona 2 de la lámina delgada. a) Fotomicrografía vista con el microscopio petrográfico. El cuadro rojo indica la zona vista al MIB. b) Imagen al microscopio electrónico de barrido, señalada en el cuadro rojo en a). La composición química es uniforme, sin embargo se observa el alineamiento de las porosidades (flecha azul). c) Imagen al microscopio petrográfico señalada en el cuadro amarillo en a) observada en campo oscuro. La línea parda (flecha roja) no es una frontera de grano, ni presenta estructura mineral, por lo que presumiblemente es materia orgánica. La X indica el punto donde se realizó el análisis de elementos por MIB.

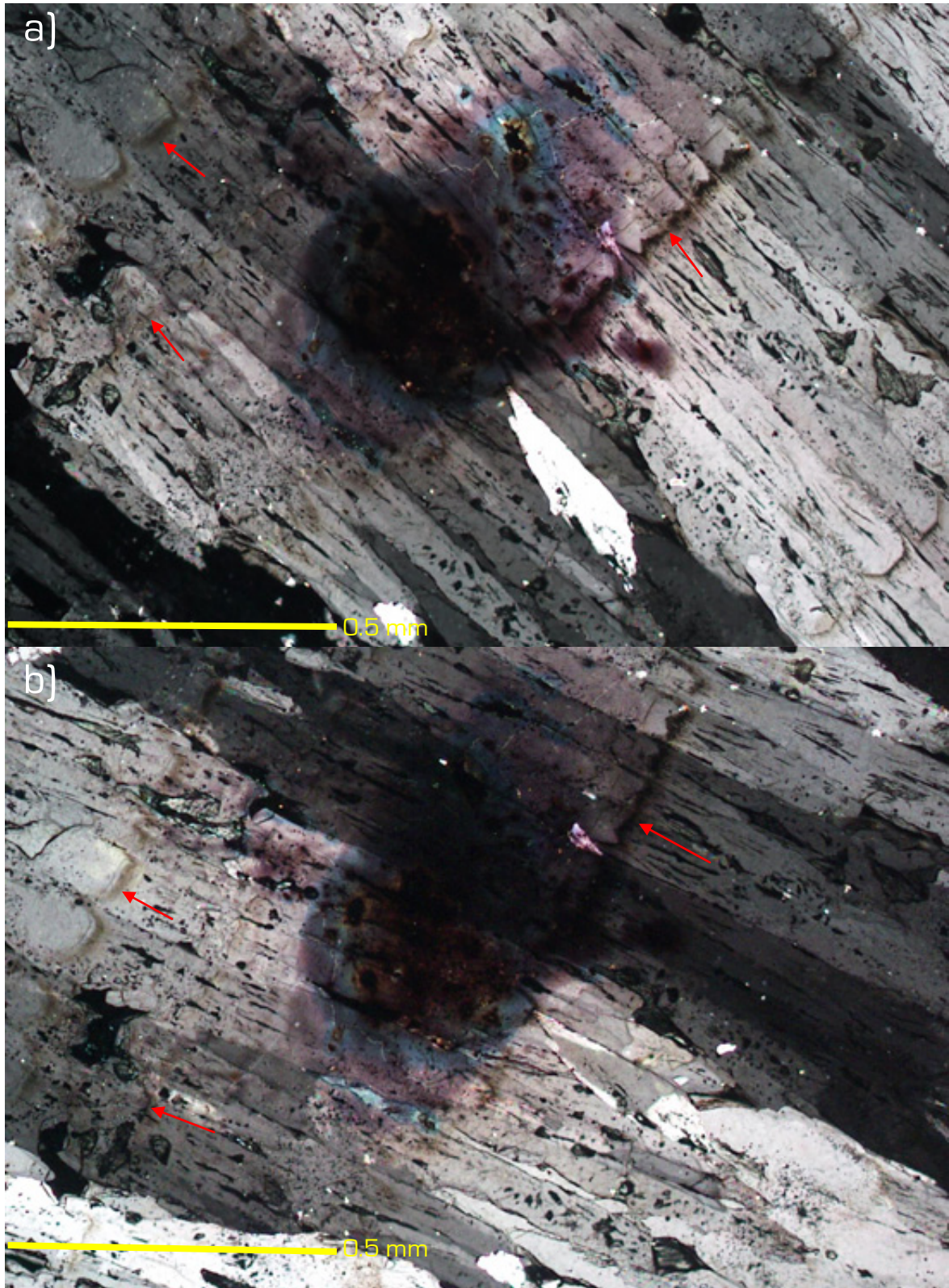


Figura 6.34. Zona 2. a) Fotomicrografía en campo oscuro donde se ve que el bandeo producido por líneas pardas (señaladas en rojo) no presenta extinción, por lo que se descarta la posibilidad de que fueran hiato, micrita o esparita. b) Fotomicrografía tomada en campo oscuro, en otro sentido donde se observa el mismo comportamiento.

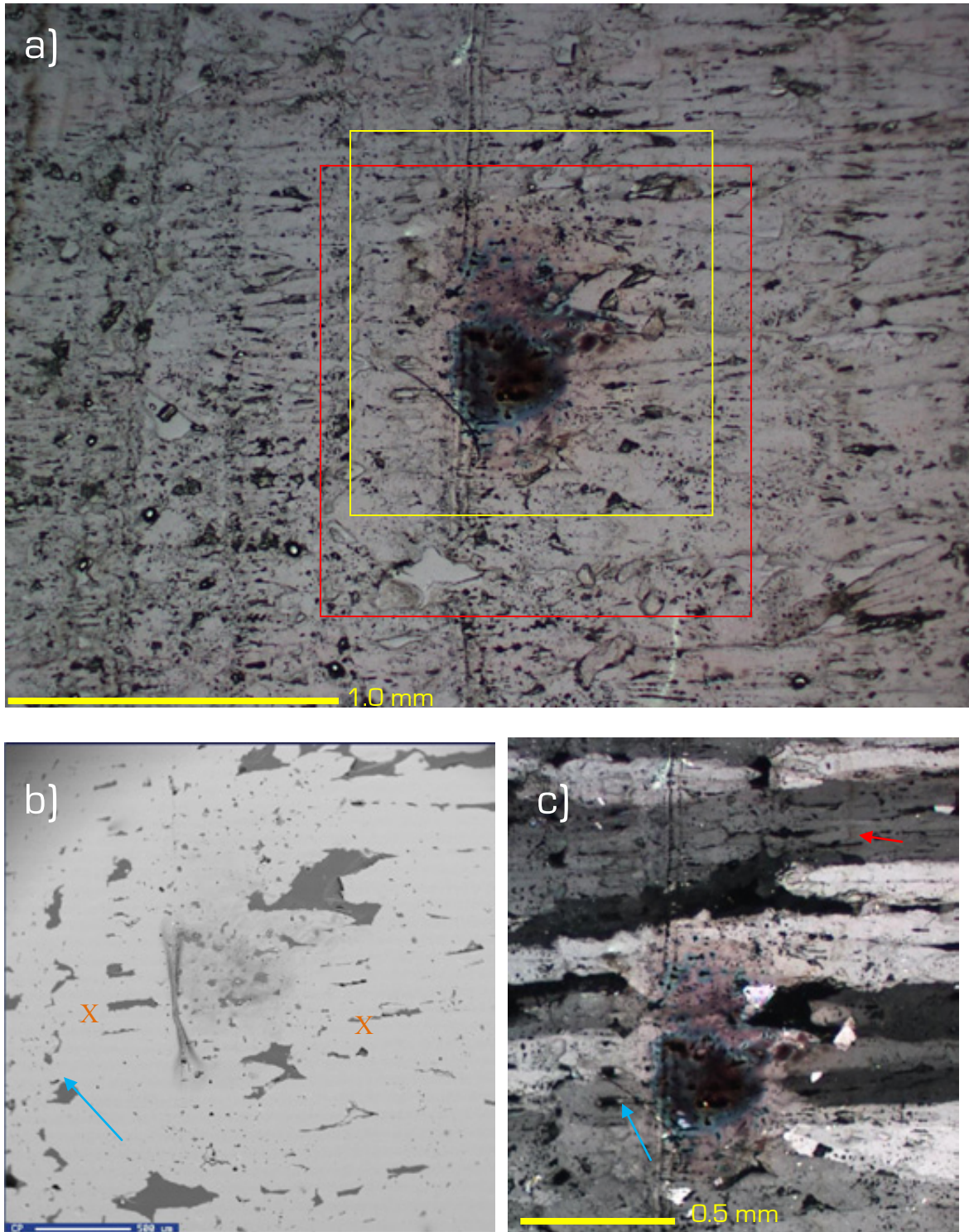


Figura 6. 35. Zona 3 de la lámina delgada. a) Fotomicrografía vista con el microscopio petrográfico. El cuadro rojo indica la zona vista al MIB. b) Imagen al microscopio electrónico de barrido, señalada en el cuadro rojo en a). La composición química es uniforme, se observa el alineamiento de las porosidades (flecha azul). c) Imagen al microscopio petrográfico señalada en el cuadro amarillo en a) observada en campo oscuro. Una línea parda tenue (flecha roja) no presenta extinción, indicando que no se trata de micrita. Se observa también el alineamiento de las porosidades (flecha azul). La X indica el punto donde se realizó el análisis de elementos por MIB.

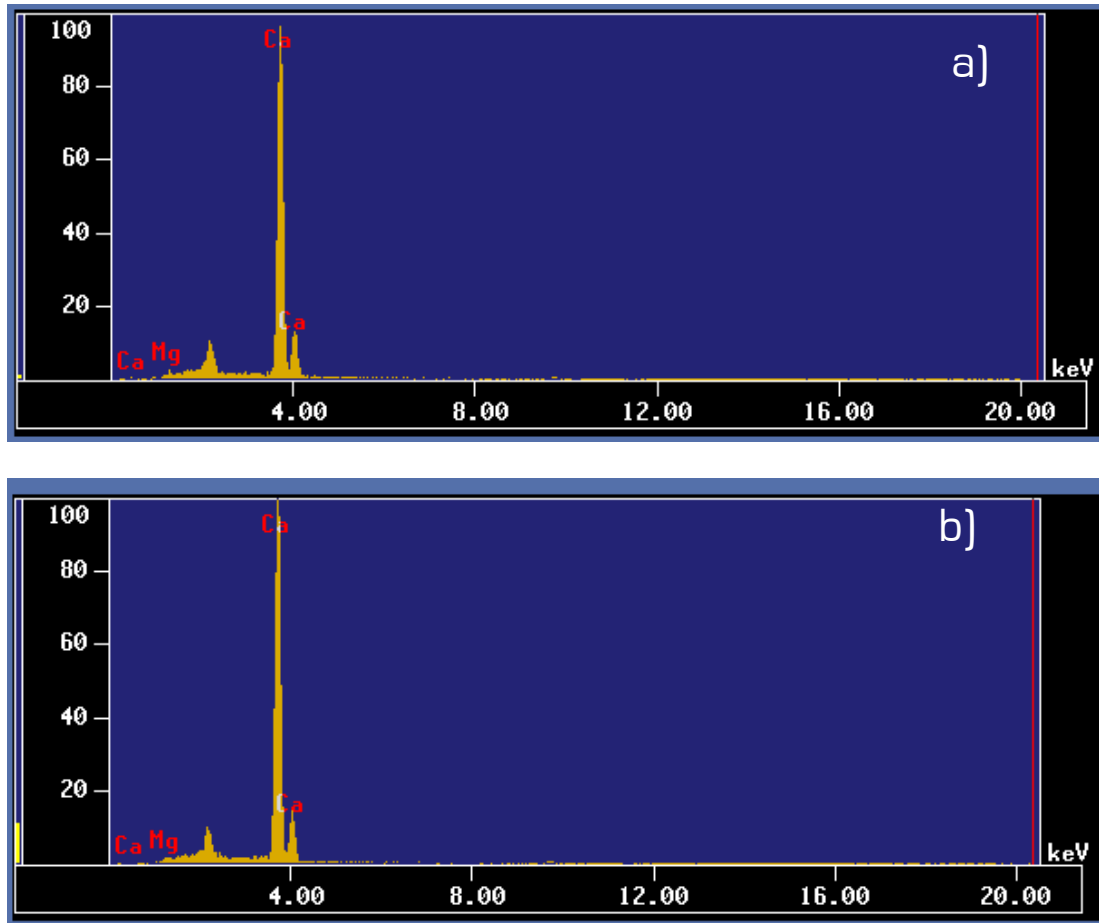


Figura 6.36. Espectro de los elementos presentes en los puntos analizados en la zona tres de la lámina delgada. a) El punto de la derecha. b) El punto de la izquierda. Nótese de nuevo la inexistencia de una panza de ruido, indicadora de materia orgánica.

Esto sugiere que el material pardo debía tener la misma composición química que el resto de la estalagmita, como lo sería si fuera micrita o microesparita. Por lo que se observaron estas líneas en campo claro y oscuro al microscopio petrográfico.

La figura 6.33 c, 6.34 b y 6.35 c muestran las líneas pardas en campo oscuro. Ninguna extinción es observada, por lo que la presencia de microesparita queda descartada. Tampoco se observan puntos iridiscentes al girar la platina, lo que es indicativo de que no se trata de micrita. De igual manera estas figuras aunadas a la 6.33 a en campo claro no muestran una estructura parecida a la micrita o la microesparita, las cuales por otro lado serían a su vez señal de hiato.

De hecho, la línea parda tendría el aspecto de materia orgánica humificada (figura 6.33 c), pues tampoco se ve como materia orgánica normal, la cual es opaca, Nótese como en la figura 6.33c no aparece en una frontera de grano.

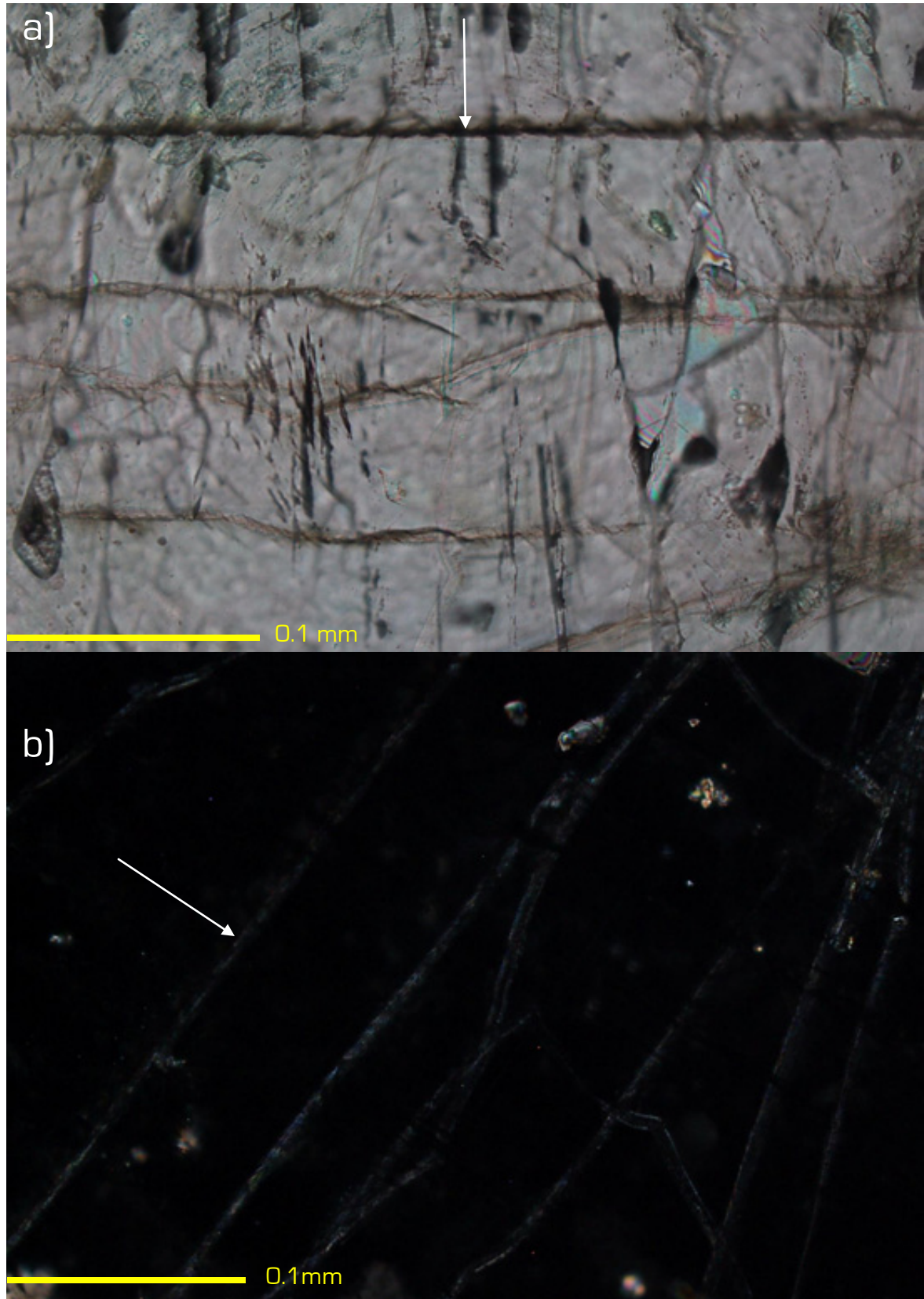


Figura 6. 37. Zona en la lámina del gada donde se observa la presencia de óxidos. A veces, formando una banda inmersa en un monocristal (flecha blanca). a) En campo claro. b) En campo oscuro.

A pesar de lo anterior, la misma lámina delgada muestra pocas zonas donde el bandeado si estaría dado por oxidos² (Figura 6.37), las cuales estarían inmersas en el cristal, De manera que, resumiendo, queda descartado que las zonas de tonalidad oscura, (el bandeado), sean causadas por un mayor número de fronteras de grano, lo que implicaría cristales más pequeños y de orientaciones más variadas. La naturaleza del bandeado es pues conferida principalmente por materia orgánica humificada y porosidades.

6.4 Implicaciones climáticas de la tasa de crecimiento y las tendencias

En el capítulo 4, punto 4.5 vimos la tasa de crecimiento de JR1a, en primera instancia es claro que una mayor tasa de crecimiento implica una mayor cantidad de agua que disocia y transporta calcita al interior de la cueva. Por lo que se puede suponer una mayor humedad para la cueva de Los Riscos conforme uno se remonta al pasado. Ahora bien la tasa de crecimiento es función de la cantidad de agua que gotea, sin embargo ésta última no necesariamente es función de las condiciones climáticas. Nadie que trabaja con estalagmitas utiliza la tasa de crecimiento como un indicador climático, pues hay muchos otros factores hidrogeológicos afectando la cantidad de goteo y, por ende, la tasa de crecimiento de la estalagmita. Es precisamente a lo que uno se refiere con la "plomera" de la cueva, que tanto fluye el agua en el epikarst es una función de que tan accesibles están las fracturas de la roca al paso del agua, y eso es una función de la actividad de los suelos, configuración del drenaje, tectonismo, clima, intemperismo, etc. Por lo tanto, la posibilidad de que un cambio en la configuración de la "plomera" de la cueva fuera el responsable de la disminución en la tasa de crecimiento es concebible.

El hecho de que Jalpan se encuentra en una margen pasiva, aunado a que desconocemos eventos geológicos recientes en las inmediaciones de esta zona, nos hacen pensar que un cambio en la tectónica local es poco probable. De manera que el cambio en la tasa de crecimiento se debe a los otros factores. Sobre esto se puede inferir al comparar la tasa de crecimiento con los datos de tendencia de Mg/Ca, que la disminución en la tasa de crecimiento se debe no solo a un cambio en la configuración del drenaje y la actividad de los suelos, sino también a que la región localmente se volvió más seca.

Ahora bien, los valores reportados para una estalagmita de alta latitudes, oscilan cerca de los 20 $\mu\text{m}/\text{año}$ (Fairchild *et al.*, 2006), lo cual contrasta con la tasa de crecimiento de JR1a, sobre todo para los primeros dos siglos donde la tasa de crecimiento era de 524.79 $\mu\text{m}/\text{año}$.

² www.gly.uga.edu/speleoatlas/SAindex1.html.

Esta diferencia se explica debido a que esta estalagmita se ubica en una zona tropical de baja latitud, donde el clima es per se más húmedo. Así, se han citado estalagmitas de regiones húmedas o subhúmedas con tasas de crecimiento comparables, como lo son; la tasa de la cueva del Chilibrillo, en el este de Panamá, con $422 \mu\text{m}/\text{año}$; (Lachniet *et al.*, 2004) la tasa de la cueva de Coyoxochico, con $740 \mu\text{m}/\text{año}$ (Hernández-Mendiola, 2008) ó la de la gruta de Las Karmidas con $\sim 360 \mu\text{m}/\text{año}$ (Aliaga Campuzano, 2009) ambas en el norte de Puebla, México.

Ahora bien, como señalemos al principio de este capítulo, la tendencia de Mg/Ca indica en general un cambio a condiciones de menor humedad a lo largo de los últimos seis milenios para la zona donde está ubicada la cueva (figura 6.1). Contrariamente la tendencia de la escala de grises indica a lo largo del Holoceno superior un aumento en la humedad (figura 5.10, capítulo V). De lo discutido a lo largo de este capítulo, podemos inferir que la escala de grises no solo está establecida por la humedad, sino (además de los diversos parámetros instrumentales para obtener la información guardada) por variables como la cantidad de materia orgánica disponible y las condiciones para crear porosidades, pues son estos factores los que confieren el tono y bandeado. Así no es del todo sorprendente que la tendencia de la escala de grises indique un cambio a mayor humedad, pues esta es el resultado de una menor cantidad de materia orgánica co-depositada con la calcita. Cantidad que disminuye al haber menor área donde depositarse, pues la tasa de crecimiento tiende a descender a lo a lo largo del Holoceno superior. Esto confirma que la tendencia como indicado paleoclimático debe tomarse con cuidado, pues puede estar en función de la tasa de crecimiento, a su vez esto también indica la conveniencia de la eliminación de la tendencia para comparar las señales.

Capítulo VII

Análisis espectral

بما البحر في تجري التي الفلك و النهار و الدليل اخ تلاف و الأرض و السماوات خلق في إن
كل من في يها بت و موتها بعد الأرض به فأحيا ماء من السماء من الله أنزل ما و الناس يذفع
¹ يعقلون ل قوم آيات الأرض، و السماء بين المسخر السحاب و الريح ت صريف و دابة
El Coran. AL Baqara 2 : 164

La meta principal de esta tesis, tuvo como propósito buscar ciclicidades climáticas en la serie de tiempo generada a partir de la escala de grises. Para ello se utilizaron los métodos de análisis de series de tiempo, como el espectro de potencias de Blackman-Tukey, el espectro de potencias de Lomb-Scargle (EPLS) y las onduletas.

7.1 Periodograma Lomb-Scargle

Aunque inicialmente utilizamos el método de Blackman-Tukey (Blackman y Tukey, 1958) para calcular el espectro de potencias, este método no será reportado en el presente capítulo, porque tiene dos desventajas. La primera, es que requiere datos espaciados a intervalos iguales de tiempo y la segunda, es que no nos indica el nivel de significancia de cada señal.

Ya que nuestros datos no están recolectados a intervalos de tiempo iguales y en vista de que preferimos no interpolar, comentaremos nuestro trabajo por el método de Lomb-Scargle (Lomb, 1972; Scargle, 1989), el cual requiere tanto el vector que contiene la temporalidad de la señal, como el vector que contiene ésta. En nuestro caso dicho proceso lo llevamos a cabo utilizando Matlab®, con el código publicado por Brett Shoelson en <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange>, el cual también aparece en (Trauth, 2007).

Para optimizar el proceso y tiempo de cálculo, buscamos inicialmente, sólo aquellas ciclicidades cuya temporalidad fuera mayor a 50 años, que es la incertidumbre en el fechamiento para la mayoría de los puntos analizados. Esto lo realizamos para las dos series de JR1a. La Figura 7.1a muestra el espectro de potencias (en amarillo) a partir de la serie de escala de grises, con su correspondiente probabilidad (en rojo).

¹ En la Creación de los cielos y de la Tierra y en la diferencia entre la noche y el día, en la nave que surca el mar con aquello que beneficia a la gente, en el agua que hizo Dios descender de los cielos, con la cual vivifica la tierra tras haber estado muerta, diseminando por ella todo tipo de animales; en la variación de los vientos y en las nubes situadas entre el cielo y la tierra, hay, ciertamente, señales para la gente que razona. Tr. Raúl González Bórnez.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

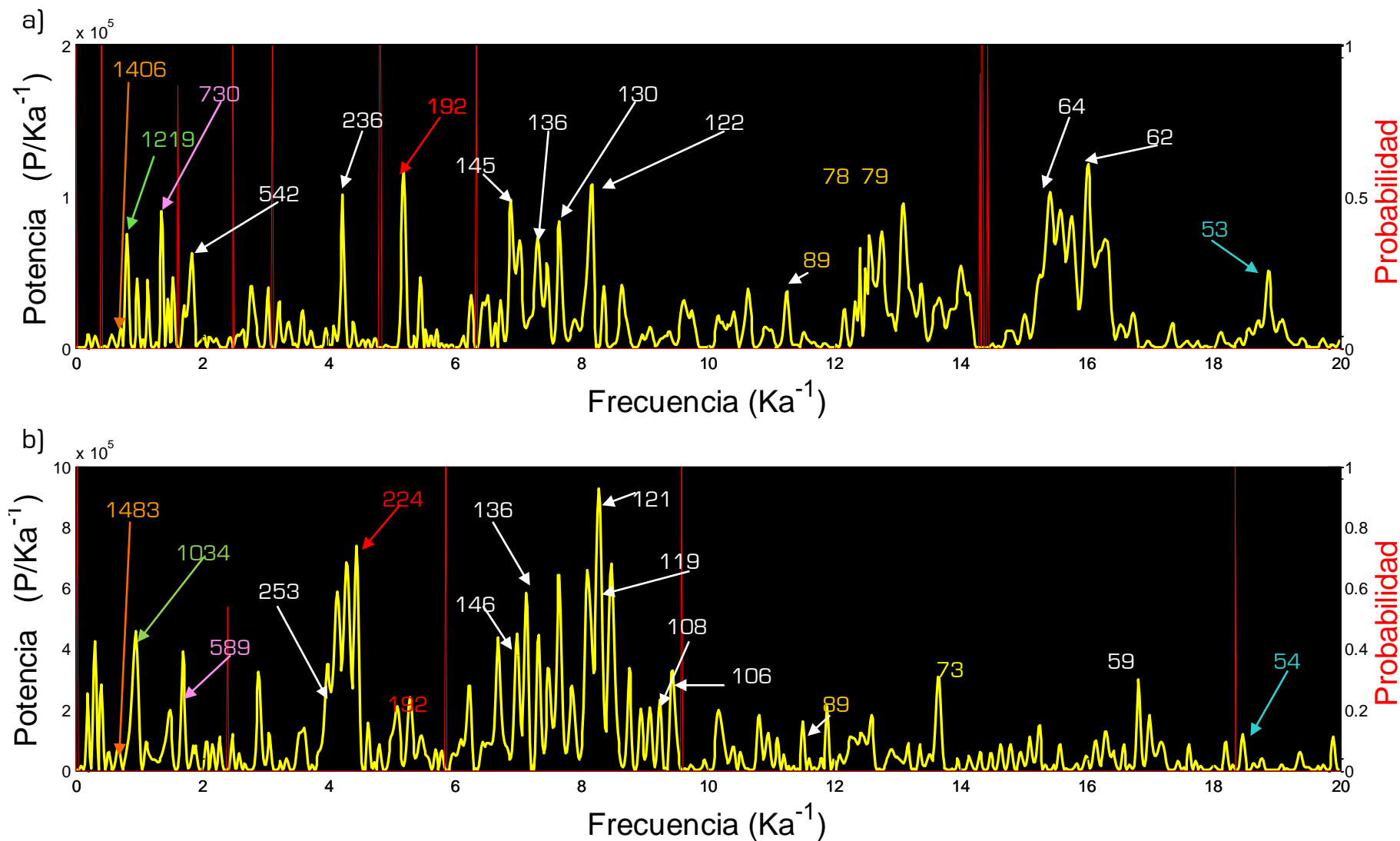


Figura 7.1. Espectro de potencias Lomb-Scargle para a) la serie de tiempo de la escala de grises de JR1a, b) para la serie de tiempo e Mg/Ca de JR1a. Las señales muestran la edad que les corresponde, mientras que el color del índice indica el ciclo al que se les asocia, ver Tabla 7.1.

Análisis espectral

Esta última indica la probabilidad de que la hipótesis nula sea falsa, de manera que una baja probabilidad, indica un alto nivel de significancia. El nivel de significancia que se pidió como mínimo fue de 0.995. Aun así, la mayoría de las señales presentadas, las cuales tienen frecuencias menores a 20 Ka^{-1} [mayores a 50 años], son significativas.

Tabla 7.1. Señales del EPLS a partir de la escala de grises y de Mg/Ca de JR1a. Donde se observa la frecuencia a la que aparece la señal, su correspondiente periodo, así como el ciclo asociado. El color indica un mismo fenómeno asociado a la producción de la señal.

Ciclo asociado	Escala de Grises		Mg/Ca	
	Frecuencia [Ka^{-1}]	Periodo [años]	Frecuencia [Ka^{-1}]	Periodo [años]
PDO	17.87	53	18.45	54
CGM-VS	16.01	62	16.80	59
Berkes-Gleissberg	13.09	76	13.64	73
	12.75	78		
Gleissberg	11.25	89	11.21	89
CGM-VS			9.42	106
CGM-VS	7.17	122	7.24	121
CGM-VS	7.66	131	7.82	128
CGM-VS	7.31	137	7.31	137
CGM-VS	6.89	145	6.83	146
Suess	5.2	192	4.47	224
CGM-VS			3.95	253
C. P.			1.7	590
C. P.	1.37	731		
?			0.96	1034
?	0.82	1219		
Bond	0.72	1406	0.67	1483
Hallstattzeit			0.42	2386

La Tabla 7.1 muestra las señales en el espectro de potencias Lomb-Scargle para la serie de escala de grises, donde se ve la frecuencia a la que aparecen en Ka^{-1} , su correspondiente temporalidad en años y la duración del ciclo asociado (esta última sólo para los ciclos bien identificados y/o de mayor potencia). Cabe destacar que la naturaleza de varios ciclos observados en diferentes archivos paleoclimáticos e instrumentales es todavía motivo de debate en la comunidad científica, sobre todo aquellos cuya naturaleza es atribuida a un forzamiento solar (Hoyt y Schatten, 1997; Bond, 2009).

Así tenemos, el ciclo de Bond, a 1406 años, correspondiente a cambios en la circulación atmosférica cerca de Groenlandia (y que influye en todo el Atlántico Norte) (Bond *et al.*, 1997). Dicho ciclo ha sido observado en espeleotemas del Holoceno, tanto en el SW de Estados Unidos de América, (Cueva Pink Panther, New Mexico) (Asmerom y Polyak, 2004), como en Sauerland, Alemania (cueva de (Niggemann *et al.*, 2003). El ciclo de Suess que corresponden a cambios en la radiación del sol (Delmonte, 2003), debido a su dinámica interna es observado también en las espeleotemas antes mencionadas (aunque sólo en la escala de grises de Alemania, y no en el $\delta^{18}\text{O}$), además de estar registrado en una estalagmita del Holoceno proveniente del sur de Omán (cueva Qunf), (Fleitmann *et al.*, 2003). La ausencia del ciclo de Bond en la estalagmita de Omán, y su presencia en los archivos del SW americano (Asmerom y Polyak, 2004), Alemania (Niggemann *et al.*, 2003), y en JR1a, confirman el carácter noratlántico del ciclo de Bond. Sin embargo, aun cuando en el análisis espectral hecho a las estalagmitas de la cueva de Lianhua, en el éste de China, tampoco aparece el ciclo de Bond, el análisis de onduletas aplicado a estas mismas espeleotemas muestra la aparición de las señales de ~130 y ~250 años a un intervalo de ~1500, sugiriendo que están moduladas por una ciclicidad con este periodo (Debret *et al.*, 2009).

Así, se piensa que el ciclo de Bond de 1470 años realmente aparece con una señal débil de 1490 años, acoplada con dos señales de alta intensidad a 1667 y 1190, cuando se aplica un modelo de edades correcto (Clemens, 2005). Esto podría explicar la baja potencia de la señal correspondiente a Bond tanto en la escala de grises como en Mg/Ca (donde aparece a 1483), a la vez que explicaría las señales de 1219 en la escala de grises y de 1034 en Mg/Ca. De igual manera, la teoría que atribuye una naturaleza heterodina a dicho ciclo, explica que pequeñas variaciones en los ciclos centenales que la componen, causarían una gran variación en el ciclo resultante (Clemens, 2005). Esto último explica a su vez por qué hay una mayor coherencia en las periodicidades centenales observadas en los espectros cruzados, que la que se percibe en las milenarias.

Tenemos también el ciclo de Gleissberg (89 años), asociado a cambios en la radiación solar (Braun *et al.*, 2005), pero cuya señal es comparativamente menor. Las señales a los 78 y 79 años, han sido observadas en otros indicadores paleoclimáticos (Dansgaard *et al.*, 1973), dichas señales se piensa serían una variación del este ciclo (Hoyt y Schatten, 1997). El ciclo de Gleissberg es observado en las espeleotemas de Alemania (Niggemann *et al.*, 2003), SW de la Unión Americana (Asmerom y Polyak, 2004), y en Omán (Fleitmann *et al.*, 2003). Como se verá en el siguiente capítulo, dicho ciclo, es señal significativa en los espectros cruzados Blackman-

Tukey entre los archivos de JR1a y los del GISP₂ y entre JR1a y el GRIP (Figura 8.6 a, c, Figura 8.7 a, c).

Hay diversas señales asociadas a la variación en la interacción del campo geomagnético y el viento solar (CGM-VS) (Stuiver y Braziunas, 1989). Las cuales estarán presentes también en las espeleotemas antes mencionadas, además de estar presente la señal de 133 años, en la estalagmita del Holoceno proveniente de la cueva de Shihua, China. Dichas señales, como se verá en el siguiente capítulo, sólo serán significativas en el espectro cruzado Blackman-Tukey entre los archivos de JR1a y la tasa de producción calibrada de ¹⁴C INTCAL04, (Figura 8.8 a, c). Lo que confirma la naturaleza solar-geomagnética de dichas señales.

Además hay una señal que correspondería a periodos cálidos registrados cada 1200 años (Climate Research Committee, 1995). Mientras que la señal de 53 años podría corresponder a la Oscilación Décanal del Pacífico (PDO) (Gershunov *et al.*, 1999). Sin embargo aun cuando se ha registrado que esta variación influye en el norte de México (Pavia, 2004), sería difícil pensar un mecanismo que influyera en la región de Jalpan. Por otro lado, esta señal no aparece en ninguna de las espeleotemas antes citadas.

Existe una señal sólo presente en la escala de grises de JR1a, correspondiente a un ciclo de 731 años que correspondería con la señal de 750 años, la cual sería una componente primaria de la señal de 2400 años, el ciclo de Hallstattzeit (Clemens, 2005). Dicha señal, podemos asumir que es la misma que aparece a los 699 años en el archivo de Nuevo Mexico, (Asmerom y Polyak, 2004).

El ciclo de Suess aparece en el espectro de potencias de Mg/Ca a los 224 años, con una intensidad menor que en la escala de grises. Lo curioso de este hecho radica en que para el archivo de la espeleotema de Sauerland, Alemania, se repitió el mismo efecto, es decir la señal correspondiente al ciclo de Suess sólo fue significativa en la escala de grises y no lo fue para el archivo geoquímico (Niggemann *et al.*, 2003). El ciclo de Gleissberg es de nuevo de relativa baja intensidad, mientras que el ciclo de Berkes-Gleissberg no aparece. También vuelve a aparecer la señal de 52 años asociada a la Oscilación en Décadas que presenta el Pacífico. El resto de las señales identificadas serían producto de la interacción del campo geomagnético con el viento solar. Las señales de 108 y 119, podrían considerarse como parte del conjunto de señales

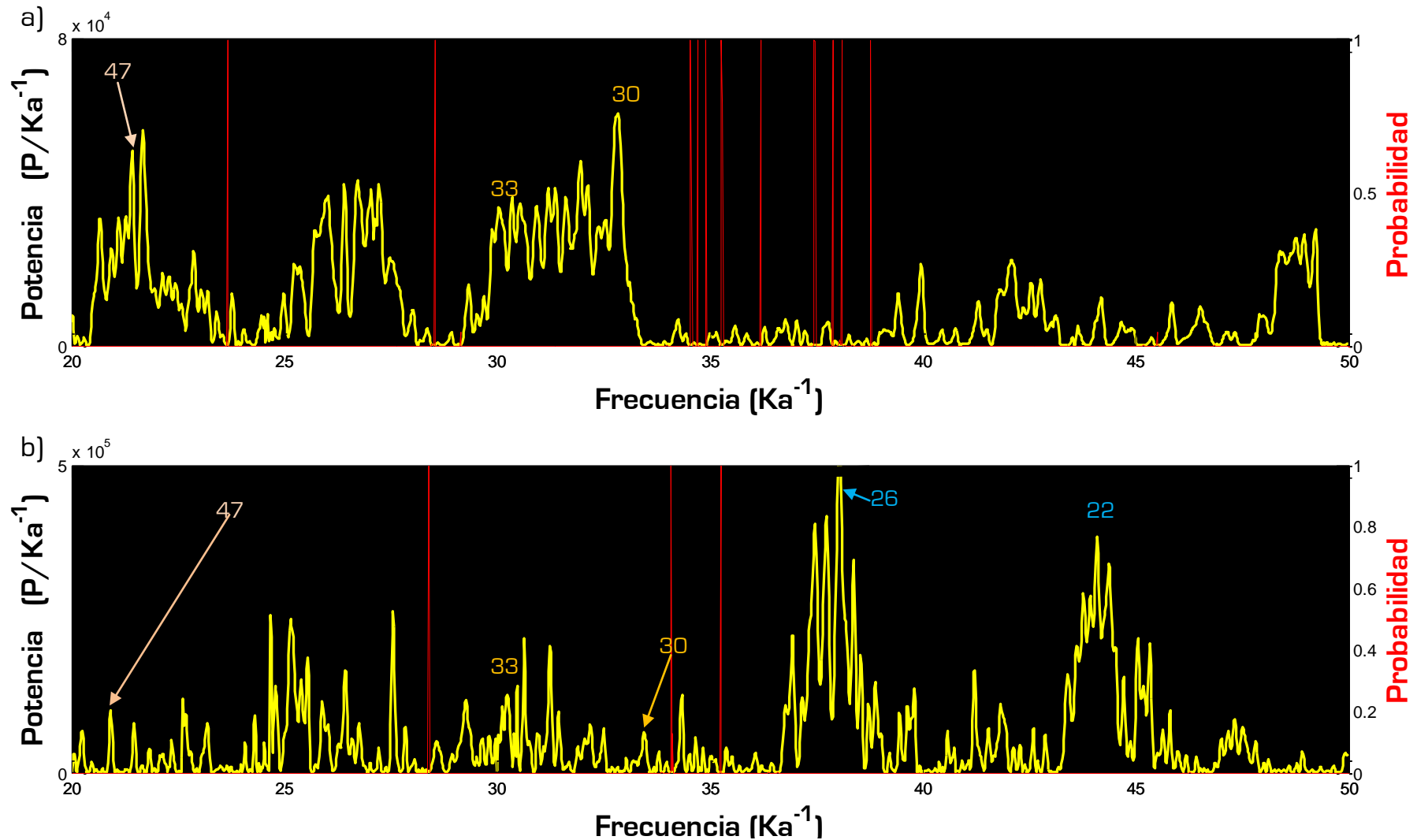


Figura 7.2. Espectro de potencias Lomb-Scargle que comprende las frecuencias entre los 20 Ka⁻¹ y los 50 Ka⁻¹ para a) la serie de tiempo de la escala de grises de JR1a, b) para la serie de tiempo e Mg/Ca de JR1a. Las señales muestran la edad que les corresponde, mientras que el color del índice indica el ciclo al que se les asocia.

del CGM-VS, dichas señales han sido reportadas en otras estalagmitas, como las de Dongge, este de China (Cosford *et al.*, 2008). La señal de 590, cuya naturaleza específica es una incógnita, ha sido encontrada en el espectro por el método multi-gradual de la tasa de producción del ^{14}C para el Holoceno y en el análisis espectral de las estalagmitas de Hulu (Clemens, 2005), Lianhua y Dongge en el Este de China (Cosford *et al.*, 2008).

De la comparación de ambos espectros de potencias Lomb-Scargle, se puede ver que hay claras diferencias en la magnitud relativa de las señales. Así para la escala de grises, la mayoría de las señales tienen una intensidad relativamente fuerte, mientras que en el espectro de Mg/Ca son las señales CGM-VS las que predominan sobre las demás. Esta diferencia se explica en parte con la variabilidad de las señales existentes en Mg/Ca que se traduce en el espectro con una intensidad menor de la señal y un mayor número de estas, mientras que en la escala de grises al haber una baja variabilidad de las señales o incluso ausencia de ellas, se obtiene un espectro de menos señales pero de mayor intensidad.

En el capítulo 8 se observará la presencia de señales correspondientes a un periodo de 30 años en el espectro cruzado Blackman-Tukey entre el GISP₂ y JR1a asociado al ciclo de Bruckner, y cuya naturaleza es magneto-solar (Raspopov *et al.*, 2000). Por otro lado, en este espectro y en el espectro cruzado entre JR1a y el GRIP veremos la presencia de los ciclos multianuales de Abbot (47 años). Con el fin de verificar su presencia, obtuvimos el espectro de potencias Lomb-Scargle para las frecuencias menores a 50 Ka^{-1} y mayores a 20 Ka^{-1} , es decir mayores a los 20 años y menores a los 50 años. El espectro de potencias para la escala de grises muestra la presencia de señales cuyas periodicidades corresponden a los 47 y 30 años (Figura 7.2a). El espectro de potencias de Mg/Ca presenta también estos ciclos aunque son menos intensos (Figura 7.2b). Las señales cercanas a la señal de los 30 años (que empezarían con la señal de 33 años), probablemente se traten de la misma periodicidad (Figura 7.2). La ciclicidad de 30 años, es por lo tanto una señal presente para la segunda mitad del Holoceno, sin embargo su relación con el AMO y el AMOC será todavía motivo de discusión para la comunidad científica. Lo único que puede aportar JR1a sobre esta señal es que está registrada en ella.

7.2 Onduleta

El espectro de potencia Onduleta es capaz de darnos la información de en qué momento estuvieron presentes las diferentes ciclicidades. Las onduletas son paquetes pequeños de ondas con una frecuencia específica que se aproxima a cero en sendos finales. Ya que se alargan y trasladan con una resolución flexible tanto en frecuencia como en tiempo. Pueden mapear

cambios fácilmente en el dominio de frecuencia-tiempo (Trauth, 2007). La onduleta que utilizamos fue la versión discreta de la onduleta de Morlet, utilizando el código propuesto por (Trauth, 2007), el cual utiliza 120 escalas, entre 1 y 120, que definen cuánto una onduleta es alargada o comprimida para mapear la variabilidad de la serie de tiempo en diferentes longitudes de onda.

La Figura 7.3 muestra la Onduleta a $\Delta t_s = 0.001 \text{ Ka}$. La señal tiene una mayor significancia conforme su color es más claro. Tanto para la escala de grises como para Mg/Ca, las señales aparecen por debajo de los 200 Ka^{-1} , exceptuando la señal correspondiente a 3 y 2 años, para escala de grises y Mg/Ca, respectivamente y que son evidentes en los primeros 200 años de la serie, donde hay una mayor resolución espaciotemporal, que resulta en una amplificación temporal de las frecuencias en la serie de tiempo. Tanto en este espectro como en el nombrado en el párrafo anterior, así como en la onduleta de la serie sin filtrar no aparecen señales correspondientes al ciclo anual, ya que, según la desigualdad de la Frontera de Cramér-Rao, el uso ventanas de tiempo más pequeñas (escalas), la varianza de una frecuencia o periodo se incrementa en razón del tamaño dado por el periodo t , en t^3 , (Thomson, 2009). Dicho problema no se soluciona con series de tiempo de mayor precisión, sino con series relativamente más largas (Thomson, 2009). Este problema se tendrá con las señales menores a 50 años.

7.2.1 Señales de ENSO en la Onduleta de JR1a

Aun así, es posible obtener señales anuales, cuando éstas son muy marcadas. Así, la onduleta para la serie de Mg/Ca muestra algunas señales que corresponden a la Oscilación del Niño, ENSO, cuya variabilidad va de 2 a 8 años (Figura 7.3b, línea blanca). Con el fin de ver cómo ha variado la señal del ENSO, mostramos esta misma onduleta en cuatro secciones (Figura 7.4 y 7.5). Las líneas punteadas en azul delimitan la región donde aparecen las periodicidades del Niño (aquí tomamos de 3 a 8 años, para descartar el ciclo bianual), mostrándose que el fenómeno del Niño ya existía en el momento en que JR1a empezó a crecer. Dicho resultando es congruente con lo que se piensa de éste fenómeno, el cual empezaría a tener una fuerza apreciable desde el -5000 C. J. P., según se ha visto en los registros de la laguna Pallcacocha, Ecuador (Moy *et al.*, 2002).

Se puede observar en la onduleta, que no hay una correspondencia entre las periodicidades del ENSO y las periodicidades centenales, sin embargo si parece existir correspondencia con las señales de 50 años, atribuidas en primera instancia al PDO, sobre todo entre el -3000 y el -1600 C. J. P. Aunque estas periodicidades también de los 50 años también han sido atribuidas

por algunos autores como del AMO, arguyendo una relación entre el ENSO y esta señal (Asmerom y Polyak, 2004). Es también durante el -3000 y el -1600 C. J. P. que la señal del ENSO es más marcada. Podemos ver en la onduleta que la señal del PDO tiene una presencia mucho mayor que la del ENSO a lo largo de la serie. La onduleta marca tres puntos con ausencia de periodicidades del Niño y del PDO alrededor del -4000, -3400 y 1200 C. J. P., ya que debido a que estos son los puntos donde se extrajo muestra para el fechamiento no contamos con datos en ninguna de las series de tiempo de JR1a (las señales mayores a estos huecos, > 50 años, no parecen verse afectados en su detección por esta ausencia de información). Es de destacar que las señales del ENSO son marcadas también a partir de los años 70's del siglo XX, lo que correlaciona con el aumento de intensidad reportado en varios informes (Guilyardi, 2008).

Algunos estudios han intentado conocer la variabilidad del Niño a partir de las onduletas, estableciendo así la intensidad de las precipitaciones (Lachniet et al., 2004). Sin embargo, debemos enfatizar que hacer una interpretación así en JR1a debe hacerse con mucho cuidado, pues debido a que la incertidumbre de la datación es, cuando menos, un orden de magnitud mayor que la periodicidad de ENSO, no es posible, con relativa seguridad, hacer inferencias sobre un posible aumento o disminución de la frecuencia de ENSO en función del tiempo. Finalmente hay que recalcar que la falta de la señal en la serie de la escala de grises es un claro ejemplo de que no es un buen indicador para cambios producidos en intervalos de tiempo relativamente cortos.

7.2.3 Señales decenales en la onduleta de JR1a

La Figura 7.6 a muestra la onduleta a $\Delta t_s = 0.01095$ Ka, el cual es el periodo que dura un ciclo solar de Schwabe. A esta escala, se aprecia perfectamente la presencia de los diferentes ciclos a lo largo de los últimos 6804 años. En la escala de grises el ciclo de 40 años, asociado con el PDO, está presente hasta los -500 años C. J. P., mientras que este mismo ciclo aparece durante los seis milenios en Mg/Ca. En ambos casos, no es de los más significativos. Contrariamente, la señal de 94 años (ciclo de Gleissberg), es altamente significativa alrededor del -3 Ka C, J. P. pero está presente a lo largo del Holoceno superior. Para la serie de Mg/Ca (Figura 7.6b) la señal de 80 años, ciclo de Gleissberg, está presente durante todo el periodo de crecimiento de la estalagmita, aunque es más significativa a los -0.5 ka C. J. P. De manera similar, la señal correspondiente a la ciclicidad de 121 está presente todo el Holoceno superior, pero tiene su mayor significancia alrededor de los -0.4 ka C. J. P., así como 0.9 y 1.6 Ka A. D., periodos marcados en la serie de tiempo de la escala de gris como de sequía (Flechas anaranjadas en la Figura 7.7 y Figuras 6.19, 6.24 y 6.25, capítulo 6) que sucedieron en los últimos eventos Bond.

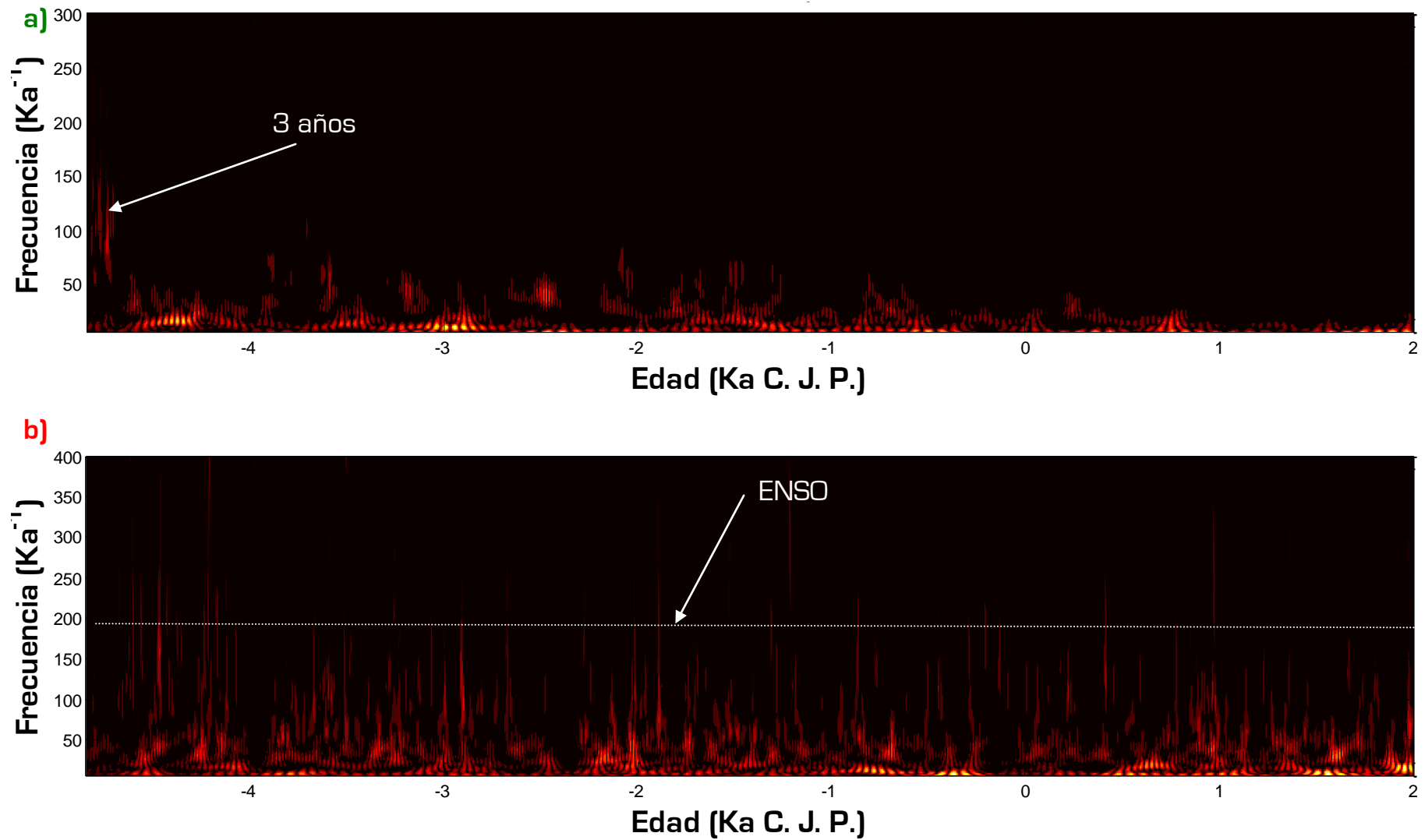


Figura 7.3. Onduleta a $\Delta t_s = 0.001 \text{ Ka}$ a partir de; a) la escala de grises, cuya frecuencia más alta esta a los 337.54 Ka^{-1} (3 años). b) Mg/Ca cuya señal más alta está a 507.8125 Ka^{-1} . (2 años). Nótese como no hay frecuencias correspondientes a 1 año. Para tener una mayor resolución a altas frecuencias se utilizaron sólo escalas del 1 al 30.

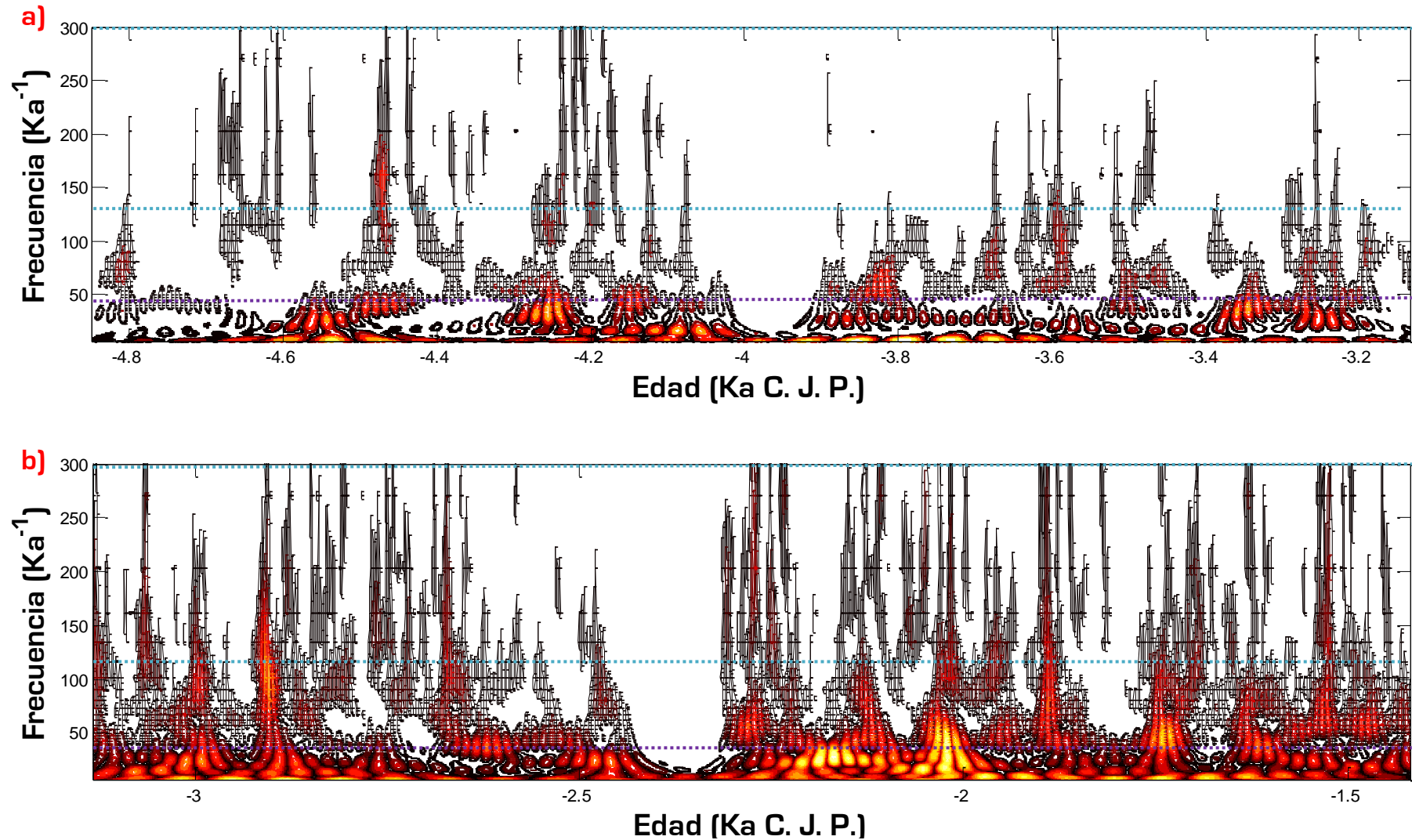


Figura 7.4. Onduleta a $\Delta t_s = 0.001$ Ka a partir de Mg/Ca; a) para el lapso de tiempo de los -6.8 Ka a los -3.2 Ka C. J. P. b) para el lapso de -3.1 Ka a -1.5 Ka C. J. P. Las líneas interlineadas (azul) muestran la zona a la que aparece las señales del ENSO, la línea interlineada (morado) muestra la frecuencia a la que aparecen las señales de 40 años atribuidas al PDO. Las señales son más marcadas para el lapso de la figura b. Nótese la ausencia de señal para los años alrededor del -4000 y el -3400 C. J. P.

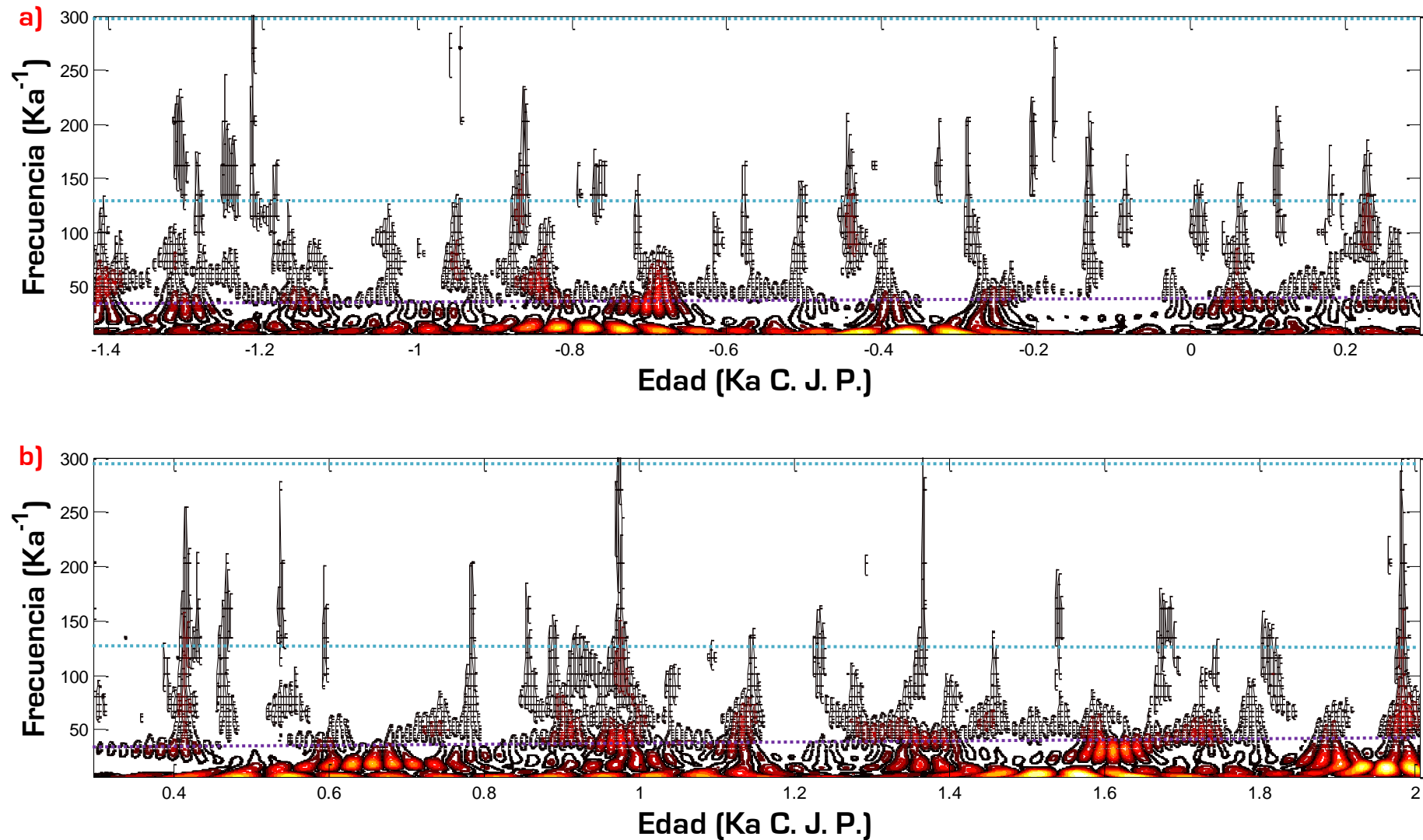


Figura 7.5. Onduleta a $\Delta t_s = 0.001$ Ka a partir de Mg/Ca; a) para el lapso de tiempo de los -1.4 Ka a los -0.2 Ka C. J. P. b) para el lapso de -0.4 Ka a -2.0 Ka C. J. P. Las líneas interlineadas (azul) muestran la zona a las que aparece las señales del ENSO, la línea interlineada (morado) muestra la frecuencia a la que aparecen las señales de 40 años atribuidas al PDO. Existe una ausencia de señales del ENSO y el PDO alrededor del 1.2 Ka C. J. P.

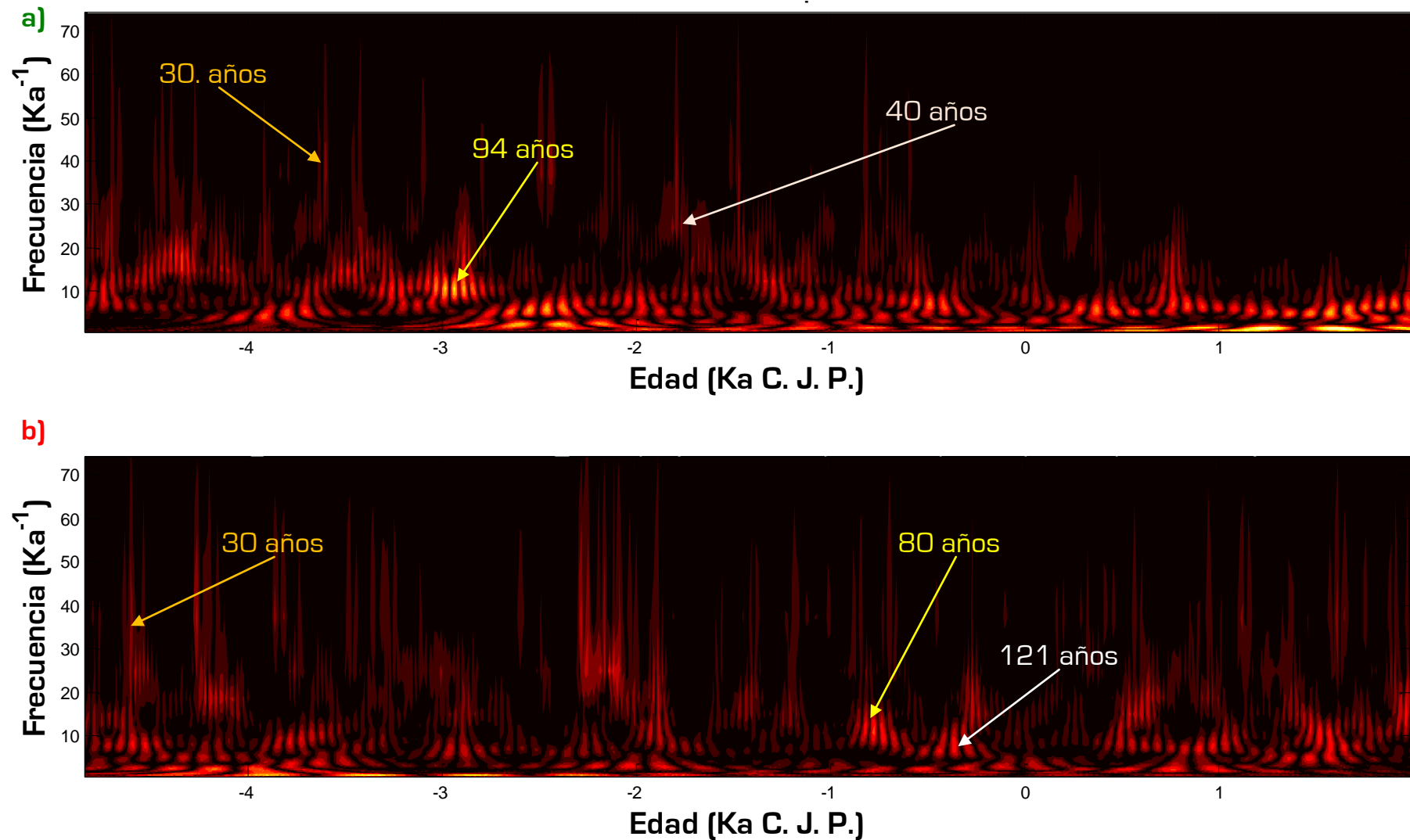


Figura 7.6. Onduleta a $\Delta t_s = 0.01095$ Ka. a) Para la serie en escala de grises las señales son 37.1005 Ka^{-1} (26 a), 24.7336 Ka^{-1} (40 a), 10.6001 Ka^{-1} (94 a). b) Para la serie de Mg/Ca, 37.1005 Ka^{-1} (26 a), 12.3668 Ka^{-1} (80 a), 7.2445 Ka^{-1} (121 a), 3.6272 Ka^{-1} (275 a). Las señales ejemplo muestran la edad que les corresponde, mientras que el color del índice indica el ciclo al que se les asocia, ver Tabla 7.1.

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

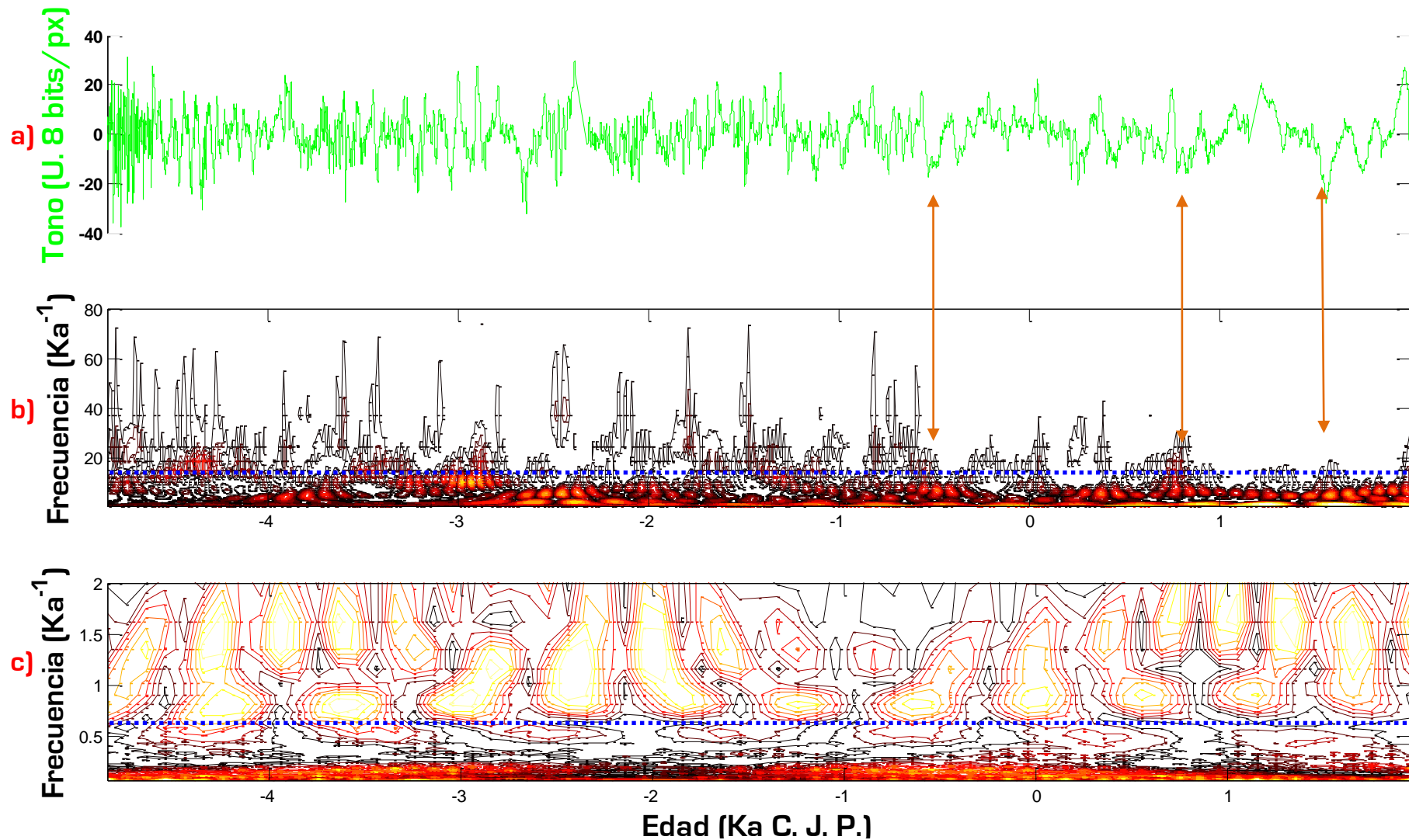


Figura 7.7. Comparación de a) la serie de tiempo de la escala de grises con las ondulitas a b) $\Delta t_s = 0.001 \text{ Ka}$. La línea punteada (azul) indica la frecuencia a donde aparecen las señales del CMS-GS y c) $\Delta t_s = 0.5 \text{ Ka}$. La línea punteada (azul) indica la frecuencia a donde aparecen las señales del ciclo de Bond.

Análisis espectral

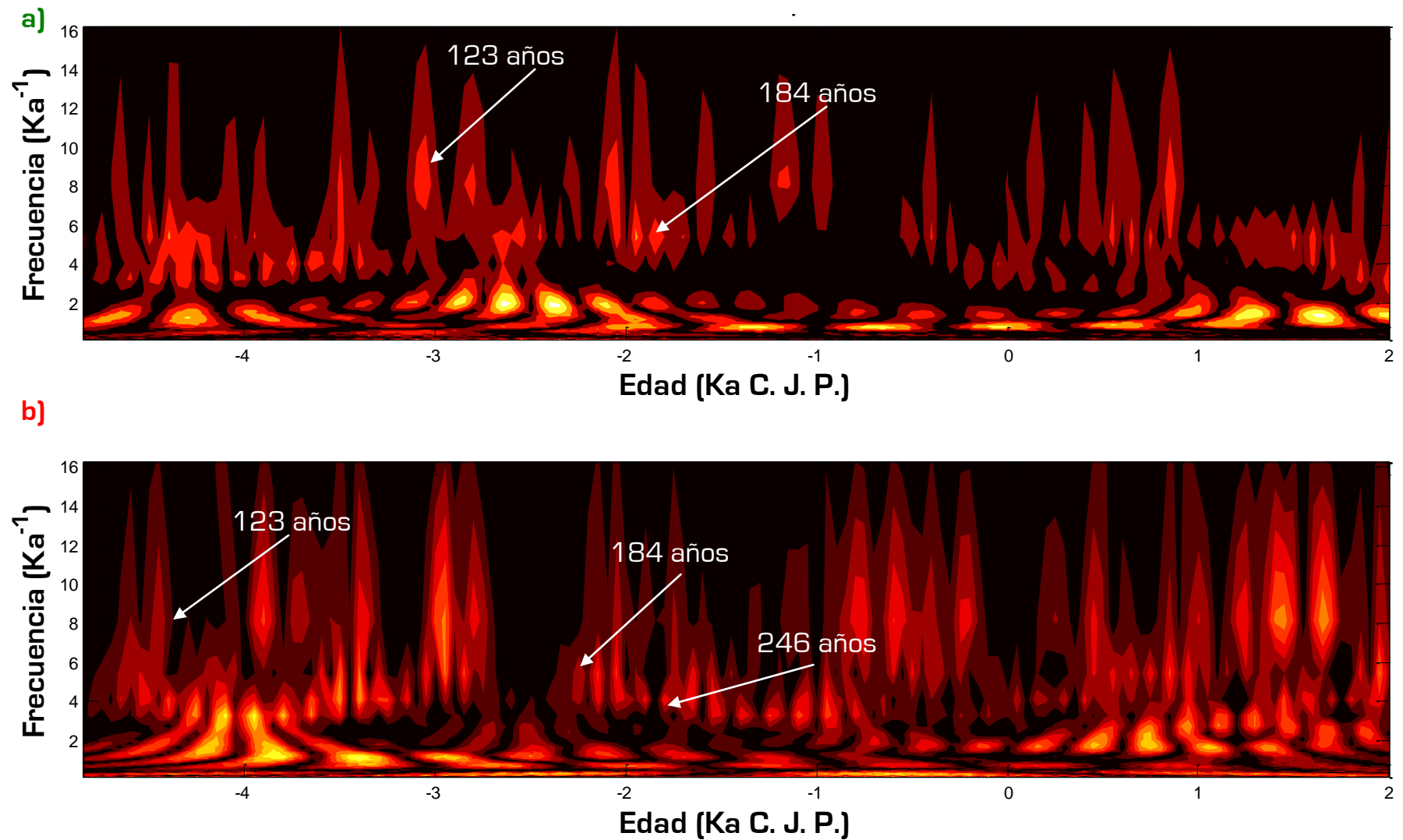


Figura 7.8. Onduletas a $\Delta t_s = 0.05$ Ka. para; a) escala de grises las señales son, 7.125 Ka^{-1} (123 a), 5.4167 Ka^{-1} (184 a). b) Mg/Ca las señales son; 7.125 Ka^{-1} (123 a), 5.4167 Ka^{-1} (184 a), 4.0625 Ka^{-1} (246 a). Las señales ejemplo muestran la edad que les corresponde, mientras que el color del índice indica el ciclo al que se les asocia, ver Tabla 7.1.

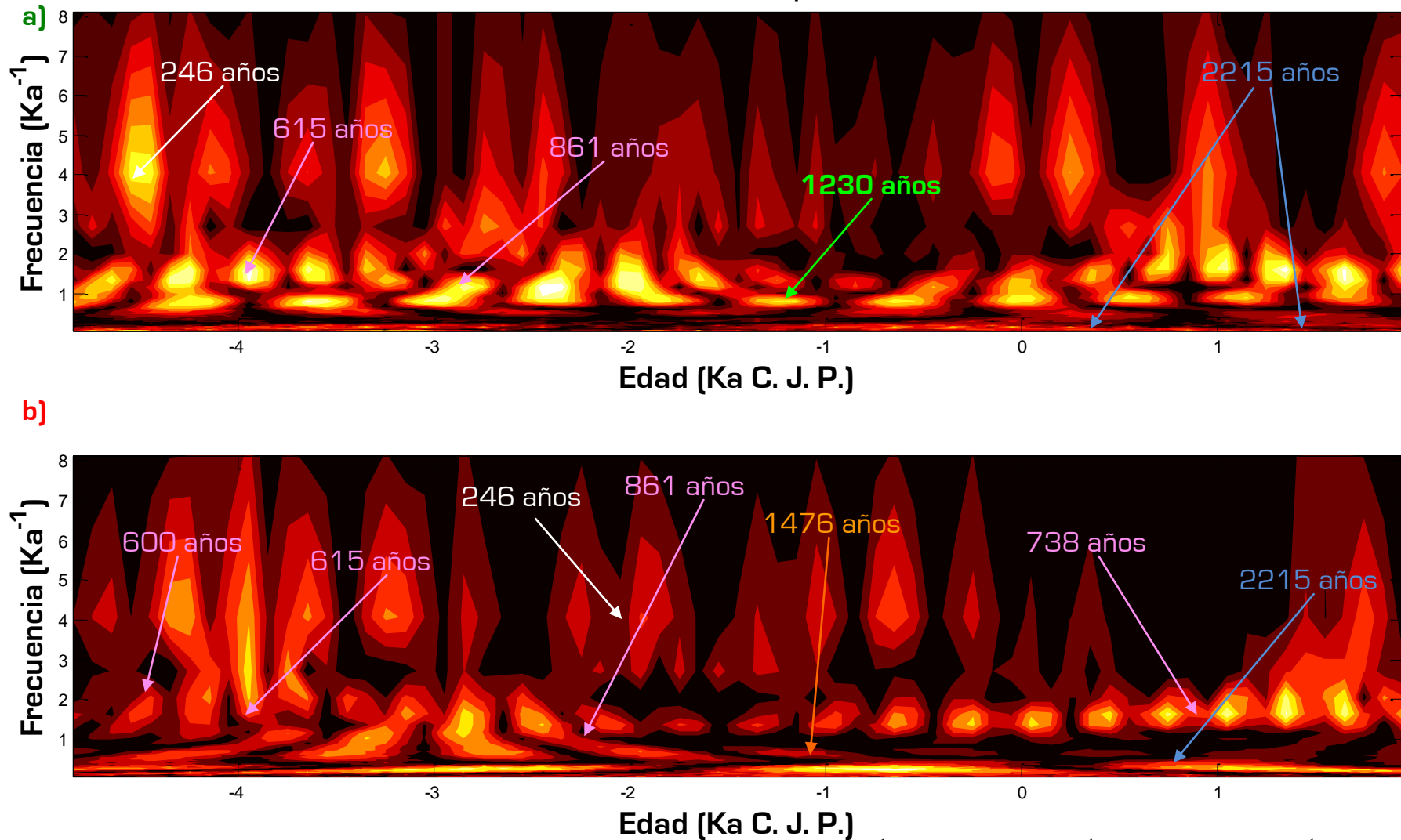


Figura 7.9. Onduletas **a** $\Delta t_s = 0.1$ Ka. para a) escala de grise, las señales son; 4.0625 Ka^{-1} (246 a), 1.625 Ka^{-1} (615 a), 1.1607 Ka^{-1} (861 a), 0.8125 Ka^{-1} (1230 a), 0.45139 Ka^{-1} (2215 a). b) Mg/Ca las señales son; 4.0625 Ka^{-1} (246 a), 2.0313 Ka^{-1} (492 a) 1.625 Ka^{-1} (615 a), 1.3542 Ka^{-1} (738 a), 0.67708 Ka^{-1} (1476 a). Las señales ejemplo muestran la edad que les corresponde, mientras que el color del índice indica el ciclo al que se les asocia, ver Tabla 7.1.

7.2.3 Señales centenales en la onduleta de JR1a

En la Figura 7.8, la onduleta tiene una resolución de $\Delta t_s = 0.05$ Ka, que es la incertidumbre del fechamiento para la mayoría de los puntos. De manera que nos podemos centrar en señales de menor frecuencia. Cabe destacar que estas señales aparecen en las onduletas anteriores, sólo que por la resolución son menos evidentes. Para la escala de grises (Figura 7.8 a), el ciclo de 123 años es significativo para los últimos 6 siglos del cuarto milenio negativo C. J. P. y el primer siglo negativo C. J. P., mientras que la señal de 184 es significativa hacia el -2000 C. J. P. y en el -4500 al -3500 C. J. P., así como en el año 1000 de nuestra era. Esta señal aparece, aunque con menos significancia a lo largo de los seis milenios exceptuando en la segunda mitad del primer milenio negativo del C. J. P. La señal alrededor de 600 años, aparece a lo largo de todo el Holoceno superior. Las dos últimas señales también han sido reportadas en las onduletas cruzadas para las estalagmitas de Lianhua, Heshang y Dongge en China (Cosford *et al.*, 2008). Estos mismos ciclos aparecen en el análisis de onduletas de Mg/Ca (Figura 7.8b), aunque tienen sus significancias más altas en otras temporalidades. Además aparece el ciclo de 246 años, ausente sólo durante el primer milenio negativo C. J. P. Estas señales son del tipo CGM-VT.

7.2.4 Señales milenarias en la onduleta de JR1a

En la Figura 7.9, la onduleta tiene una $\Delta t_s = 0.1$ Ka, que es el periodo más alto que podría tener un ciclo de Gleissberg. Bajo estas condiciones es posible observar la señal ya comentada de 246 años en ambos espectros de potencia. Por otro lado, la señal de 1230 años, pseudo-Bond, aparece a lo largo de los seis milenios en la serie de escala de grises, así como la señal de 2215, ciclo de Hallstattzeit, aunque con una significancia no muy alta. La naturaleza de este ciclo sigue siendo una incógnita, aunque se piensa está dada por la dinámica atmosférica (Ogurtsov *et al.*, 2004). Para el Mg/Ca (Figura 7.9 b), la señal de 1476, correspondiente a un ciclo de Bond, está presente a lo largo de los seis milenios, aunque con una mayor significancia en el segundo y tercer milenio a. C: De nuevo, aparece el ciclo de Hallstattzeit, con una significancia no muy alta. Estos últimos dos ciclos han aparecido en los análisis de onduletas hechos para el Holoceno en diferentes secuencias sedimentarias del Atlántico Norte (Debret *et al.*, 2009). La figura 7.10 muestra que tampoco hay una conexión aparente entre los ciclos milenarios y las señales del ENSO, según se ve en la onduleta obtenida a partir de la serie de Mg/Ca..

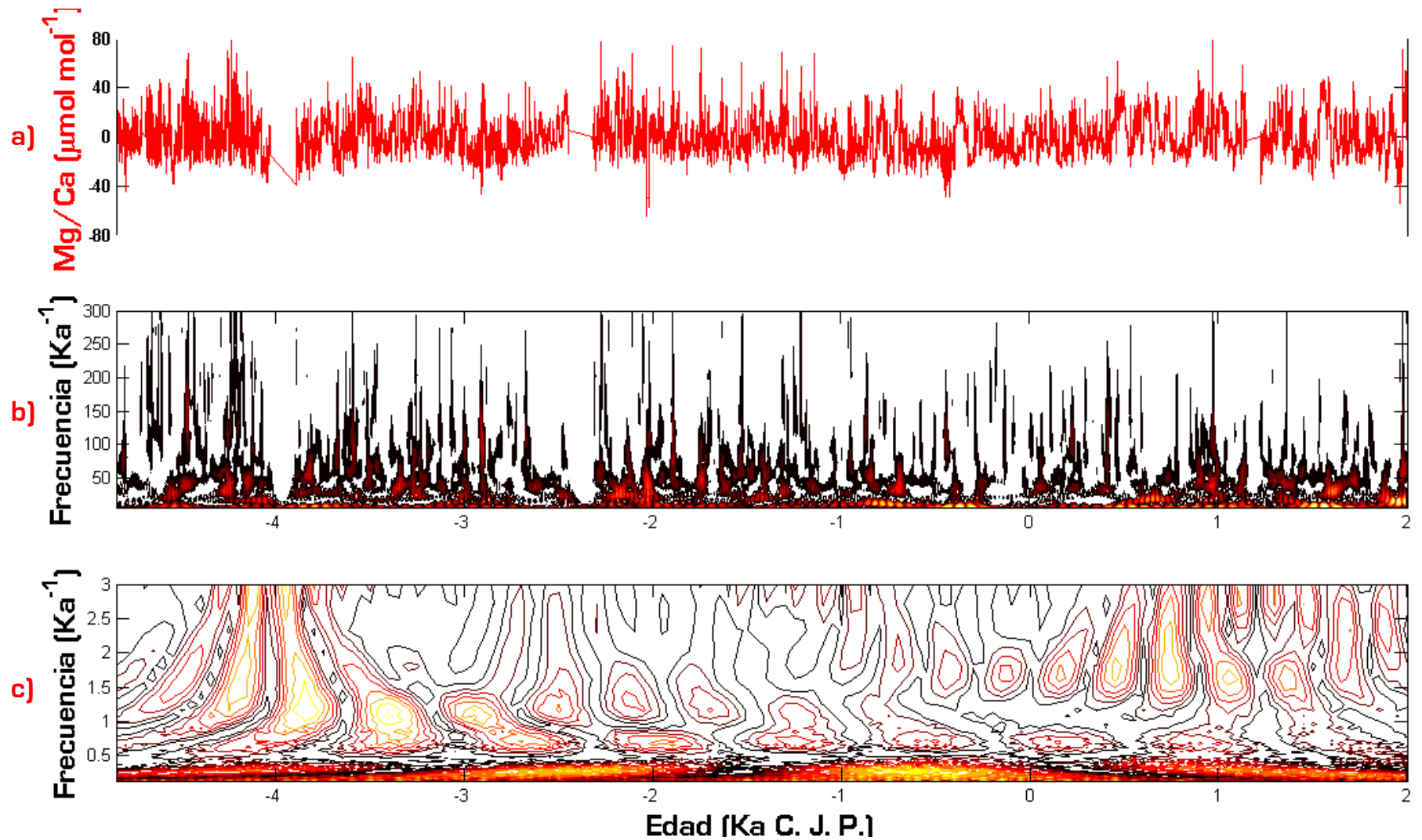


Figura 7.10. Comparación de a) la serie de tiempo de Mg/Ca (rojo) con las ondulitas a b) $\Delta t_s = 0.001 \text{ Ka}$ y c) $\Delta t_s = 0.5 \text{ Ka}$. Donde se observa que las señales del ENSO no están acopladas a los ciclos de Bond.

7.3 Consideraciones sobre los resultados del análisis espectral y las onduletas

Recapitulando, de los análisis de espectro cruzado y del análisis de Onduleta tenemos las siguientes consideraciones:

- Es innegable la existencia de un forzamiento solar en el clima a escala centenal.
- Existe una leve influencia de la Oscilación Multidecanal del Pacífico sobre regiones como Jalpan, cuya localización, recordemos, se encuentra en el extremo Este de la Sierra Madre Oriental, dónde los efectos del Pacífico no deberían ser evidentes.
- Existe un ciclo climático de 600 años el cual ha sido observado en otras localidades del mundo, del cual se desconoce su origen o forzamiento.
- La señal del ciclo de Bond es de poca intensidad según se ve en el espectro de potencias Lombe-Scargle. Sin embargo, es una señal que se ha mantenido a lo largo del Holoceno, según lo muestra la onduleta. La ausencia de esta señal y la presencia de una, a los 1219 años, hace pensar que se trata de la misma señal. De manera que la diferencia en su valor, estaría confirmando el carácter heterodino de la señal.
- Lo que queda claro de las onduletas, es que las señales presentes en el cuarto y tercer milenio antes de nuestra era, fueron relativamente distintas a las de los cuatro milenios posteriores.
- Las señales del ENSO han estado presentes a lo largo del tiempo de existencia de JR1a, aunque no de forma permanente. Su existencia parece estar acoplada a las señales del PDO. La señal del ENSO es prácticamente imperceptible en la escala de grises mostrando la inutilidad de este indicador en guardar señales de alta frecuencia.
- Tanto en el espectro de potencias Lombe-Scargle, como en el análisis de onduleta, las señales de la escala de grises tienen una potencia mayor que la que tienen en Mg/Ca. Esto llama la atención, dado que este último tiene un orden de magnitud mayor en la resolución. Sin embargo, algunas señales dejaron de aparecer en la escala de grises a partir del primer milenio C. J. P., hecho que no sucedió en Mg/Ca. Este último fenómeno puede ser explicado con la tasa de crecimiento, pues al tener una tasa relativamente menor, se tenía también una incorporación menor del material que le confería el tono de gris, lo que se traduce en una menor intensidad de la señal, mientras que el Mg/Ca, en un principio, no se ve afectado por la cantidad de calcita precipitada. Lo anterior resalta la necesidad de realizar la adquisición de imágenes con magnificación asociada a la tasa de crecimiento de la estalagmita.

Capítulo VIII

Comparación con archivos paleoclimáticos globales

"Aber die Sonne duldet kein Weißes,
Überall regt sich Bildung und Streben,
Alles will sie mit Farben beleben;
Doch an Blumen fehlts im Revier,
Sie nimmt geputzte Menschen dafür."¹

Faust I, Osterspaziergang, Johann Wolfgang von Goethe.

Las series de tiempo de JR1a fueron comparadas con otros archivos paleoclimáticos tanto globales como locales con el fin, además de conocer los diferentes patrones climáticos, de establecer la veracidad de la escala de grises como archivo paleoclimático. Lo cual se juzgará cumplido si observa patrones climáticos similares a los de los archivos comparados. En el presente capítulo solo analizaremos la comparación con los archivos globales. La comparación tiene tanto un carácter "visual" como uno matemático. El primero tiene el propósito de establecer la correspondencia entre las señales de paleohumedad en las diferentes series, mientras que el segundo establece una correlación matemática entre las series de tiempo en el dominio de las frecuencias [Trauth, 2007]. Es decir, al comparar la presencia de ciclicidades en ambos archivos. Para ello debe realizarse un análisis de espectro cruzado por el método de Blackman-Tukey. En *sensu stricto* las series a comparar deberían tomarse del mismo objeto [Legendre y Legendre, 2003] o localidad [Trauth, 2007]. Para su fácil visualización, a cada uno de los archivos climáticos les fue eliminada su tendencia, la cual, con excepción de otra indicación, fue obtenida por regresión lineal. Para realizar el espectro cruzado tuvimos que interpolar las series de tiempo de mayor número de datos, de manera que obtuviéramos una lectura a la misma temporalidad que la de menor número de datos. En nuestro caso, por su número de elementos, siempre se interpoló la serie en escala de grises y la de Mg/Ca de JR1a a las temporalidades de los diferentes archivos paleoclimáticos.

8.1 Comparación visual con archivos paleoclimáticos globales

La comparación la realizamos, en primer lugar, con tres archivos elegidos por estar ubicados en puntos que son influenciados por la dinámica del Atlántico Norte, por lo que esperamos que JR1a tenga patrones climáticos similares a éstos. Los dos primeros indicadores con los que

¹ Pero el sol no tolera nada blanco, por todas partes su forma y pretensión mueve. Todo él desea reanimar con color. Pues a falta de flores en el campo, él toma a cambio a los humanos engalanados.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

comparamos con el $\delta^{18}\text{O}$ del GRIP (Greenland Ice Core Project)[Vinther *et al.*, 2006] y el $\delta^{18}\text{O}$ del GISP₂ (Greenland Ice Sheet Project Two) de Groenlandia, cuya resolución es de 20 y 11 años, respectivamente. Debemos recordar que las lecturas de $\delta^{18}\text{O}$, deben interpretarse con cuidado según la naturaleza del archivo analizado. Así, a diferencia de la tendencia de $\delta^{18}\text{O}$ en carbonatos, la de los núcleos de hielo, indica una mayor temperatura a valores más altos de $\delta^{18}\text{O}$ [Deconinck, 2006; Rootaru *et al.*, 2006].

El otro archivo del Atlántico Norte con el que comparamos fue la escala de grises obtenida de los núcleos sedimentarios del golfo de Cariaco, el cual es un basamento anóxico de esta región de Venezuela, donde desembocan varios ríos, entre ellos el Orinoco. El archivo es en sí, un indicador de productividad biológica, la cual está influenciada por los cambios climáticos. Dicho archivo tiene una resolución de 6 años [Hughen *et al.*, 1996]. Dicho archivo ha reflejado un cambio a condiciones más secas desde hace aproximadamente 5400 años [el archivo abarca los últimos 14000 años de manera que tiene margen de comparación].

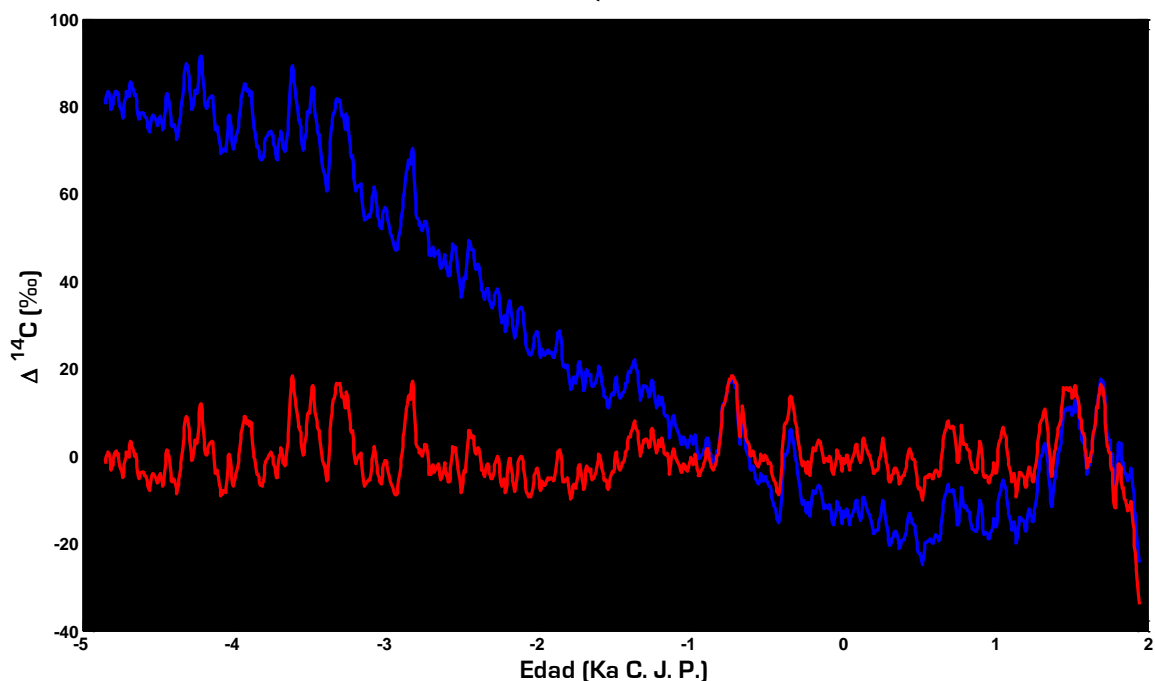


Figura 8.1. La serie temporal de la tasa de producción calibrada de ^{14}C INTCAL04, (azul) y la misma serie sin tendencia (rojo). Nótese cómo la serie original recuerda a una ecuación de tercer grado. Adviértase también como entre los 5 y 3 Ka C. J. P., la tasa de producción fue relativamente un orden de magnitud mayor a la de los últimos 2000 años.

Finalmente, además de estos tres archivos del Atlántico Norte, presentamos la comparación con la tasa de producción del ^{14}C estudiado en la calibración de la edad de radiocarbono

INTCAL04 (Reimer *et al.*, 2004) para conocer la posibilidad de un forzamiento solar en el clima de México. Hay que destacar que para la serie de tiempo de la tasa de producción de ^{14}C , la tendencia restada, ajustaba a una ecuación de tercer grado (Figura 8.1).

La comparación visual entre JR1a y estos cuatro indicadores paleoclimáticos (Figura 8.2-8.4) muestra tendencias similares a lo largo de la segunda mitad del Holoceno, destacándose en primera instancia los llamados Cambios Climáticos Rápidos, CCR (señalados en azul) que son intervalos de cambio climático del orden de centenas de años descubiertos al compararse varios indicadores paleoclimáticos del Atlántico Norte (Mayewski *et al.*, 2004). Y que estarían relacionados con los Eventos Climáticos del Holoceno o Eventos Bond, los cuales tienen un carácter más puntual y están caracterizados por cambios climáticos rápidos del orden de siglos, cuyas manifestaciones son el descenso en la temperatura polar, aridez tropical y cambios grandes en la circulación atmosférica, relacionados por una periodicidad de 1470 ± 500 años (Bond *et al.*, 2001). Dichos eventos, a su vez, serían los homólogos de los Eventos Dansgaard-Oeschger de la última era glacial (Bond, 2009). La comparación visual con el archivo del ^{14}C INTCAL04 nos da la pauta para sugerir un forzamiento solar en estos eventos (Figura 8.6e - 8.8e). Como se aprecia en las Figuras 8.2-8.4, dichos eventos aparecen también en JR1a.

Para el CCR 4, la correlación visual de JR1a es mayor con la escala de grises de Cariaco (Figura 8.2). Para Cariaco es una época de estabilidad climática y una época de humedad para Jalpan según lo muestra la escala de grises. Esto último coincide con lo reportes para la Florida y el Caribe en esta época, pues se considera que esta zona se mantuvieron húmedas, a pesar de que el este de África, Asia y el lago Titicaca se volvieron más secos (Mayewski *et al.*, 2004).

Por otro lado para el CCR 3, la mayor coincidencia de patrones climáticos para JR1a la vemos con el archivo del GRIP (Figura 8.3). Este intervalo asociado con el Evento Climático del Holoceno 3 ha sido reportado como una larga sequía provocada por un monsoon asiático menos intenso que habría sido el responsable del colapso de varias culturas neolíticas en China (Wu y Liu, 2004). También esta sequía sería la responsable de la caída del Antiguo Reino de Egipto y del Imperio Akkadiano (Ristvet, 2003). En la escala de grises, este lapso tiene un comportamiento sinusoidal, mientras que en Mg/Ca si es un lapso efectivamente de baja humedad, lo que implica que el efecto de este evento se sintió también en México y apoyaría su naturaleza, sino planetaria si hemisférica (ver también figura 6.15, capítulo VI para mayor resolución).

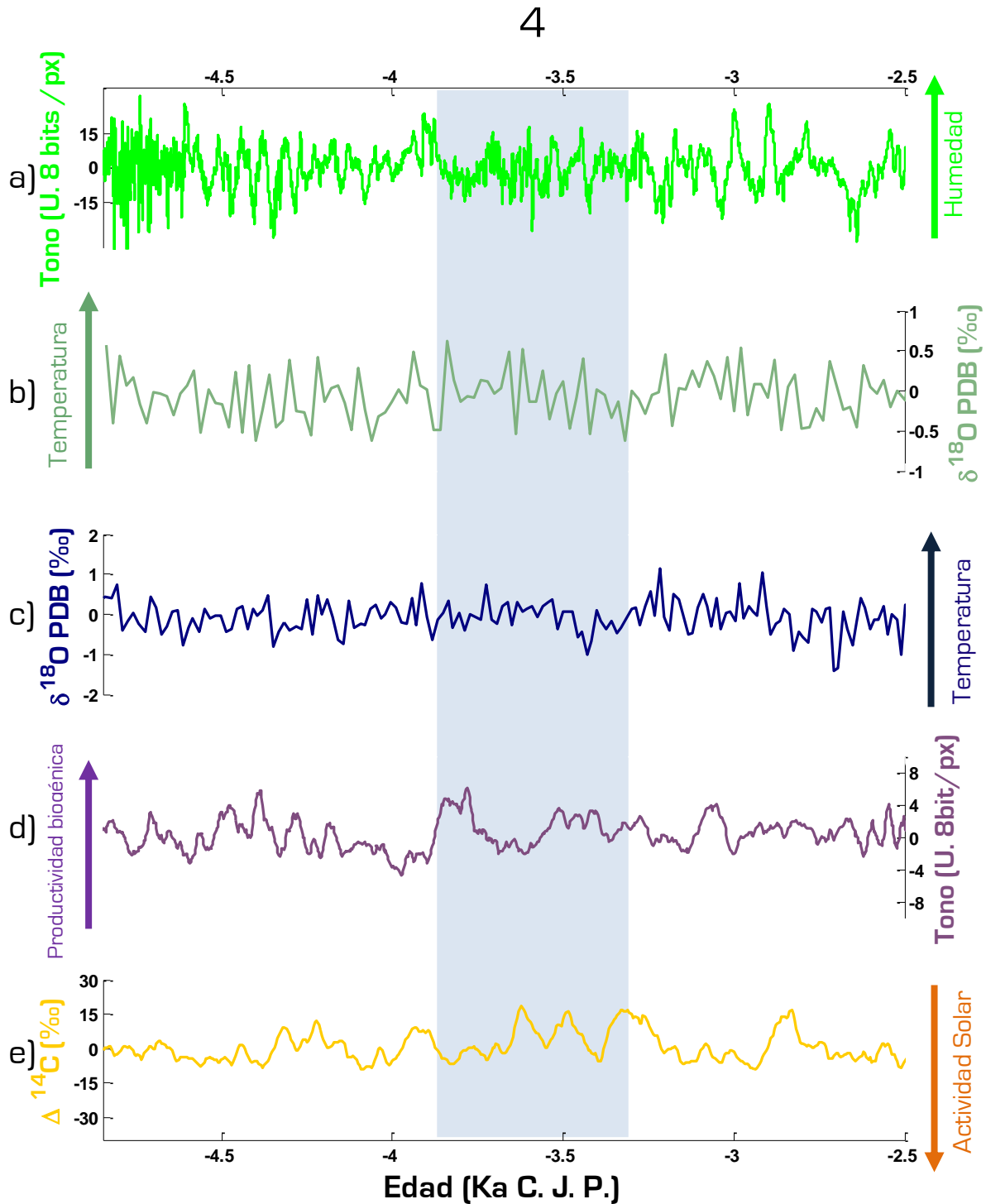


Figura 8.2. Comparación entre a) La escala de grises de JR1a (verde), b) El $\delta^{18}\text{O}$ del GRIP (verde grisáceo), c) El $\delta^{18}\text{O}$ del GISP₂ (azul), d) La escala de grises de Cariaco (morado) y e) La tasa de producción calibrada de ^{14}C INTCAL04 (naranja) para el intervalo de tiempo comprendido por los 2.5 Ka A. C., donde se observa el Eventos Bond 4 (franja azul, el número indica el evento referido). Las flechas indican el sentido de la variable humedad y de la actividad solar.

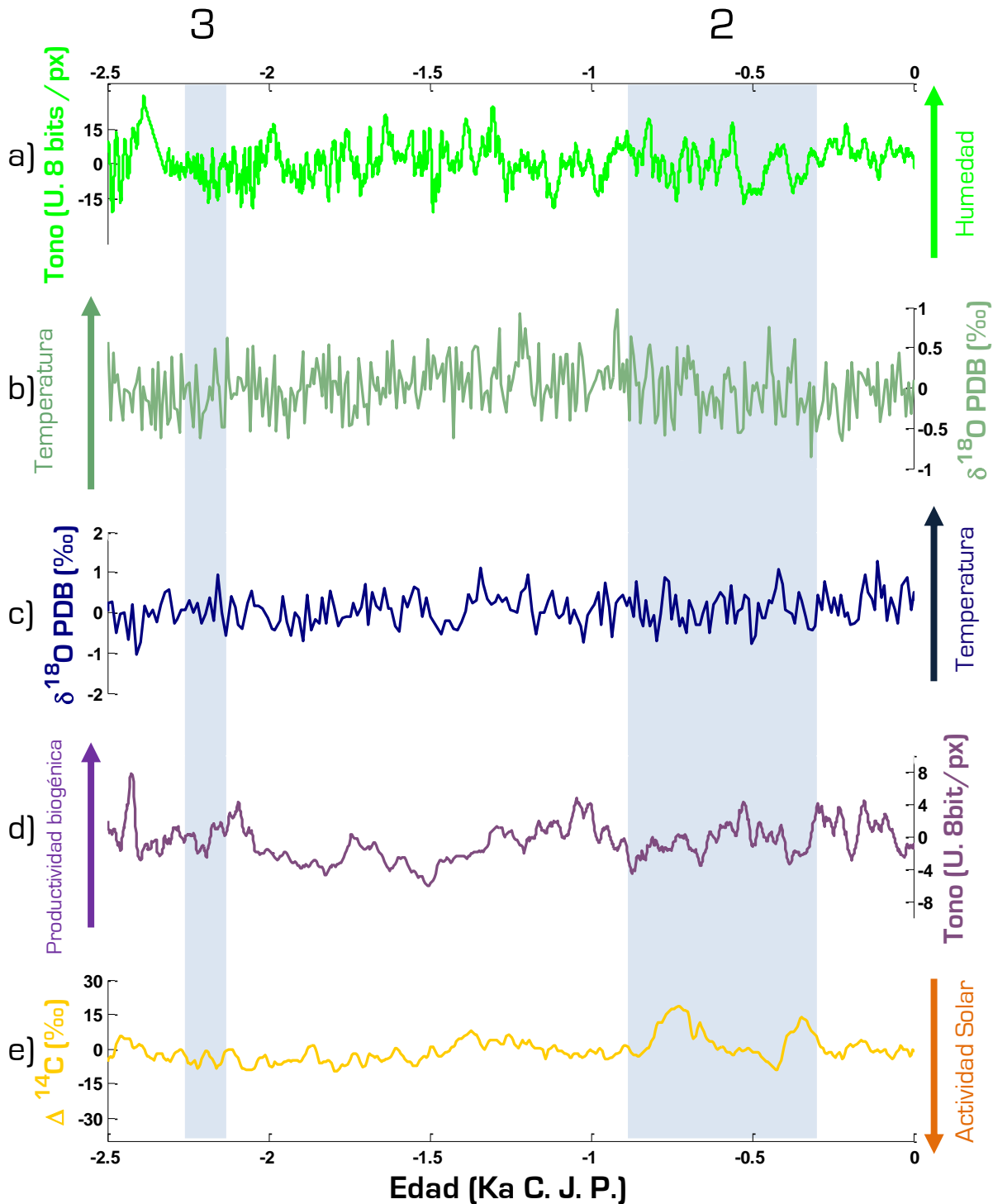


Figura 8.3. Comparación entre a) La escala de grises de JR1a (verde), b) El $\delta^{18}\text{O}$ del GRIP (verde grisáceo), c) El $\delta^{18}\text{O}$ del GISP₂ (azul), d) La escala de grises de Cariaco (morado) y e) La tasa de producción calibrada de ^{14}C INTCAL04 (naranja) para el intervalo de tiempo comprendido por los 2.5 Ka A. C., donde se observan los Eventos Bond 2 y 3 (franja azul, el número indica el evento referido). Las flechas indican el sentido de la variable humedad y de la actividad solar.

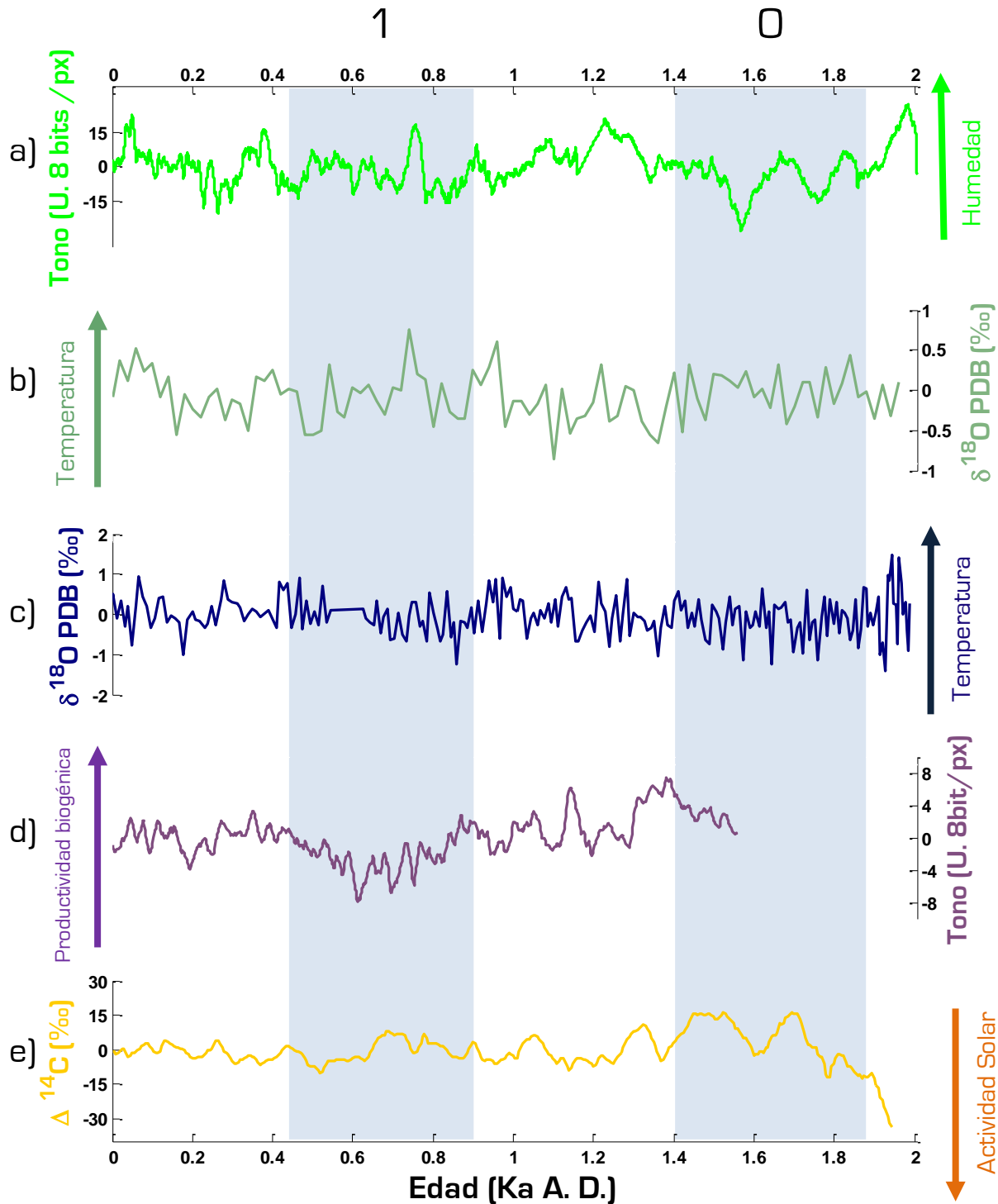


Figura 8.4. Comparación entre a) La escala de grises de JR1a (verde), b) El $\delta^{18}\text{O}$ del GRIP (verde grisáceo), c) El $\delta^{18}\text{O}$ del GISP₂ (azul), d) La escala de grises de Cariaco (morado) y e) La tasa de producción calibrada de ^{14}C INTCAL04 (naranja) para el intervalo de tiempo comprendido por los 2.5 Ka A. C., donde se observan los Eventos Bond 0 y 1 (franja azul, el número indica el evento referido). Las flechas indican el sentido de la variable humedad y de la actividad solar.

Comparación con archivos paleoclimáticos globales

Es el CCR 2, donde parecen coincidir mejor los diferentes archivos paleoclimáticos (Figura 8.3). Este lapso señalado por un avance de los glaciales en Siberia y Norteamérica (Mayewski *et al.*, 2004) es paradójicamente vista como una época de humedad mayor para los archivos de Jalpan, si bien para la escala de grises existe una disminución significativa, que aparece como una sequía fuerte y prolongada alrededor del -500 C. J. P. (ver también figura 6.19 y 6.20, capítulo VI para mayor resolución).

Para el CCR 1, es el GRIP quien tiene una mayor semejanza con JR1a. La productividad biológica vista en Cariaco se mantiene baja, mientras que para la escala de grises de Jalpan es un lapso relativamente seco, que tiene varias épocas de humedad pero que termina con una serie de sequías fuertes pero cortas para el 800 C. J. P. (ver también figura 6.23 y 6.24, capítulo VI para mayor resolución).

Finalmente, es el CCR 0, (el más estudiado), donde se encuentra la Pequeña Edad de Hielo. Dicho patrón climático se ve más claramente en la escala de grises de JR1a que en el resto de los archivos del Atlántico Norte (el indicador de tonos de Cariaco no cubre ese periodo). La Figura 8.5 presenta el lapso donde aparecen el Periodo Cálido Medieval y la Pequeña Edad de Hielo para los indicadores de JR1a, el GRIP (que es el archivo donde aparece bien definido el CCR 0), el porcentaje de titanio de Cariaco (cuya resolución en este lapso es de 5 años) (Haug *et al.*, 2003) y el archivo del ^{14}C INTCAL04. Las líneas punteadas indican la correlación sugerida entre señales.

Es de destacarse para este periodo, la coincidencia entre los diferentes indicadores con el $\Delta^{14}\text{C}$, corroborando la idea de una conexión entre la variabilidad de la actividad solar y el clima, en este caso entre el mínimo de Maunder y la Pequeña Edad de Hielo (Usoskin *et al.*, 2007; Almasi y Bond, 2009). Llama la atención, que dicha coincidencia deja de cumplirse desde principios del siglo XX, sugiriendo que el forzamiento climático empieza a estar dado por otra variable, posiblemente de carácter antropogénico, pues es el apogeo de la era industrial.

Estas coincidencias en la comparación de los diferentes indicadores corroboran la idea de que el clima en el Este de México ha sido influenciado por la dinámica atmosférica del Atlántico Norte a lo largo del Holoceno, de la misma forma que lo ha sido Groenlandia.

Así también, la comparación visual de la tasa de producción de ^{14}C con las series del Atlántico Norte y con JR1a muestra una cierta coincidencia entre las señales de estos cinco archivos climáticos a lo largo de los casi siete milenios de registro de JR1a. Queda pues claro, que la actividad solar pudo haber sido un forzamiento del clima terrestre, en particular para el periodo

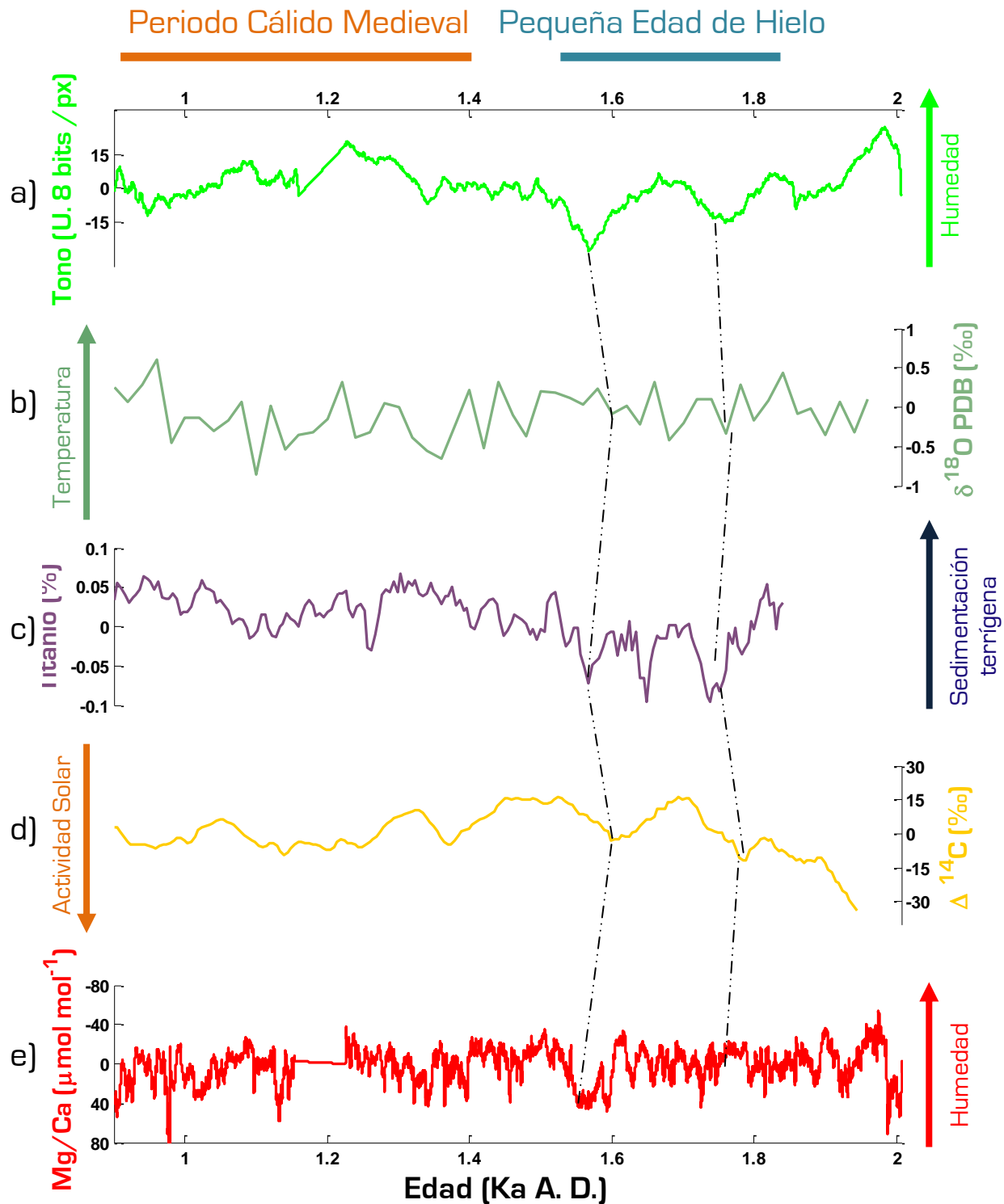


Figura 8.5. Comparación entre a) La escala de grises de JR1a (verde), b) El $\delta^{18}\text{O}$ del GRIP (verde grisáceo), c) El porcentaje de titanio de Cariaco (morado), d) La tasa de producción calibrada de ^{14}C INTCAL04 (naranja) y e) La relación Mg/Ca de JR1a (rojo, el eje “y” esta invertido) para el intervalo de tiempo comprendido entre el 900 D. C. y el año 2000 D. C., donde se observan el cálido medieval y la Pequeña Edad de Hielo. los Eventos Bond 0 y 1 (franja azul, el número indica el evento referido). Las flechas indican el sentido de la variable humedad y de la actividad solar.

anterior al 3000 A. C. cuando estaba presente el Optimo Termal Climático (Figura 8.2), así como el Evento Climático del Holoceno 2 (Figura 8.3), periodos en los que $\Delta^{14}\text{C}$ era máximo (Figura 8.1) (Mayewski *et al.*, 2004). Para el CCR 3 (Figura 8.3) y el cálido medieval (Figura 8.5) es más difícil atribuirles un mecanismo específico, aun cuando el primero, si bien no coincide con un máximo en el $\Delta^{14}\text{C}$, sí coincide con un máximo en la producción de ^{10}Be (en los últimos párrafos, daremos la implicación de esto).

8.2 Espectro cruzado entre los archivos climáticos globales y las series de JR1a

Para los tres archivos del Atlántico Norte, así como el archivo ^{14}C INTCAL04 se realizaron análisis de espectro cruzado por el método de Blackman-Tukey, para comparar con la escala de grises y la relación Mg/Ca de JR1a, respectivamente. Así, el análisis de espectro cruzado por el método de Blackman-Tukey muestra las señales correspondientes a ciclos climáticos que correlacionan entre la escala de grises de JR1a y el archivo de $\delta^{18}\text{O}$ del GISP₂ con su correspondiente coherencia (Figura 8.6a). La señal más significativa es la correspondiente al ciclo de 71 años, ya que tiene una potencia alta en el espectro cruzado, al igual que la más alta coherencia.

El análisis de espectro cruzado Blackman-Tukey para las series de Mg/Ca de JR1a y el $\delta^{18}\text{O}$ del GISP₂ con su correspondiente coherencia muestra la señal correspondiente a un ciclo de 112 años como la más significativa (Figura 8.6c). La figura 8.6, muestra el resto de las señales intensas cuya coherencia es mayor a 0.2 para los dos análisis. Dichas señales, realmente aparecen tanto en el espectro cruzado del $\delta^{18}\text{O}$ del GISP₂ con la escala de grises, como con Mg/Ca. Sin embargo, su respectiva coherencia es muy diferente, (Figura 8.6b y 8.6d). De manera que de la mayor significancia en las señales correspondientes a ciclos de 169 y 127 años, (que como se verá en el siguiente capítulo corresponden a ciclos creados por la interacción del campo geomagnético y el viento solar) se puede inferir que estos ciclos están bien marcados en la escala de grises. Por otro lado en el Mg/Ca, además de estos ciclos, también están bien marcados los de 30 años. Esta señal está presente también en la escala de grises, pero con una coherencia menor. Una lista de las señales que tienen una coherencia ≥ 0.2 y su periodicidad asociada para ambos espectros cruzados aparece en la Tabla 8.1. El espectro cruzado generado entre las series del $\delta^{18}\text{O}$ del GRIP y la escala de grises (Figura 8.7a) y entre éste y la serie de Mg/Ca (Figura 8.7) muestra como señal de mayor potencia y coherencia, la correspondiente a la periodicidad de 47 años, la cual está asociada a los ciclos multianuales de Abbot, los cuales, se piensa son inducidos por el sol (Hoyt y Schatten, 1997).

GISP₂ vs JR1a

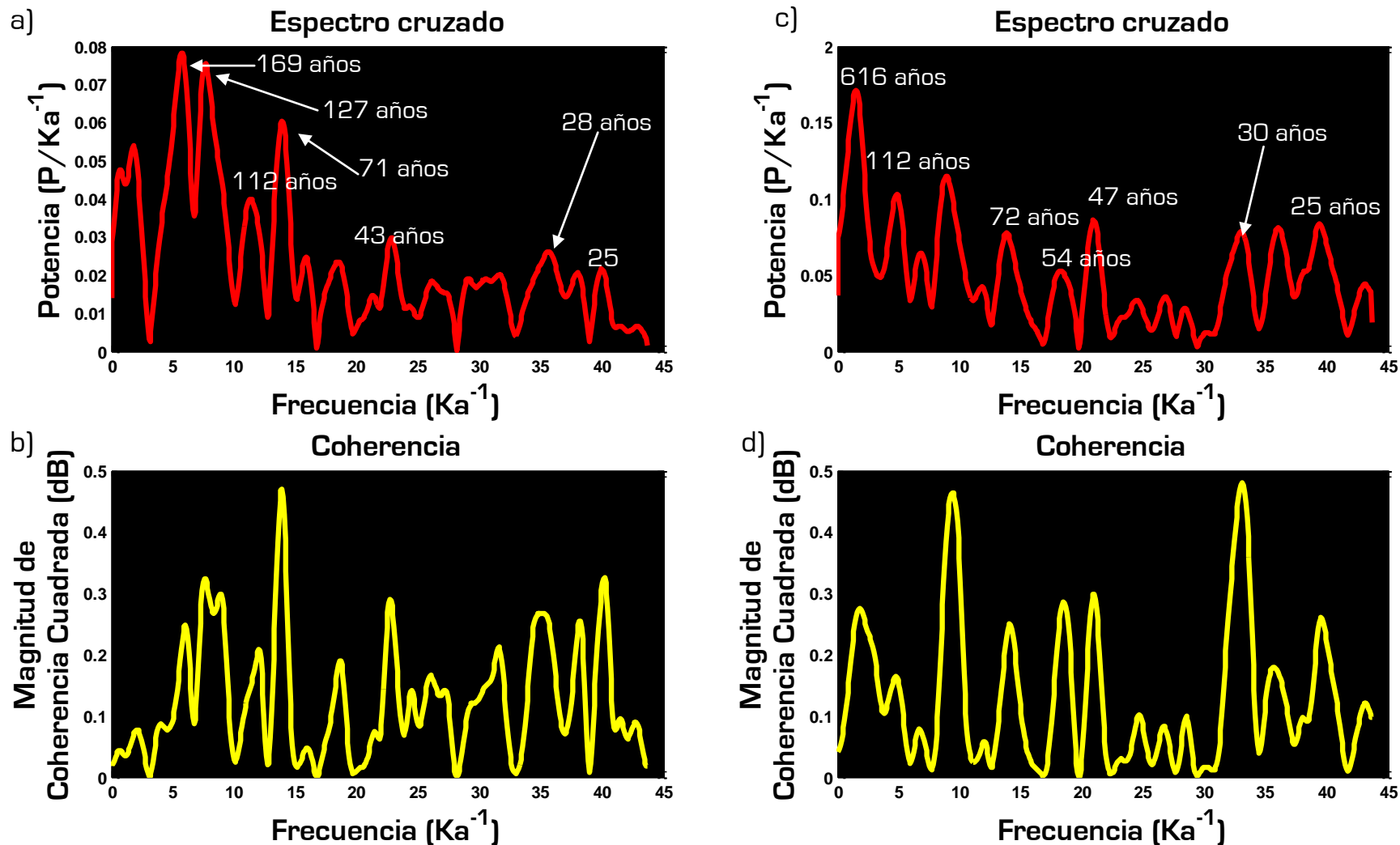


Figura 8.6. a) Espectro cruzado Blackman-Tukey de la series escala de grises JR1a y $\delta^{18}\text{O}$ del GISP₂, b) La Coherencia indica la correlación entre los espectros de la escala de grises de JR1a y el $\delta^{18}\text{O}$ del GISP₂ que sirvieron para construir el espectro cruzado, c) Espectro cruzado Blackman-Tukey de las series de Mg/Ca de JR1a y del $\delta^{18}\text{O}$ del GISP₂, d) Coherencia entre los espectros de Mg/Ca de JR1a y del $\delta^{18}\text{O}$ del GISP₂.

GRIP vs JR1a

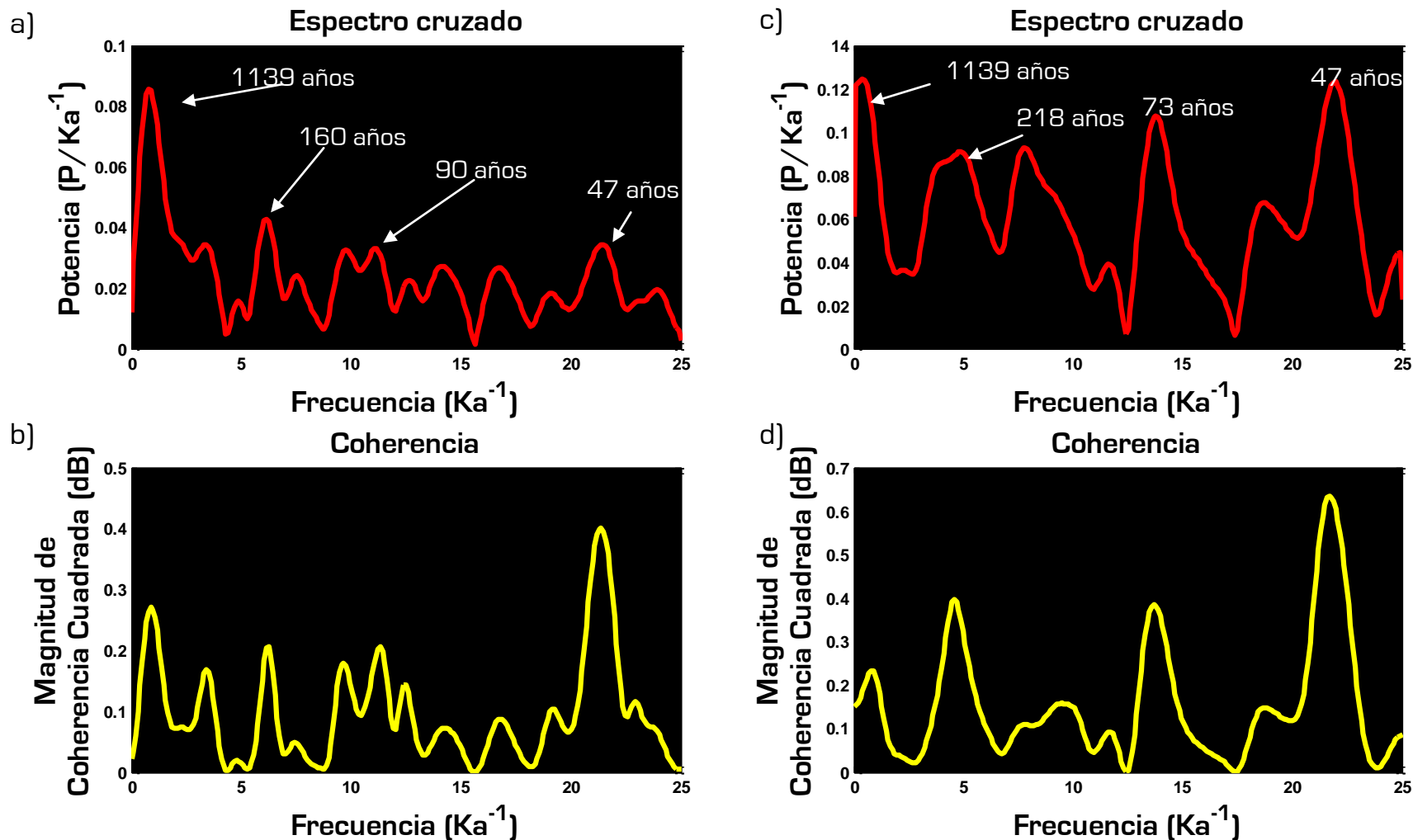


Figura 8.7. a) Espectro cruzado Blackman-Tukey de las series de escala de grises JR1a y el $\delta^{18}O$ del GRIP, b) La Coherencia indica la correlación entre los espectros de la escala de grises de JR1a y del $\delta^{18}O$ del GRIP que sirvieron para construir el espectro cruzado, c) Espectro cruzado Blackman-Tukey de las series de Mg/Ca de JR1a y el $\delta^{18}O$ del GRIP, d) Coherencia entre los espectros de Mg/Ca de JR1a y del $\delta^{18}O$ del GRIP.

En este caso, no aparece la señal de 30 años, ya que estos ciclos tienen casi la misma periodicidad que la resolución del GRIP. Otra señal presente de alta magnitud en ambos espectros, aunque de baja coherencia es la de 1139 años correspondiente a un ciclo de Bond, que como vimos en el capítulo anterior su señal es de naturaleza heterodina, por lo cual se le puede comparar con el ciclo de 1470 ± 500 años, por lo que en este capítulo lo llamaremos de pseudo-Bond]. La figura 8.7, muestra el resto de las señales intensas cuya coherencia es mayor a 0.2 para los dos espectros. La señal de 90 años corresponde a los ciclos de Gleissberg, la de 73 años a los ciclos de la AMO, mientras que las señales de 160 y 218 años corresponden a ciclos dados por la interacción entre el viento solar con la magnetósfera. Una lista de las señales que tienen una coherencia ≥ 0.2 y su periodicidad asociada para estos espectros cruzados aparece en la Tabla 8.1. Curiosamente las señales de coherencia mayor a 0.5, corresponden a ciclicidades entre 5 y 15 años, las cuales tienen una potencia muy pequeña. Estas dos últimas señales junto con una señal de 175-600 años, han sido reportadas en el análisis espectral de indicadores de cuarzo y de la relación ilita/esmectita en Cariaco con un intervalo de confianza mayor al 95% (Black *et al.*, 2009).

El espectro cruzado Blackman-Tukey generado entre las series en escala de grises de Cariaco y la escala de grises de JR1a, muestra como señales de mayor magnitud, las correspondientes a 618, 138 y 91 años, correspondientes a los ciclos de interacción de viento solar-magnetosfera y al ciclo de Gleissberg (figura 8.8a). Sin embargo dichas señales tienen un nivel de coherencia aproximado al 0.2 (figura 8.8b).

El análisis de espectro cruzado Blackman-Tukey entre la escala de gris de Cariaco y de Mg/Ca de JR1a, muestra que las señales de mayor magnitud y coherencia superior a 0.3, son aquellas correspondientes a 128 y 56 años, mientras que la señal de mayor coherencia es la de 8 años, aunque su potencia es mínima. También, muestra otras señales con coherencia superior a 0.3 a frecuencias altas, pero cuya magnitud en el espectro es muy pequeña (figura 8.8c y 8.8d). Una lista de las señales que tienen una coherencia ≥ 0.1 y su periodicidad asociada para los espectros cruzados de Cariaco aparece en la Tabla 8.1.

El análisis de espectro cruzado Blackman-Tukey muestra para el archivo de ^{14}C INTCAL04 y la serie de la escala de grises de JR1a como señal de mayor magnitud y coherencia significativa superior a 0.3, al ciclo de 190 años, que sería producto de la interacción del viento solar-magnetosfera (Figura 8.9a), mientras que la señal de 47 años, sería la de más alta coherencia.

En el caso del espectro cruzado Blackman-Tukey del archivo de ^{14}C INTCAL04 y la serie de Mg/Ca de JR1a la señal de mayor potencia, cuya coherencia significativa es superior a 0.2, es la de 787 años, componente del ciclo heterodino de Bond [Figura 8.9c]. Aquí la señal de 14 años es la de más alta coherencia.

La Tabla 8.1 muestra la lista de las señales que tienen una coherencia ≥ 0.1 y su periodicidad asociada para los espectros cruzados entre los diferentes archivos globales y los indicadores de JR1a. Sólo el ciclo de alta frecuencia de Abbot (Abbot HF), aparece en todos los espectros cruzados. El ciclo de 5 años, cuya coherencia es mayor a 0.5, sólo aparece en los archivos de Cariaco, debido a la resolución del mismo. La falta del siguiente intervalo de señales, de 11 hasta 47 años, en los diferentes archivos se explicaría también por la resolución de los mismos. Hay que destacar que la señal tri-decanal asociada al PDO, cuyos efectos deberían ser casi imperceptibles en el Atlántico, también puede estar asociado a un ciclo solar de Hale, cuya naturaleza es magnética. La aparición de la señal de PDO alrededor de 50 años, resulta más difícil de explicar, en *sensu stricto*, esta señal aparece a los 52 años y la comparación con cariaco la tiene a 61 años por lo que podría ser de otra índole. La señal del AMO, está presente en todos los archivos, aunque no en todos los indicadores. Para la escala de grises esta señal no es significativa al compararse con el GRIP y el $\Delta^{14}\text{C}$.

La serie de señales atribuidas a la interacción del campo geomagnético con el viento solar presenta una gran variación. Estas señales son de alta potencia y coherencia con GISP₂; GRIP y Cariaco. Sin embargo, no lo son en el archivo $\Delta^{14}\text{C}$. Sería de esperar que, debido a que el $\Delta^{14}\text{C}$ depende principalmente de la interacción del viento solar y el campo magnético terrestre, estas señales tendrían mayor coherencia. Sin embargo, el hecho de que no sea así, no es del todo una contradicción pues existe la posibilidad de que la señal sea amplificada por la circulación atmosférica y oceánica [Cosford *et al.*, 2008]. El ciclo solar bien conocido de Suess aparece sólo al compararse el GRIP; Cariaco y $\Delta^{14}\text{C}$ con el Mg/Ca. La señal de 616, no está asociada con un ciclo específico, aunque ha sido reportada en otras estalagmitas [Cosford *et al.*, 2008] e indicadores paleoclimáticos [Debret *et al.*, 2009].

Recordemos que la señal Seudo-Bond, ha sido explicado como una frecuencia heterodina, es decir producto de la mezcla de dos o más señales. De igual forma las señales alrededor del 750 y 930, serían las componentes primarias [C. P.] seculares de la señal de 2400 [que aquí no aparece] [Clemens, 2005]. Estas señales tienen una muy baja coherencia.

Escala de Grises de Cariaco vs JR1a

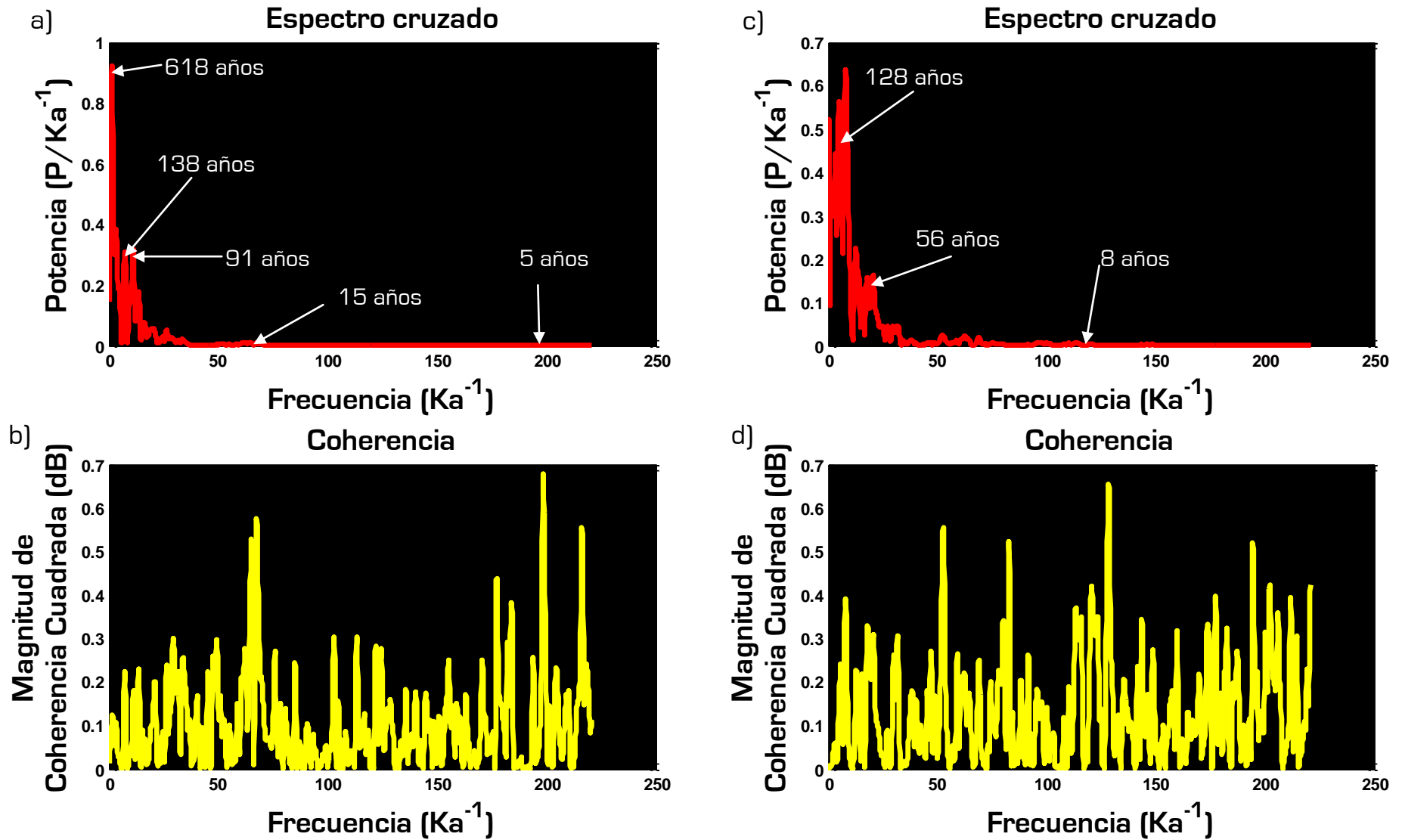


Figura 8.8. a) Espectro cruzado Blackman-Tukey de las series de escala de grises de JR1a y de Cariaco, b) La Coherencia indica la correlación entre los espectros de la escala de grises de JR1a y de Cariaco, c) Espectro cruzado Blackman-Tukey de las series de Mg/Ca de JR1a y de la escala de grises de Cariaco, d) Coherencia entre los espectros de Mg/Ca de JR1a y de la escala de grises de Cariaco.

¹⁴C INTCAL04 vs JR1a

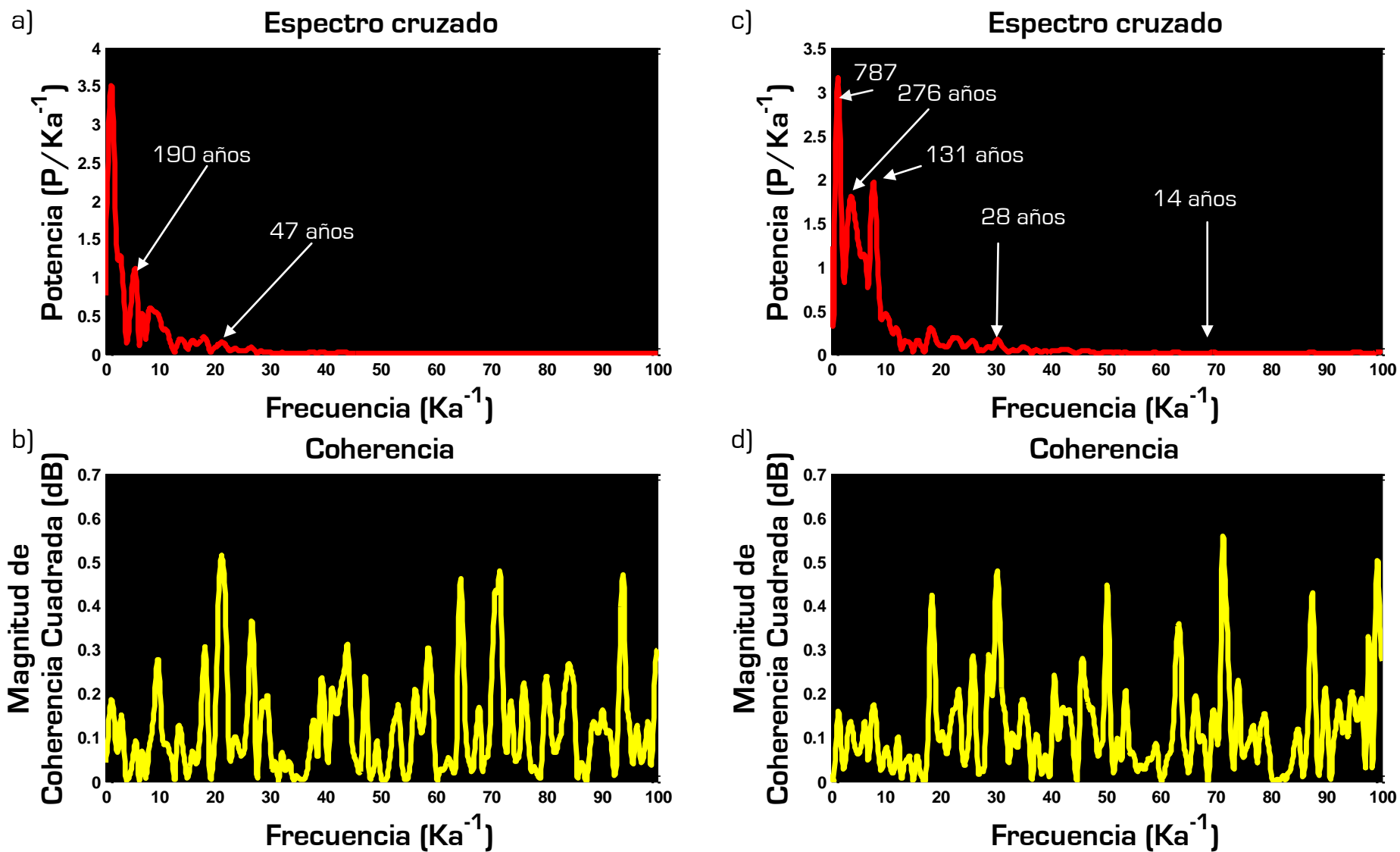


Figura 8.9. a) Espectro cruzado Blackman-Tukey de las series escala de grises JR1a y la tasa de producción calibrada de ¹⁴C INTCAL04, b) La Coherencia entre los espectros de la escala de grises de JR1a y del la tasa de producción calibrada de ¹⁴C INTCAL04, c) Espectro cruzado Blackman-Tukey de las series de Mg/Ca de JR1a y la tasa de producción calibrada de ¹⁴C INTCAL04, d) Coherencia entre los dos espectros anteriores.

El resultado del análisis del espectro cruzado de las diferentes series de tiempo apoya la existencia de un forzamiento solar en el clima. Además de confirmar lo que veíamos en la comparación visual en cuanto a que JR1a tiene patrones climáticos similares a los del resto del Atlántico Norte. El gran problema radica en pensar en un mecanismo por medio del cual, la actividad solar y en particular la actividad magnética de esta estrella, pueda influir en el clima terrestre. Dicho problema no es trivial. Así, para periodos recientes ha sido demostrado, que una disminución en la actividad solar, manifestada por un menor número de manchas solares correlaciona con un aumento en la tasa de producción de ^{14}C (Bard *et al.*, 1997), ya que el campo magnético solar es más débil, por lo que permite el paso de una mayor cantidad de rayos cósmicos (Otaola *et al.*, 2003).

Sin embargo, existieron momentos en el Holoceno, que presentaban una alta tasa de producción de carbono, cuyo origen solar es cuestionable. Es así, que se ha responsabilizado a los rayos cósmicos de la producción de ^{14}C , por lo que se ha comparado esta tasa de producción con la del ^{10}Be (Bard *et al.*, 1997). Resulta que en efecto, esta tasa era alta para el cuarto milenio A. C. (Raspopov *et al.*, 2007).

En nuestra presentación de la serie de ^{14}C , aparece en primera instancia que la variación en la tasa de producción no tiene valores muy diferentes a los de por ejemplo, el último milenio, lo cual es resultado de la eliminación de la tendencia. La figura 8.1 muestra la serie original, donde se ve claramente que la tasa de producción era definitivamente más alta para los años en cuestión.

Así, tenemos que en esos momentos el clima estaba determinado en gran medida por los rayos cósmicos. Este es un hecho importante, pues se ha debatido qué tan importante es la actividad solar y la radiación cósmica en el cambio climático a escalas temporales del orden de siglos.

El problema está en definir un mecanismo plausible, en el cual los rayos cósmicos generen un impacto en el clima. Así se ha propuesto que los rayos cósmicos, capaces de penetrar hasta la atmósfera terrestre, chocarían con las moléculas de O_2 y N_2 produciendo una cascada de partículas más pequeñas e ionizantes. Los iones producidos favorecerían a su vez la formación de aerosoles que servirían como núcleos de condensación para la formación de nubes (Baruch, 2008).

Así un primer intento de correlación entre los rayos cósmicos y la formación de nubes en datos contemporáneos, presentó una correspondencia máxima si sólo se tomaban en cuenta las nubes bajas, menores a 3.2 Km de altitud, en la zona intertropical (Svensmark y Marsh, 2003).

Comparación con archivos paleoclimáticos globales

Tabla 8.1 Señales obtenidas por el espectro cruzado entre los archivos paleoclimáticos del GISP, GRIP, Cariaco y ¹⁴C INTCAL04 con la escala de grises y la relación Mg/Ca de JR1a. Las señales tienen una coherencia ≥ 0.2 , exceptuando aquellas indicadas con el asterisco que tienen una ≥ 0.1 . La primera columna indica la periodicidad asociada a cada señal. El valor de la señal esta dado en años. El color indica un mismo fenómeno asociado a la producción de la señal.

Periodicidad Asociada	GISP ₂		GRIP		Cariaco		¹⁴ C INTCAL04	
	Escala de grises	Mg/Ca	Escala de grises	Mg/Ca	Escala de grises	Mg/Ca	Escala de grises	Mg/Ca
					5	8		
Schwabe						11	11	11
PDO- Hale	25	25			15	18	15	13
Bruckner	27	29			34	36	38	28
Abbot HF	43	47	47	47	47	42	47	44
PDO		54				56	55	56, 59
AMO	71	72		73	73	70		69
Gleissberg			90		91	82		93
CGM-VS	112	112				101	105*	107*
CGM-VS	127				138	128	121*	131*
CGM-VS	169		160				150*	
CGM-VS							190*	
de Vries-Suess				218				
CGM-VS								276
?		616			618*			
C. P.					772*			787*
C. P.							931*	
Heterodina			1139	1139				

Sin embargo, por efectos del campo magnético, la mayoría de los rayos cósmicos deben entrar por los polos, por lo que la variación en la cubierta de nubes debería ser mayor a altas latitudes y no en las regiones intertropicales. El caso es que la probabilidad de relación entre los rayos cósmicos y la cobertura nubosa es del 23% (Sloan y Wolfendale, 2008). Con esto en mente, acordémosnos que en nuestras series de tiempo de JR1a, para el intervalo de 1000 años más antiguo, los valores de humedad, en general son más altos que los que existieron en los milenios posteriores.

Acordémosnos que la tendencia de Mg/Ca y la tasa de crecimiento de JR1a indican un cambio de mayor a menor humedad a lo largo de los últimos 6854 años (capítulo IV, 4.4.1, capítulo VI, 6.4). De manera que un flujo de rayos cósmicos mayor habría dado una producción mayor de nubosidad, que a su vez podría haber reflejado en mayor precipitación y humedad, lo que en resumidas cuentas sí observamos para los primeros mil años. De manera que el primer milenio de nuestra comparación sugiere una relación causa y efecto entre la humedad y la alta productividad de ^{14}C , que a su vez es un indicativo del aumento en la incidencia de radiación cósmica sobre la Tierra.

8.3 Consideraciones sobre la comparación con archivos paleoclimáticos globales

Las coincidencias con las diferentes series de tiempo, hacen pensar que la serie generada a partir de la escala de grises es un método para obtener información paleoclimática, tan confiable, como los demás. Por supuesto aquellas partes donde las coincidencias son mínimas, no sólo son producto de la diferencia de la estructura y resolución de los indicadores, sino de las variables climáticas locales.

Recapitulando, los puntos importantes vistos hasta ahora en esta comparación con los diferentes archivos paleoclimáticos e instrumentales, fueron ordenados cronológicamente y son:

- Una mayor cantidad de radiación cósmica sucedió para el lapso de mayor humedad, acontecido entre el 4.9 Ka. y el 4.5 Ka A. C.
- Los archivos de JR1a correlacionan con los archivos del Atlántico Norte, mostrando la existencia de los ciclos de múltiples décadas de Abbot.
- Los Eventos Climáticos del Holoceno son registrados en el archivo de la escala de grises de JR1a, mostrando tendencias similares a los de los indicadores del Atlántico Norte.
- Los efectos de la Pequeña Edad de Hielo se sintieron en la región de Jalpan, al existir un descenso en la humedad.

Capítulo IX

Aportaciones a la descripción del clima de la segunda mitad del Holoceno

"Белый снег серый лед
На растрескавшейся земле
Одеялом лоскутным на ней
Город в дорожной петле
А над городом плывут облака
Закрывая небесный свет
А над городом желтый дым
Городу две тысячи лет
Прожитых под светом
звезды по имени Солнце."¹

Звезда по имени Солнце, Виктор Робертович Цой.

Una vez que hemos testificado que la escala de grises es un archivo paleoclimático, podemos utilizarlo para realizar una reconstrucción paleoclimática. El presente capítulo tiene como finalidad conocer los aportes de JR1a a la reconstrucción climática de Mesoamérica durante el Holoceno tardío, que es el tiempo durante el que creció esta estalagmita. JR1a se ha convertido en el archivo paleoclimático de más alta resolución para Mesoamérica, el cual contiene señales que registran diferencias entre invierno y verano, gracias a los parámetros establecidos durante la aplicación del filtro matemático. Por otro lado la incertidumbre de su fechamiento hace difícil establecer cuando ocurrieron esas señales. Hemos visto que a escala centenal JR1a coincide con patrones climáticos a escala global (o por lo menos del Hemisferio Norte).

Para poder hacer una reconstrucción regional del clima, es menester comparar a JR1a con otros archivos locales. Una treintena de archivos Paleoclimáticos existen para México (no todos en Mesoamérica) para el Pleistoceno Tardío y el Holoceno (Metcalf et al., 2000). Pero menos de la mitad corresponden a registros de la segunda mitad del Holoceno (Metcalf y Davies, 2007), destacándose por cubrir la mayor parte de la temporalidad de JR1a, el núcleo de sedimentos marinos BAP96-CP de la bahía de la Paz, Baja California (Pérez-Cruz, 2006), los núcleos de sedimentos del lago Chignahuapan en la cuenca superior del río Lerma en Sta. Cruz Atizapán en el centro de México (Caballero *et al.*, 2002), y los núcleos de sedimentos lacustres de Chichancanab, en la península de Yucatán (Hodell *et al.*, 2001).

¹ Nieve blanca, hielo gris, sobre la tierra destruida, son una sabana que la remienda. La ciudad está sobre el nudo querido, y sobre las ciudades flotan las nubes, la celestial luz abierta y sobre las ciudades está el humo amarillo. Ciudad de dos mil años, viva por la luz de una estrella llamada Sol.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

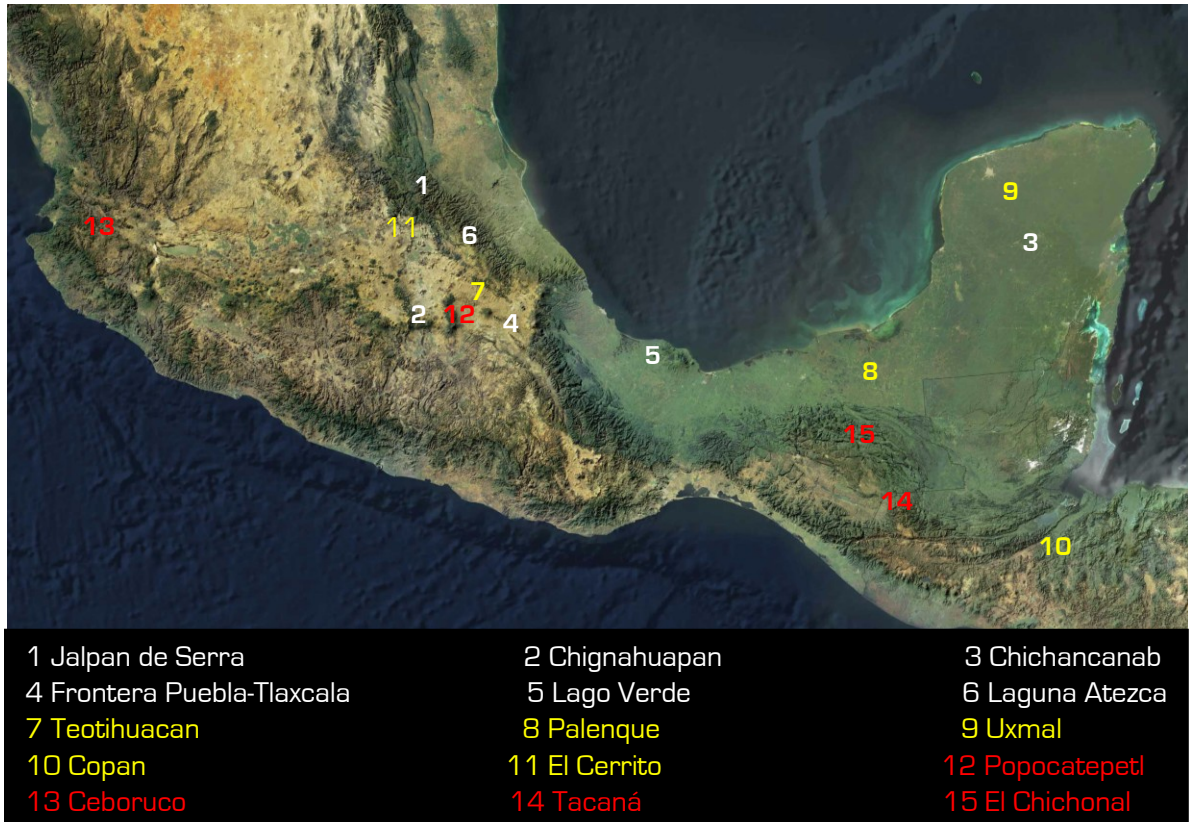


Figura 9.1. Mapa de México donde se muestra la localización de los principales registros paleoclimáticos (**blanco**), las diferentes ciudades mesoamericanas existentes durante el clásico (**amarillo**), así como los volcanes que tuvieron una erupción de gran magnitud durante el periodo que duraron los Horizontes Precolombinos (**rojo**). Cada número corresponde a un lugar citado

Compararemos visualmente con estos dos últimos archivos, ya que el archivo de la bahía de la Paz está influenciado en gran medida por el monzón mexicano, por lo que no esperamos patrones muy parecidos a los de JR1a, [sin embargo a su tiempo comentaremos sobre las similitudes con él], mientras que los archivos de Chignahuapan y Chichancanab tienen clima Cw y clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, respectivamente. De la información obtenida por Caballero *et al.* (2002) utilizaremos la reconstrucción que hacen del nivel lacustre en Sta. Cruz Atizapán con base a la concentración de diatomeas, dicho archivo tiene una resolución promedio de 0.25 Ka. De los núcleos de Chichancanab, para los primeros 4854 años de JR1a utilizaremos los registros basados en el porcentaje en peso de CaCO_3 y el $\delta^{18}\text{O}$ de la especie de gasterópodos *Pyrgophorus coronatus*, que son indicadores de la relación Evaporación/Precipitación, E/P y cuya resolución promedio es, en ambos casos de 0.03 Ka. Mientras que utilizaremos éste último y el registro de densidad del sedimento, [que también es un indicador E/P y tiene una resolución de 8 años] para el resto del Holoceno tardío. Cabe destacar que por petición de los autores del trabajo de Chignahuapan, a estos datos no les eliminamos su tendencia.

En la Figura 9.1 se puede observar que por su posición, Jalpan estaría influenciada por los vientos alisios y Nortes que bañan a la península de Yucatán, si bien su posición, sobre todo su altura hace que se manifiesten de manera diferente. De igual forma, se observa que la región central de México recibe la humedad sobrante de estos flujos, ya que éstos al chocar con la Sierra Madre Oriental descargan la mayor parte de su humedad. De manera que pensamos que JR1a contiene señales climáticas referentes a la variabilidad de la humedad que habrían estado presentes en mayor o menor escala en las regiones de Yucatán y centro de México, por lo que queda justificada la comparación de los registros de JR1a con los de Chignahuapan y Chichancanab, así como con otros registros que se comentarán para Mesoamérica.

9.1 Apuntes para mediados del Holoceno

Recordemos de la tendencia de Mg/Ca de JR1a que los años correspondientes a la mitad del Holoceno eran en términos generales más húmedos que los del presente. Con esta idea en mente, tenemos que el archivo de Chignahuapan muestra que los niveles lacustres para esa época y hasta el -4.250 C. J. P. (4250 a. C.), fueron los más altos del Holoceno. Conservándose un nivel estable. Destaca luego un evento de aguas muy someras, fechado en el -3494 C. J. P. (3495 a. C.), seguido por variaciones que terminaron aproximadamente por el \sim -550 C. J. P. (\sim 550 a. C.) Para los registros de Chichancanab, tenemos que las similitudes con JR1a son mayores para el $\delta^{18}\text{O}$, para esta serie es claro que hay una mayor cantidad de eventos húmedos antes del -4250 C. J. P. (Figura 9.2).

Mientras que el evento del -3494 C. J. P. se ve como una serie de eventos relativamente intensos con tendencia a una baja relación E/P que correlacionan con el Evento de Cambio Climático Rápido 4, CCR4 (Figura 8.2, capítulo VIII). Contrariamente para el archivo de la bahía de la Paz, las condiciones fueron cálidas y secas hasta aproximadamente \sim -500 C. J. P. (500 a. C.). Uno de los puntos interesantes, es que el comienzo de la variabilidad en Chignahuapan, que también es registrado en Chichancanab correlaciona bastante bien con una serie de eventos marcados del ENSO (Figura 7.4b, capítulo VII) que se dio entre el -3.2 Ka C. J. P. al -1.4 Ka. C. J. P., pudiendo ser éste, uno de los responsables de la variabilidad.

El CCR3 está registrado en los archivos de Chichancanab como en JR1a, donde se ve una coincidencia en los patrones climáticos (Figura 9.3). Las coincidencias en el CCR 2 no son tan claras. Cabe señalar lo marcado que son una serie de eventos de sequía entre el -1.5 al -1.3 C. J. P., que aparecen en el archivo del % CaCO_3 , y que también aparecen en ambos registros de JR1a, sobre todo en el archivo de la escala de grises (Figura 9.3b, c, d y e).

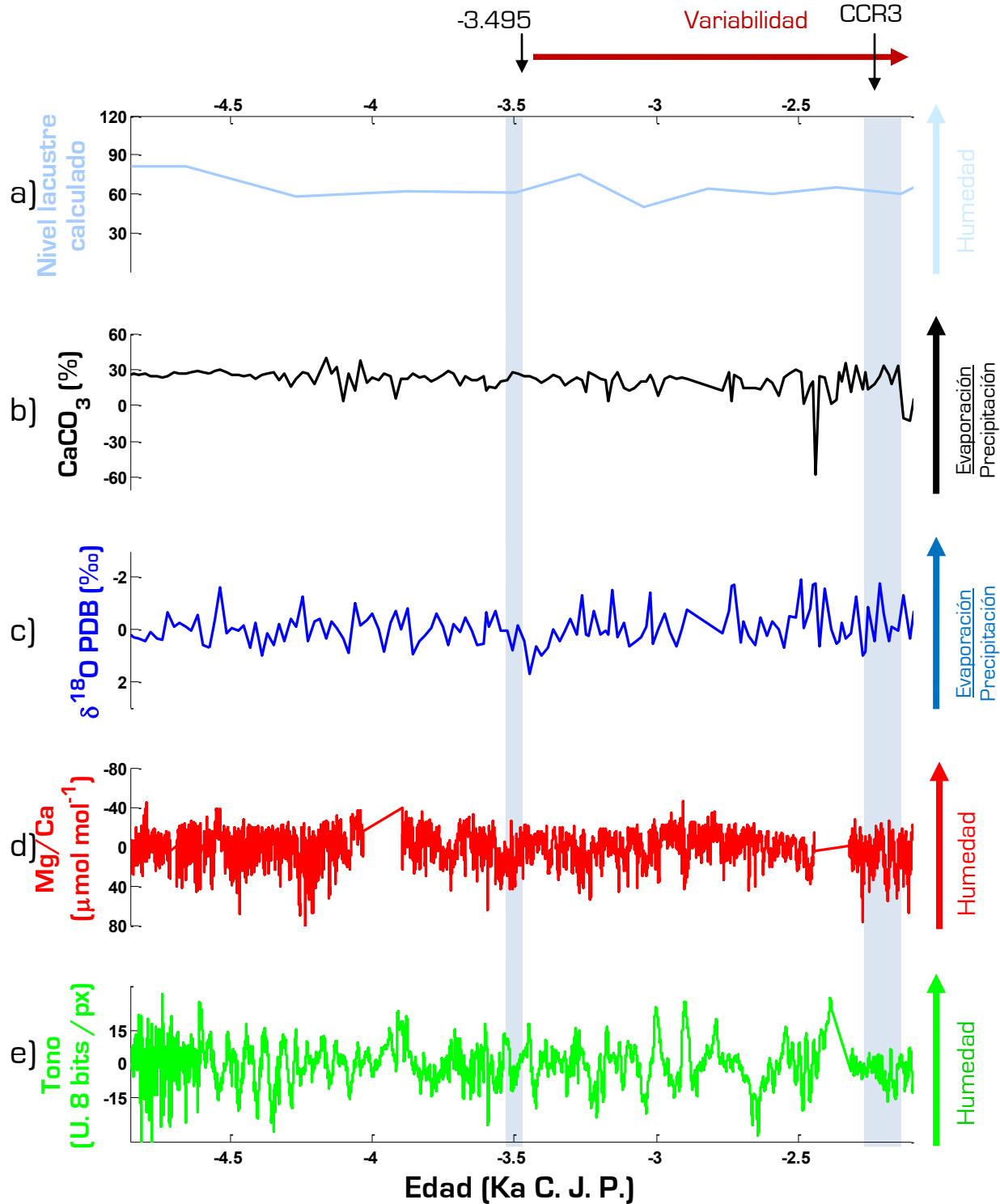


Figura 9.2. Comparación entre a) el nivel lacustre de Chignahuapan (azul claro), b) El porcentaje en peso de CaCO₃ de Chichancanab (negro), c) El δ¹⁸O de *Pyrgophorus coronatus* de Chichancanab (azul), d) La relación Mg/Ca de JR1a (rojo) y e) La escala de grises de JR1a (verde) para el intervalo de tiempo comprendido por los -4.7 Ka C. J. P. y los -2.5 Ka C. J. P., las zonas sombreadas (azul claro) muestran el evento de sequía ~ -3.5 Ka C. J. P., y el CCR3, mientras que la flecha roja indica un periodo marcado por una variabilidad en la humedad.

Aportaciones a la descripción del clima de la segunda mitad del Holoceno

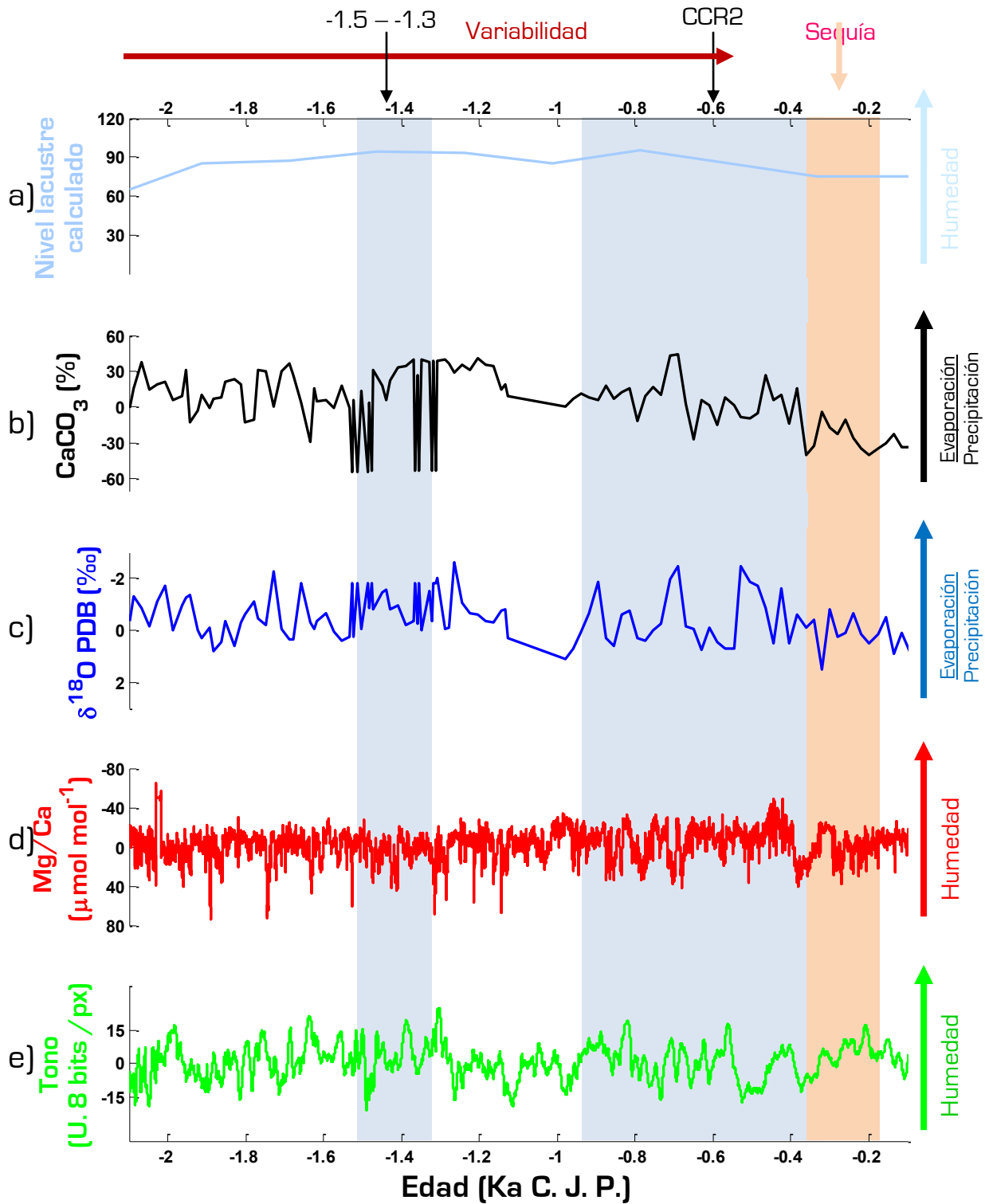


Figura 9.3. Comparación entre a) el nivel lacustre de Chignahuapan (azul claro), b) El porcentaje en peso de CaCO₃ de Chichancanab (negro), c) El δ¹⁸O de *Pyrgophorus coronatus* de Chichancanab (azul), d) La relación Mg/Ca de JR1a (rojo) y e) La escala de grises de JR1a (verde) para el intervalo de tiempo comprendido por los -2.1Ka C. J. P. y los -0.0 Ka C. J. P. Las zonas sombreadas en azul claro muestran el evento de sequía ~ -1.5 a -1.3 Ka C. J. P., y el CCR2, la zona en rosa muestra periodos de baja humedad para Mesoamérica.

De estos eventos puntuales, el último a los -1.3 C. J. P., ha sido observado en los registros de las espeleotemas de Heshang y de Dongge en China, dicho evento ha sido interpretado para esas regiones como una disminución en la intensidad del monsoon, por lo cual se piensa podría estar asociado al Evento Bond 2 (Cosford *et al.*, 2008), (aun cuando no está dentro del lapso definido para el CCR2, (lo que es un ejemplo de la polémica entre la correspondencia de los CCR con los Eventos Bond). Posiblemente por ser eventos puntuales, la resolución del registro de Chignahuapan no permite verlos (Figura 9.3a).

9.2 Apuntes para el Clásico

Para el horizonte clásico tenemos la oportunidad de correlacionar el registro de JR1a con los patrones de desarrollo de varias culturas. Si bien se tiene evidencia de que la actividad humana tuvo impacto sobre el clima y viceversa desde el formativo, es el clásico donde se desarrollaron y cayeron varias culturas mesoamericanas, en especial Teotihuacan y los Mayas,

Además es este lapso del Holoceno, el que más atención ha tenido, ya que se piensa es un ejemplo claro de los efectos del clima sobre el desarrollo cultural. Sobre este último punto, cabe señalar, que somos conscientes de que el desarrollo y ocaso de una civilización es un tema complejo que depende de varios factores políticos, económicos, geográficos, sociológicos, religiosos, biológicos y psicológicos (Springs, 2006). Así, en el plano humano tenemos; las guerras, invasiones, la descomposición social, el bloqueo de rutas comerciales, al igual que el cambio de creencias en la cosmovisión. Mientras que en el plano ambiental tenemos el desgaste de la infraestructura, la sobreexplotación o escases de recursos naturales, el cambio climático e incluso una programación genética a la extinción.

9.2.1 El caso Maya

En el caso de Mesoamérica, el abandono de varias ciudades Mayas, Palenque, Uxmal y Copán entre otras, en el Clásico Tardío, ha sido motivo de varios estudios (Fitch, 2006). Sin negar la posibilidad de invasiones, guerras o epidemias, el problema puede reducirse a elegir entre la hipótesis del agotamiento de recursos naturales, en especial la sobreexplotación del suelo contra el cambio climático, como factores en el ocaso de esta civilización mesoamericana. Factores que en última instancia serían los causantes de guerras, invasiones o epidemias. El principal problema que enfrentan estas dos hipótesis, es el establecimiento correcto de la temporalidad tanto del abandono o semi-abandono del asentamiento, como el de la señal del indicador paleoambiental. Tal problema sólo puede ser solucionado al correlacionar diferentes

archivos paleoambientales. Entre los argumentos a favor de la hipótesis climática se encuentra un estudio en luminiscencia en una estalagmita de Belice cuyas señales interpretadas como sequías para el 141, 517 y 910 A. D. correlacionan con el abandono preclásico, el hiato y el colapso Maya, respectivamente (Webster *et al.*, 2007). Mientras que periodos de humedad en la misma estalagmita entre el 550 y 100 A. C. correlacionan con la expansión de esta civilización.

Haug *et al.* (2003) habían encontrado señales similares en el archivo de Cariaco, donde fue medido el porcentaje de titanio en un núcleo de sedimentos de este Golfo al que desembocan varios ríos. Estos autores piensan que la rápida expansión Maya entre el 550 al 750 A. D., durante una época húmeda dejó una población que operaba en los límites de la capacidad ambiental y que era muy vulnerable a los sequías multianuales vistas en las señales de 760, 810, 860 y 910 como mínimos en el por ciento de titanio.

Otro punto que apoya la hipótesis climática, es que otras culturas como lo es la civilización peruana de tierras altas llamada Moche o Mochica, conocida por su sofisticada metalurgia y estructuras de adobe, presenta un patrón de desarrollo y ocaso similar (deMenocal, 2001).

Hemos hablado de estos dos archivos, porque a diferencia de los núcleos de sedimentos lacustres de la región o de los archivos edafológicos, no están influenciados por la tasa de erosión local, la cual a su vez podría estar influenciada por factores antropogénicos locales. Aunque se han reportado registros lacustres procedentes de áreas poco pobladas como lo es el mismo lago de Chichancanab (Hodell *et al.*, 2005a). Otra historia se entrevé cuando se considera a éstos.

Así datos de los lagos Petén, Itzá y Salpetén documentan un aumento en la sedimentación desde el preclásico cuando la densidad de población era todavía relativamente baja (Mueller *et al.*, 2008), por lo que se piensa en un cambio de la cubierta vegetal inducida por los pequeños grupos humanos seguida de una erosión rápida y fácil de suelos ahora más erosionables. Curiosamente la menor tasa de erosión del suelo, fue durante la época de mayor densidad de población (Anselmetti, 2007). De esta manera en el norte de Peten se ha encontrado un paleosuelo sepultado en el preclásico debajo de sedimentos con paleosuelos incipientes (Beach, 2003). Aunque la manera maya de cultivar es todavía motivo de controversia, se ha logrado establecer la suplantación de vegetación C₃ (propia de bosques) por C₄ (plantas herbáceas) a partir de la ocupación maya, como se demuestra en Piedras Negras, Guatemala, donde el suelo no ha sufrido estragos desde la influencia Maya (Fernández, 2005) lo que implica cultivo de

plantas como el maíz. Sin embargo, muchos arqueólogos piensan que la caza y la pesca eran las fuentes principales de la alimentación Maya.

La Figura 9.4 muestra la serie de tiempo de JR1a para el tramo 5; en ella diversas señales citadas por Haug *et al.* (2003) y Webster *et al.* (2007) son observadas para el Formativo Terminal y el Clásico. Tenemos así, un periodo de gran sequía alrededor del -650 C. J.P. (651 a. C.). Luego vemos un periodo a partir del -549 C. J. P. (550 a. C.) de gran humedad que correspondería al desarrollo y expansión de varias ciudades Mayas, a diferencia de (Webster *et al.*, 2007), en JR1a dicho periodo de humedad no es continuo, sino que tiene un lapso de sequía entre el -350 y -450 C. J. P. (350-450 a. C.), lapso que también se observa en los registros de Chichancanab (Figura 9.3c y d) (Hodell *et al.*, 2005a). Este periodo terminaría en el 150 A. D., con una sequía que habría sido precedida por un lapso de gran humedad (señal a los 140 A. D.) y que estaría ligada al abandono Maya en el Preclásico. Este último descenso también es registrado en Chichancanab entre el 90 y el 230 A. D. (Hodell *et al.*, 2005a).

La Figura 9.5 muestra un periodo de sequías, que habrían comenzado desde el 150 A. D., con un periodo de humedad alrededor del 350 A. D. que terminaría con una última sequía en el 517 A. D., correspondiente al llamado Hiato Maya, en el cual hubo una baja en la producción de monumentos y estelas en las ciudad de Peten. También citados por Webster *et al.* (2007).

Después de un periodo de dos siglos de humedad, comenzaría una serie de sequías interrumpidas por periodos de humedad, en el 860 y 880 A. D., que terminarían en la señal de sequía del 910 A. D. (900 en escala de grises). Que correspondería al colapso Maya. La señal de 860 y 910 A. D., es también citada por Haug *et al.* (2003) y Webster *et al.* (2007) aunque ellos citan como primera sequía responsable del colapso una señal a 810 años, que no se observa en ninguna de las dos series de JR1a. Estas señales son vistas en el registro de Chichancanab como parte de un descenso de humedad entre el 650 y el 1100 A. D. (Figura 9.7c y b). En este lapso, el registro de densidad del sedimento (Figura 9.7d) muestra una banda alrededor de 670 A. D. que marca una sequía puntual, seguida de 100 años de alta humedad relativa hasta el 770 A. D., que siguen con un periodo de condiciones de alta humedad relativa entre el 870 y el 920 A. D., para culminar con un periodo marcado por cuatro eventos de sequía entre el 920 y el 1100 A. D., cabe señalar que la incertidumbre de estas fechas es de 90 años (Hodell *et al.*, 2005a). Hay que hacer hincapié en que este último lapso es también un periodo de fuertes sequías puntuales en JR1a según lo atestiguan los registros de JR1a, en particular Mg/Ca donde son aun más marcados. Este lapso también se puede observar en los registros del $\delta^{18}\text{O}$ ‰ CaCO_3 (figura 9.7c).

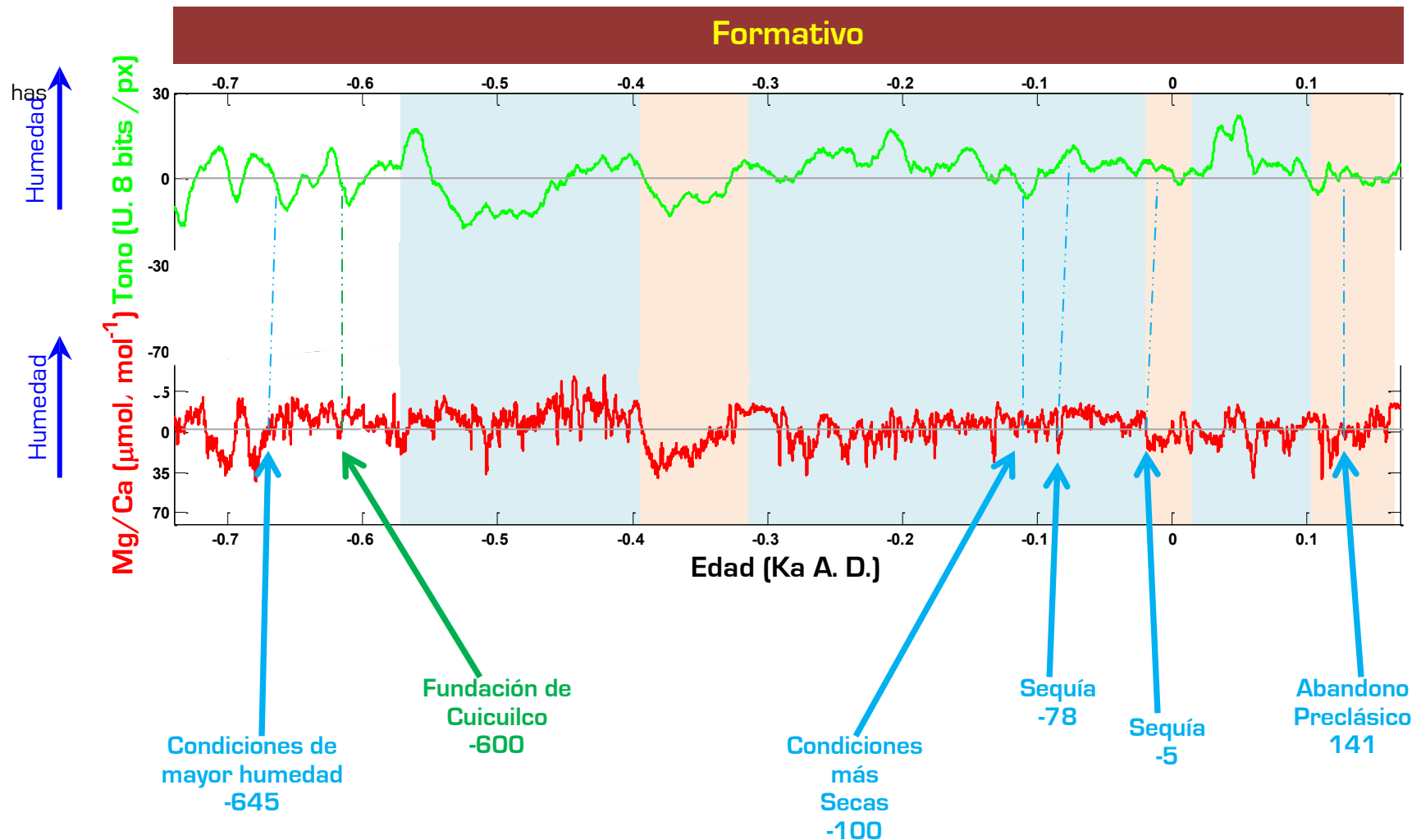


Figura 9.4. Diversas señales citadas por Haug (2003) y Webster (2007), son observadas para el Formativo Terminal y el Clásico para el tramo 5 de las series de tiempo de JR1a. Podemos observar un periodo de sequía alrededor del -650 C. J. P. en la escala de grises. Luego vemos un periodo a partir del -550 C. J. P. de gran humedad (recuadro azul) que correspondería al desarrollo y expansión de varias ciudades mayas, que terminaría en el 150 A. D., con una sequía que había sido precedida por un periodo de gran humedad (señal a los 140 A. D.) y que estaría ligada al abandono Maya en el Preclásico. Sin embargo en JR1a, este periodo estaría interrumpido por dos periodos de sequía (recuadro rosa) el primero entre -400 y el -300 C. J. P. y el segundo en los primeros años del siglo I de nuestra era. El eje de las ordenadas de Mg/Ca fue puesto invertido para su fácil visualización.

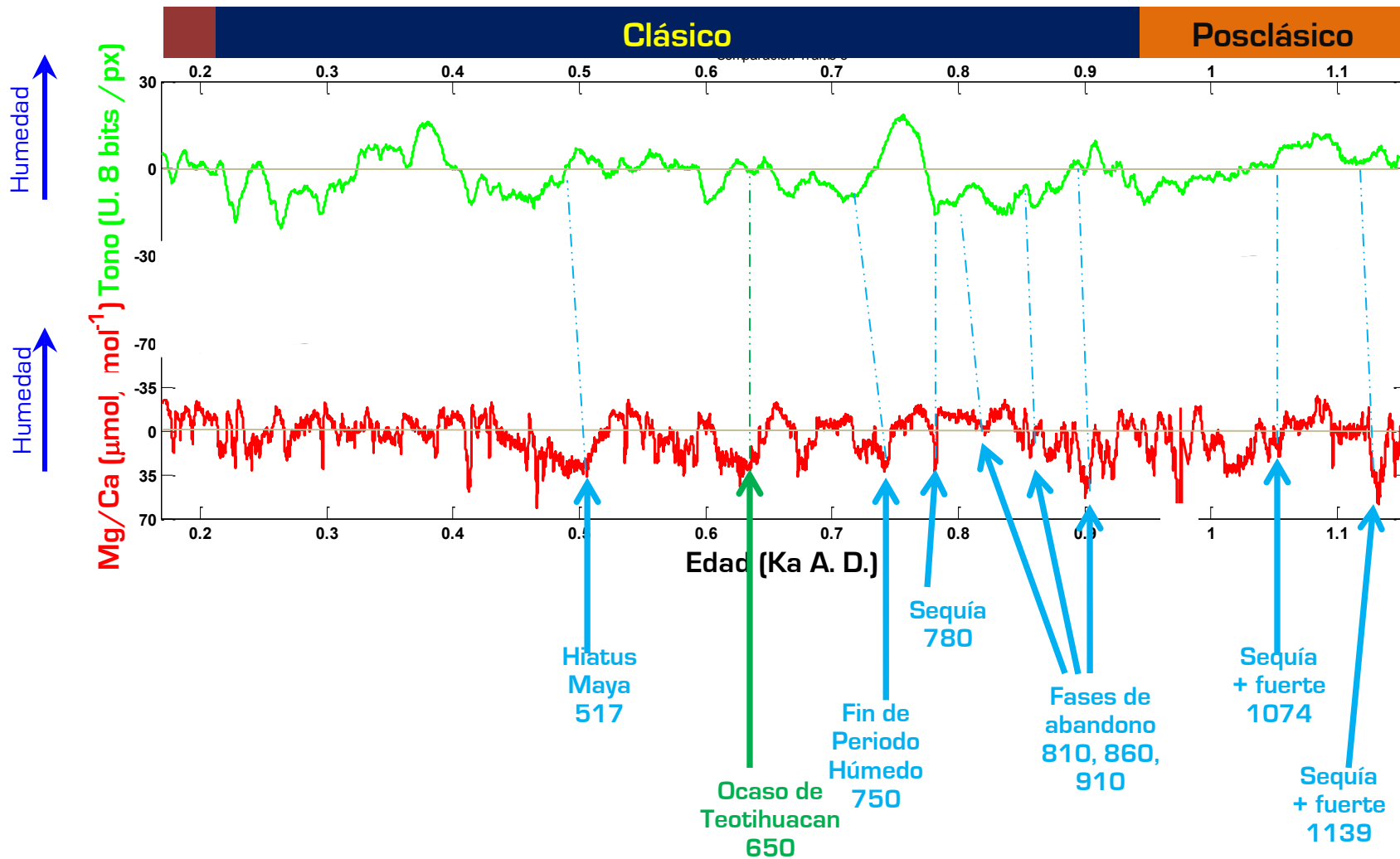


Figura 9.5. Tramo 5 del las series de tiempo de JR1a, en ella se ven diferentes señales climáticas de humedad (mayor intensidad relativa) y de sequía (menor humedad relativa) propuestas por Webster (2007) y por Haug (2003), que pueden ser correlacionadas con el cambio en los asentamientos humanos para las ciudades mayas, teotihuacanas y nahuas. Exceptuando la señal de Hiato Maya en escala de grises, y la de la sequía (Fitch, 2006) a 810 y a 1071 años en ambas series, todas las demás señales coinciden. También se muestra la señal contemporánea al ocaso de Teotihuacan. El eje de las ordenadas de Mg/Ca fue puesto invertido para su fácil visualización.

Si bien hay señales de sequía prácticamente desde el tercer siglo de nuestra era, se puede ver que las que se relacionan con cambios en el desarrollo de las ciudades, son sequías que siguieron a un periodo de gran humedad, en cuyo caso, fue el cambio drástico de condiciones climáticas el responsable de los periodos de estancamiento de la cultura Maya, esto desde el punto de vista climático.

9.2.2 El caso de la zona de influencia Teotihuacana

Para el centro de México tenemos el desarrollo y ocaso de Teotihuacan y de las ciudades a las que influenciaba durante el primer milenio de la era cristiana. Ahora bien, es posible pensar que una sequía en la zona tropical cercana al Golfo, sería más severa para el centro de México. De manera que puede verse (Figura 9.5) que los siglos VII y VIII, donde se sitúa el colapso de Teotihuacan, sufrieron fuertes sequías. Antes de continuar sobre este punto, es necesario referirnos primero a la pérdida de terreno cultivable por erosión del suelo. Para el caso de Teotihuacan se ha visto que un aumento en la tasa de sedimentación en el valle coincide con un aumento en el número de asentamientos (Rivera-Uria *et al.*, 2007). Sin embargo en la Figura 9.5 se ve que el periodo de mayor población (siglo V) coincide con un periodo húmedo. Y mayor humedad implica mayor intemperismo, erosión y sedimentación. De manera que el problema no es trivial.

Así, para el colapso de Teotihuacan, alrededor del 650 A. D., se piensa en un aumento de la aridez por el incremento en la erosión del suelo debido a la deforestación causada por el cambio de uso de suelo (Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2006). Los datos de isótopos estables de carbono arrojan para la región de Teotihuacan y alrededores, plantas C_4 , indicando condiciones más áridas para mediados del Holoceno, suplantadas por plantas C_3 , indicadoras de condiciones más húmedas, hacia el comienzo de la era cristiana.

Para quedar finalmente en el presente con plantas C_4 y CAM, que implican de nuevo aridez (Lounejeva Baturina *et al.*, 2007). Así se puede argüir que siete siglos de agricultura habrían sido los responsables de la aridez que terminaría con el semi-abandono de Teotihuacan. Aun más, se ha pensado que para el centro de México no hay correlación entre cambios climáticos, la erosión del suelo y los patrones culturales, entiéndase desarrollo y ocaso (Heine, 2003).

Por ejemplo utilizando los datos obtenidos por Heine (1978; 2003) en los límites de Puebla y Tlaxcala y los de JR1a (Figura 9.6) se ve que contrariamente a lo que propone este autor, sí hay una correlación entre la evolución de los sistemas de cultivo y el cambio en la humedad. Cabe

destacar que por diversos factores geomorfológicos, la región este de Tlaxcala y Puebla son las que, a pesar de estar influenciado por los alisios, presenta un clima completamente diferente al de Jalpan pues en general es templado subhúmedo con lluvias en verano. Sin embargo, ya que está influenciada por las mismas corrientes que a Jalpan, pensamos que a gran escala se pueden comparar.

Así, podemos ver que las terrazas irrigadas (periodo arqueológico de Texoloc III) fueron usadas durante un periodo de grandes fluctuaciones climáticas de humedad y sequías, que los sistemas de irrigación y chinampas (periodo arqueológico de Tezoquiapan IV) son desarrollados en una época donde la humedad prevalecía, y que éstas junto con sistemas de conservación del suelo fueron usados durante los primeros seis siglos del Clásico (periodo arqueológico Tenanyecac V), cuando sequías prolongadas se dejaban sentir alternadas con periodos bastante húmedos.

La escasa conservación del suelo y la extensión a ambientes marginales es contemporánea a momentos donde la tendencia va hacia una mayor humedad, periodo donde también se encuentran las señales de sequías que habrían terminado con los Mayas (periodo arqueológico de Texcalac VI).

Como es de esperarse, la intensificación de los procesos geomorfológicos por encima y debajo de los 3000 m, correlaciona con JR1a, si bien la precipitación efectiva parece contradictoria a JR1a al ser mayor en un periodo de sequía como los sucedidos a mediados del siglo VII. Lo que pasa, es que la precipitación efectiva depende del balance hidrológico, o sea que si bien la humedad era menor, la tasa de evaporación debió serlo más para aquella región.

De manera que es posible que las tasas de sedimentación estuvieran en primera instancia gobernadas por la cantidad de humedad en el ambiente. Por eso en la zona Maya poblaciones pequeñas fueron capaces de inducir una mayor erosión a finales del Posclásico, que en el Clásico, porque la humedad era superior.

Con esto queda claro, que no negamos el factor humano, sin embargo por sí solo, creemos que no puede explicar todos los patrones observados. Así, resulta lógico, que en el centro de México se desarrollaron las terrazas irrigadas en un momento en que la lluvia era menor (Texoloc III) mientras que se desarrolló el sistema de chinampas (Tezoquiapan IV) en una etapa en que el ambiente contenía mayor humedad. Este periodo correlaciona con un cambio a aguas profundas entre el -800 y el -200 C. J. P. (800 – 200 a. C.) en Chignahuapan, en el centro de México (Figura 9.7a), para cambiar hacia aguas más someras alrededor del -200 C. J. P. en Chignahuapan (Caballero *et al.*, 2002).

Aportaciones a la descripción del clima de la segunda mitad del Holoceno

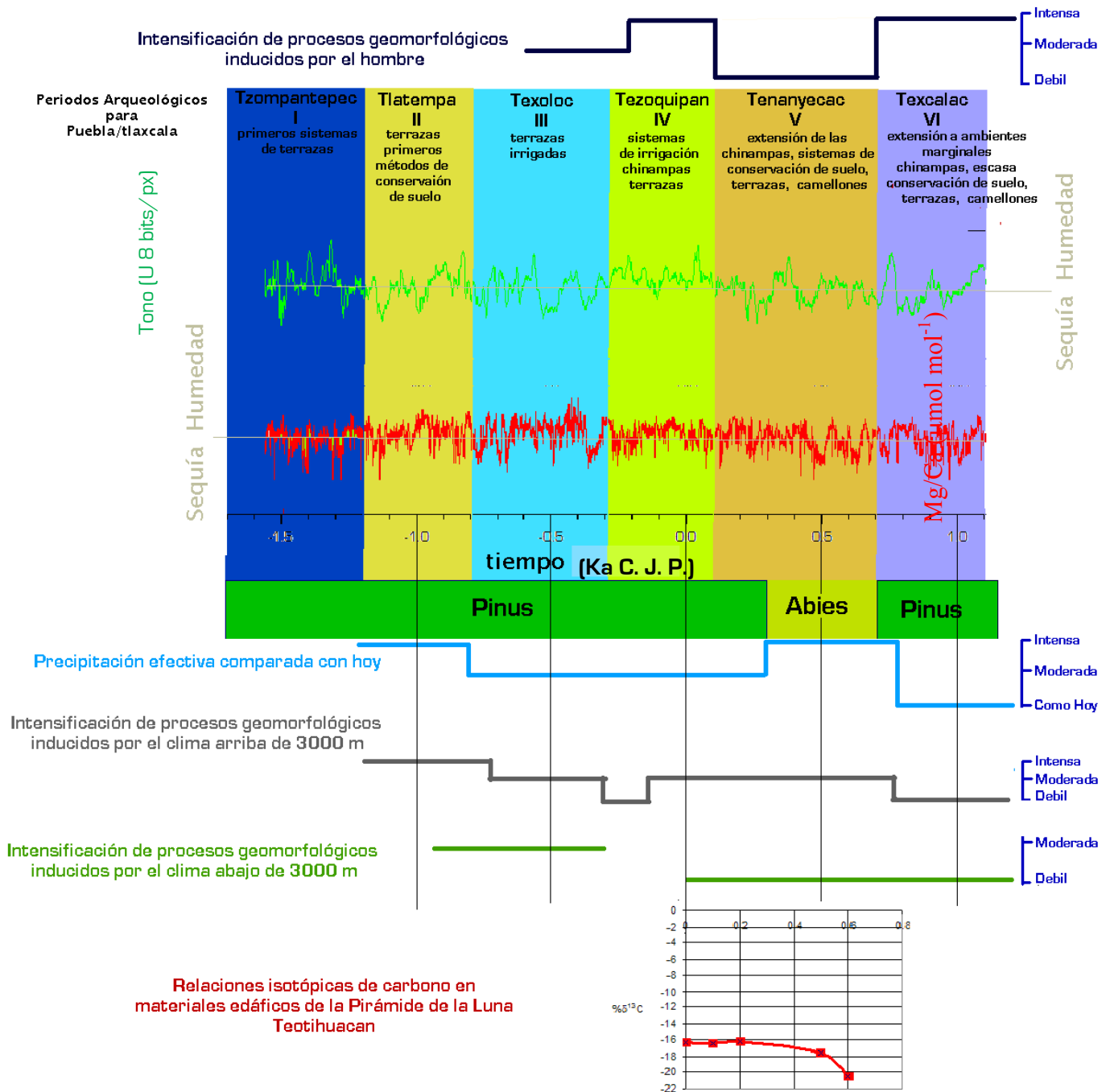


Figura 9.6. Estudios realizados por Heine (2003), donde muestra diferentes indicadores paleoclimáticos junto a la evolución de los sistemas de cultivo. Comparados aquí con JR1a y con la relación de isótopos estables de carbono para los diferentes suelos que sirvieron para construir el relleno de la pirámide de la luna (Lounejeva Baturina *et al.*, 2007).

Parece entonces que los sistemas de conservación del suelo aparecen después del primer siglo de nuestra era (Tenanyecac V), después de la señal que correspondería al abandono Maya, hacia el 150 A. D. (Webster *et al.*, 2007). De manera que podemos argumentar que después de experimentar un clima que había cambiado hacia una menor humedad según se ve en JR1a se pensó en la construcción de camellones y de sistemas de conservación del suelo, en una civilización que para entonces ya tenía un conocimiento relativamente avanzado sobre la agricultura.

Durante Tenanyecac V, la intensificación de los procesos morfológicos inducidos por el hombre fue débil (Heine, 2003), pero también es un periodo más seco que los que le precedieron y los que le seguirían. De manera que también las condiciones secas influenciaron en que fuera débil. En particular JR1a ve un periodo donde disminuye la humedad hacia el 0.5 Ka A. D. que correlaciona con el establecimiento de condiciones someras en 550 A. D. en Chignahuapan y la creación de chinampas entre el 550 - 900 A. D. (Caballero *et al.*, 2002) (Figura 9.7a).

Curiosamente aunque la extensión a ambientes marginales (Texcalac VI) corresponde a una tendencia inicial bien definida hacia la humedad, también es el momento en que hubo sequías severas aunque puntuales hacia el comienzo del posclásico, las que se piensa serían las responsables de la caída de la cultura Maya (Curtis *et al.*, 1996; Haug, 2003; Webster *et al.*, 2007), por lo que es posible relacionar en parte la extensión como producto de la baja productividad debida a estas sequias. Si bien es cierto que estas últimas no explican por sí solas esta extensión. De nuevo este periodo correlaciona con el lapso del 550 al 900 A. D., en Chignahuapa, donde tenemos condiciones de aguas muy someras (Figuar 9.7a). También los registros de el lago de Pátzcuaro, la laguna de Zacapu y el lago de Zirahuén registran una serie de episodios de sequía entre el 700 y el 1260 A. D. (Metcalfe y Davies, 2007).

Ahora bien, tenemos una interpretación del registro paleopalinológico para la laguna Atezca (basada particularmente en el declive de *Alnus* y el aumento de *Quercus*, *Pinus* y el grupo de bosque nuboso), que muestra que si bien hubo un abandono de la actividad humana para el final del periodo clásico, las condiciones de humedad fueron incluso mayores que para épocas precedentes (Conserva y Byrne, 2002). Cabe señalar que la laguna Atezca, Hidalgo, se encuentra sobre el lado este de la Sierra Madre Oriental, convirtiéndose en el archivo paleoclimático para los últimos 2 Ka más cercano a Jalpan. Cuenta con un clima templado con lluvias regulares, producto de la altitud y de los mismos flujos que afectan a Jalpan. Por lo que esperaríamos una mayor congruencia con JR1a en cuestiones de humedad. No tenemos una

explicación que pueda explicar por qué esta zona era húmeda mientras el resto de los archivos de Mesoamérica indican periodos de descenso de humedad.

Otro registro que cubre este periodo es el cambio del nivel del lago Verde en la selva de Los Tuxtles, el cual fue reconstruido a partir de datos de cuatro grupos ecológicos de diatomeas (Lozano-García *et al.*, 2007). Cabe destacar que el archivo del lago Verde tiene una resolución mucho menor que los archivos de JR1a. Hasta finales del siglo VIII de nuestra era el nivel lacustre de los Tuxtles se mantuvo relativamente bajo (Figura 9.7b).

Al comparar la evolución de los sistemas de cultivo con JR1a para Puebla-Tlaxcala, hemos visto una correlación con los cambios de humedad. La falta de correlación atribuida por Heine (2003) se debe principalmente a la falta de resolución en los registros que él escogió. Tenemos entonces que, si bien esta evolución desde luego implica otros factores, esto sirve de base, para justificar que los cambios climáticos que afectaron a la región Maya, también lo hicieron en el centro de México, como lo confirma también el registro de Chignahuapan. Por lo tanto, pensamos que las señales en 600 y 665 A. D, vistas en JR1a (Figura 9.5) corresponden a sequías que siguieron a largos periodo húmedos de 150 y 60 años respectivamente. Periodo de sequía que también es observado en Chichancanab en el 670 A. D. (Hodell *et al.*, 2005b), sin embargo algunos otros registros de Yucatán como el $\delta^{18}\text{O}$ de Punta Laguna tienen a este periodo como húmedo (Hodell *et al.*, 2007). De manera que estas sequía impactaron desde ese momento y no antes (como en la de 160 o 460), ya que la población era mucho mayor. Aunado a esto, está la alta erosión de los suelos en el lapso de humedad precedente, durante el siglo VI, en el que Teotihuacan llegó a su mayor población.

Serían entonces las diferencias en las estructuras sociales, económicas y poblacionales los que hicieron que una sequía impactará más en una zona que en otra. Sin embargo, el que las sequías fueron un factor clave en el colapso, es altamente probable.

Así por ejemplo la zona del Cerrito, en Querétaro, cercana a Jalpan, se establece como un importante centro ceremonial ante el declive de Teotihuacan, que parece no haber sufrido abandono durante el lapso de las sequías del final del clásico². Lo mismo pasó aparentemente con la incipiente Tula (Conserva y Byrne, 2002).

² <http://www.gobiernodigital.inah.gob.mx/ZonasArqueologicas/cerrito/cerrito.html> 11/I/2010 12:03

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

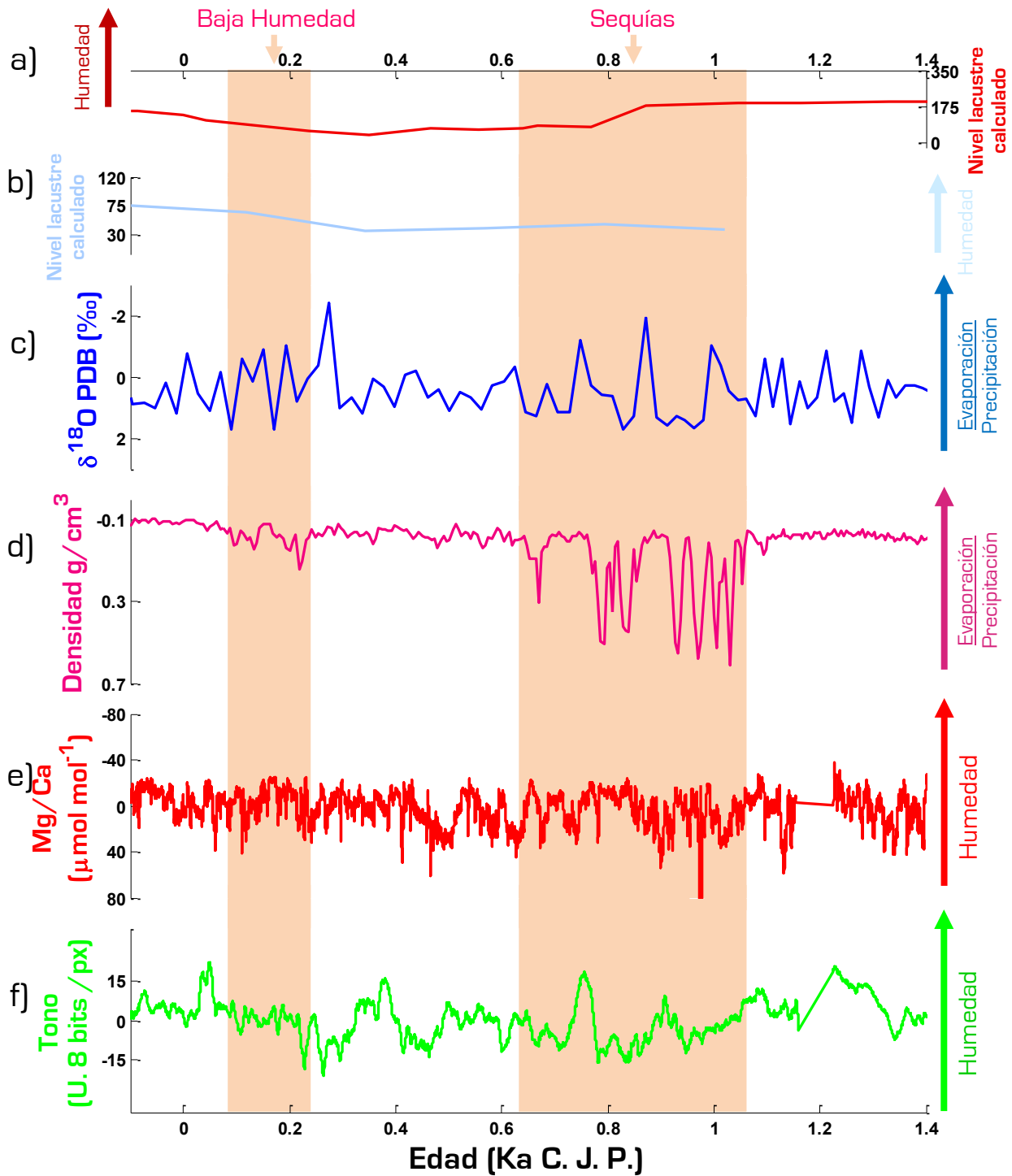


Figura 9.7. Comparación entre a) El nivel lacustre del lago verde (rojo oscuro) b) El nivel lacustre de Chignahuapan (azul claro), c) El porcentaje en peso de CaCO_3 de Chichancanab (negro), d) La densidad del sedimento en Chichancanab (violeta), e) La relación Mg/Ca de JR1a (rojo) (éstos dos últimos graficados con el eje “y” invertido) y f) La escala de grises de JR1a (verde) para el intervalo de tiempo comprendido por los -0.1Ka C. J. P. y los 1.4Ka C. J. P. Las zonas sombreadas (rosa) muestran periodos de baja humedad para Mesoamérica, siendo la segunda la que correlaciona con las sequías responsables de la caída Maya.

De esta comparación queda claro que las sequías, en particular las del final del Clásico no fueron un suceso local sino que afectaron a muchas zonas, desde la Zona Maya (Haug *et al.*, 2003; Hodell *et al.*, 2005b; Webster *et al.*, 2007), el centro de México (Caballero *et al.*, 2002; Heine, 2003; Lozano *et al.*, 2005; Metcalfe y Davies, 2007), Cariaco (Haug *et al.*, 2003), y posiblemente hasta el ocaso de la cultura Moche, en cuyo caso afectó también a Perú (deMenocal, 2001).

9.3 Apuntes para el Posclásico, Edad Moderna y Edad Contemporánea

Lamentable para el periodo posclásico JR1a contiene un hueco de información para todo el siglo XII, sin embargo se ve como hay en general una tendencia hacia condiciones más húmedas comparadas con el clásico, en lo que viene a ser el comienzo del Periodo Cálido Medieval. Esta tendencia también se ve en los registros de Chichancanab (Figura 9.7c y d), donde se ve que las condiciones de humedad relativa continuaran hasta mediados del siglo XV (Hodell *et al.*, 2007). Para JR1a, alrededor del 1200 A. D. será el punto de mayor humedad, patrón que no se repetirá sino hasta finales del siglo XX (Figura 9.9d y e). Contrariamente, para el comienzo del clásico el nivel lacustre de Chignahuapan desciende aun más en comparación con la época de sequía precedente (Figura 9.7a). Como caso particular, presentamos una serie de trece sequías compiladas de los anales Aztecas (Therrell *et al.*, 2004) que se pueden ver en el archivo de Mg/Ca de JR1a. Mostrándose así la alta resolución de este registro. Las fechas no coinciden completamente debido a la incertidumbre del fechamiento.

Tabla 1. Cronología de trece eventos compilados de los anales aztecas para los siglos XII, XIII y XIV (Therrell *et al.*, 2004).

Secuencia	Gregoriano	Azteca
1	1332	9 Pedernal
2	1333	10 Casa
3	1334	11 Conejo
4	1335	12 Caña
5	1452	12 Pedernal-Navaja
6	1453	13 Casa
7	1454	1 Conejo
8	1455	2 Caña
9	1464	11 Pedernal-Navaja
10	1502	10 Conejo
11	1505	13 Casa
12	1514	9 Conejo
13	1543	12 Casa

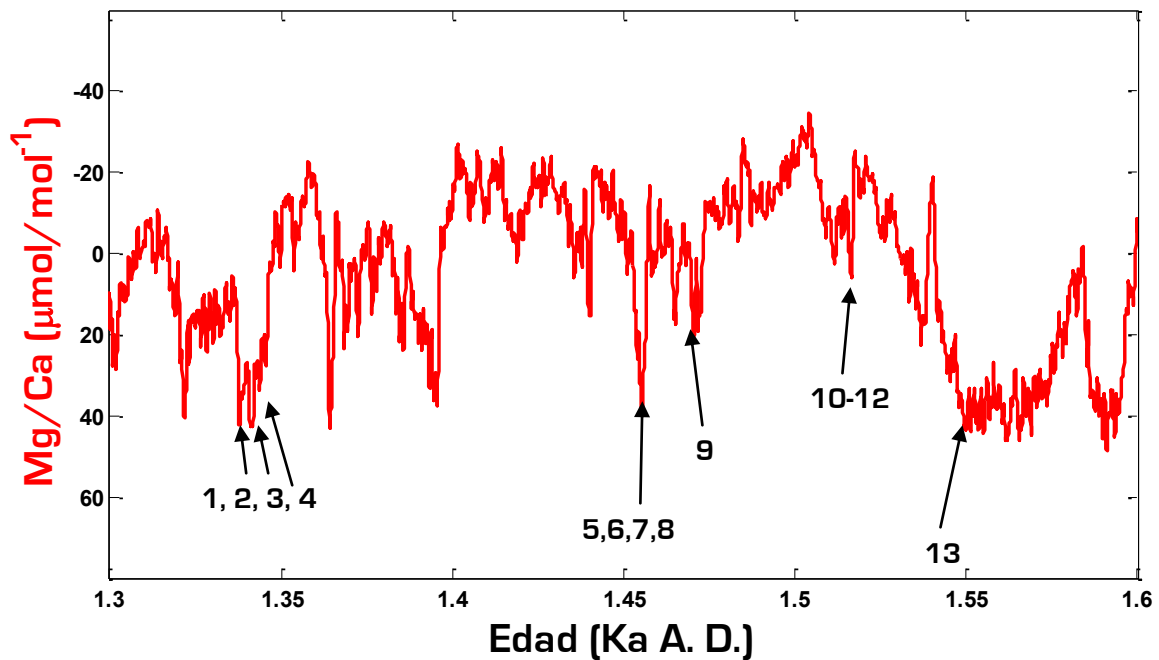


Figura 9.8. Señales mostradas en el registro de Mg/Ca de JR1a que corresponden con las sequías compiladas de los anales aztecas por Therrell *et al.* (2004). El número corresponde a la fila de la tabla 9.1, donde se presentan el año de la sequía en calendario azteca y gregoriano (A. D.).

La Figura 9.9 muestra claramente la Pequeña Edad de Hielo, la cual se puede ver tanto en la serie de la escala de grises, como en la serie de Mg/Ca, y es bastante clara en el archivo de Los Tuxtlas, es muy probable que en esta zona tropical, la Pequeña Edad de Hielo tuviera un efecto más tenue que en una zona subtropical como lo es Jalpan. En la escala de grises y en el nivel lacustre es clara la existencia de un periodo húmedo en la Pequeña Edad de Hielo en el primer cuarto del siglo XVII.

El archivo JR1a se comparó también con los datos dendrocronológicos de Peña Nevada provenientes del sur de Coahuila, Nuevo León y suroeste de Tamaulipas (Villanueva-Díaz *et al.*, 2007), el cual posee una resolución anual, aunque solo cubre los últimos 400 años. Debido a su alta sensibilidad a las variaciones climáticas, fue sólo comparado con la serie de Mg/Ca de JR1a por medio de un espectro cruzado, pues la escala de grises no presenta cambios con ese nivel de variación para el tramo de los últimos cuatro siglos. Así, el espectro cruzado entre estos dos archivos (Figura 9.10a), muestra varias periodicidades presentes en ambas series. La Figura 9.10b enseña la coherencia de estas señales, siendo la frecuencia de 90.01 ka⁻¹, la de más alta coherencia, que corresponde a una ciclicidad de 10 años. Dicha señal está probablemente asociada al ciclo de las manchas solares.

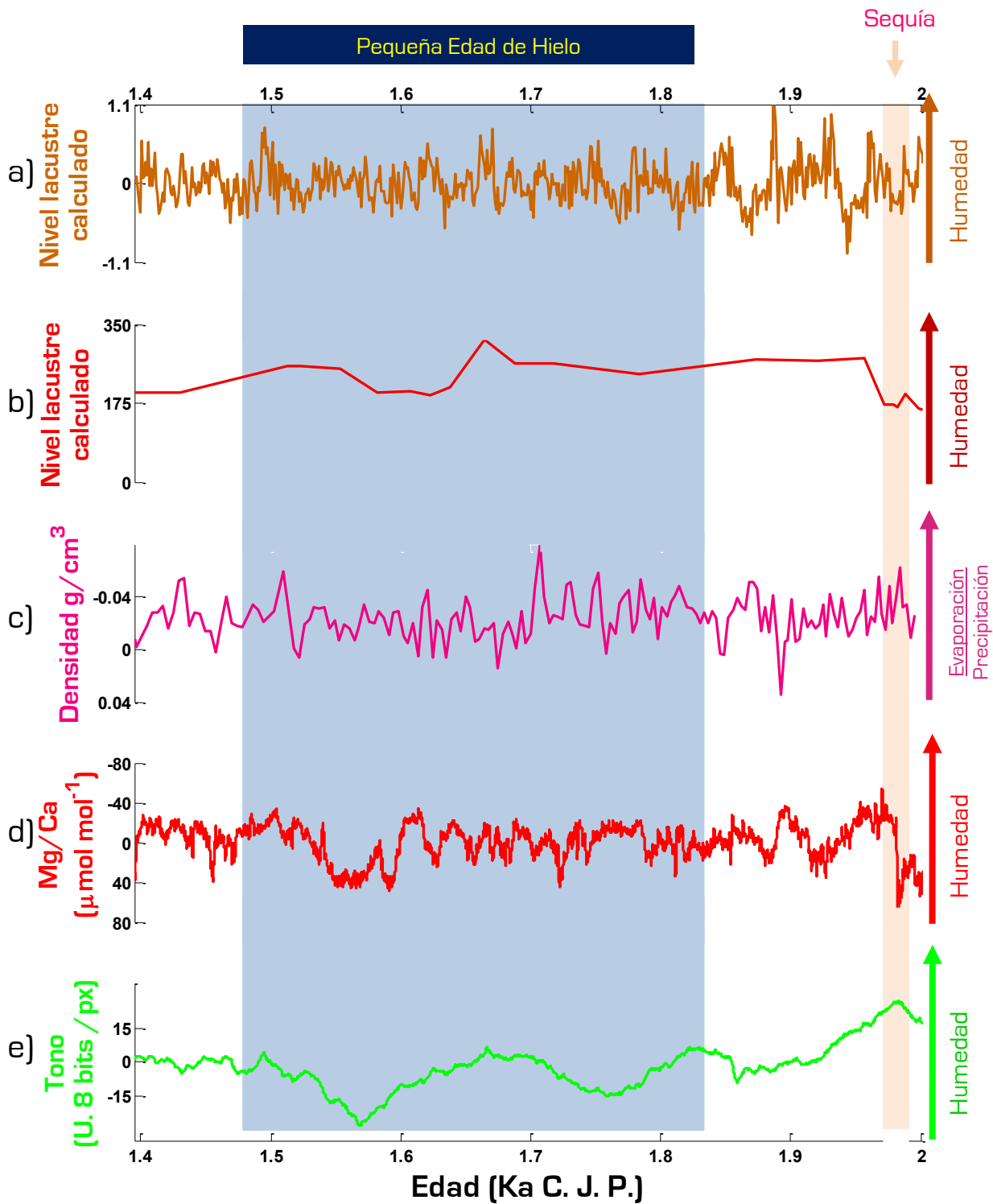


Figura 9.9. Comparación entre a) el archivo dendrocronológico de Peña Nevada en el Sur de Coahuila, Nuevo León y SW de Tamaulipas (pardo) b) el nivel lacustre del lago Verde (rojo oscuro), c) La densidad del sedimento en Chichancanab (violeta), d) La relación Mg/Ca de JR1a (rojo) (éstos dos últimos graficados con el eje “y” invertido) y e) La escala de grises de JR1a (verde) para el intervalo de tiempo comprendido por los 1.4 Ka A. D. y los 2.0 Ka A. D. La zona sombreada (azul claro) muestra la Pequeña Edad de Hielo, mientras que la zona en rosa muestra el periodo reciente de baja humedad para México.

Dendrocronología de Peña Verde vs JR1a

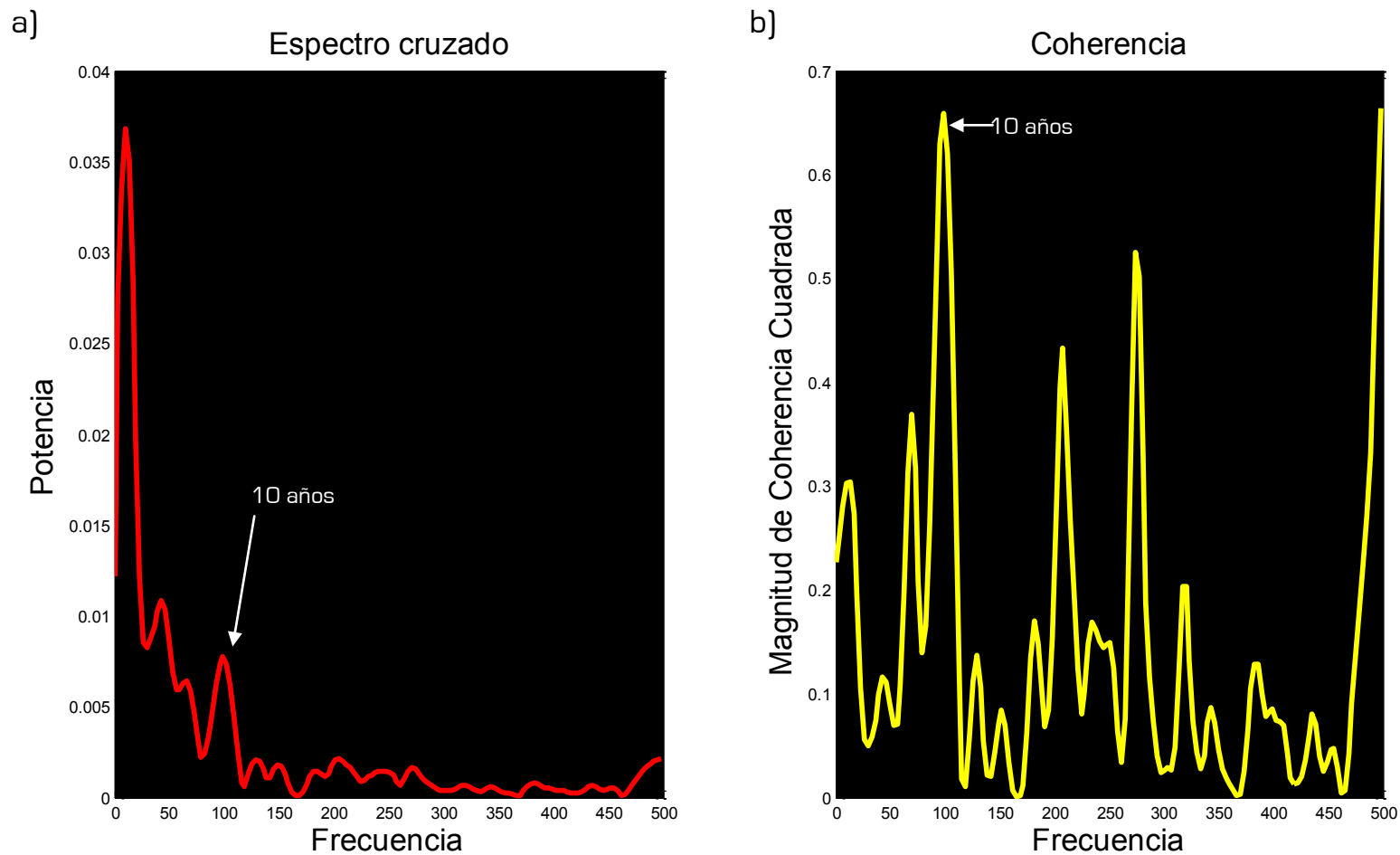


Figura 9.10. a) Espectro cruzado de la serie escala de grises de JR1a y el archivo dendrocronológico de Peña Nevada en el Sur de Coahuila, Nuevo León y SW de Tamaulipas. b) La Coherencia de estas series muestra el nivel de correlación (entre 0 y 1) de las series en cada una de las frecuencias, destacándose la señal correspondiente a la ciclicidad de 10 años.

De la comparación visual entre estos dos últimos archivos, se puede ver que pareciera existir un retraso en la aparición de la señal climática en la espeleotema con respecto al archivo dendrocronológico, lo cual más que ser explicado por el tiempo que guarda el agua subterránea la señal climática antes del depósito de ésta en la estalagmita (Betancourt *et al.*, 2002), se explica como un error instrumental que en último caso está muy por debajo de la incertidumbre del fechamiento de JR1a.

9.3.1 Los últimos años

Para el siglo XX, los registros de Lago Verde, el archivo dendrocronológico, y el registro de densidad de Chichancanab y los registros de JR1a muestran un aumento hacia condiciones más húmedas a partir de 1916. Que seguirá hasta 1986, año en que los registros de JR1a registran un descenso importante de humedad. Sin embargo, dicha caída es sólo decreciente en la escala de grises, mientras que en Mg/Ca, después de la caída, se ve una tendencia creciente, cuyos valores, sin embargo son menores a los presentados en los últimos 1000 años y que terminan por volver a caer a partir de 1994 (Figura 9.9).

Este comportamiento correlaciona con los otros archivos, así en lago Verde, seguirá aumentando el nivel lacustre para continuar con un descenso en la humedad a partir de 1957, que cambiara a ascenso en 1982, para volver a bajar a partir de 1988. Mientras que el archivo dendrocronológico marca una mayor variabilidad con máximos locales en 1931, 1960, 1987 y 1998, mientras que tiene su mínimo más intenso en todo su registro en 1943. Por lo tanto, de estos archivos locales queda claro que hay una tendencia local a la disminución de humedad en México a partir de 1986. Además, hay que recordar que en el GISP₂, (el único archivo que llega hasta el año 2000), no está registrada esta caída de humedad alrededor de 1986, lo que apoya el argumento que confiere a este fenómeno un carácter local.

9.3.2 Comparación con datos instrumentales

Para comprobar la existencia de esta disminución local en la humedad a partir de 1986 es menester comparar con el registro instrumental de la estación del Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN) en Jalpan, desde 1947. Para ello se promediaron los valores para cada mes registrado. Cabe señalar, que hay algunos meses donde no se tiene registro (realmente pocos), aunque tenemos una falta de información para la mayoría de la década de los 60's.

Ya que nuestro fin es saber si la tendencia en verdad cambió a partir de 1986, se promedió la precipitación mensual desde el primer registro hasta ese año. Para después normalizar cada valor del registro con ese promedio.

Así, observamos fácilmente que la cantidad de lluvias después de 1990 está por debajo del promedio que se llevaba hasta ese momento, lo que correlaciona con la tendencia a la baja de la serie de tiempo (Figura 9.10).

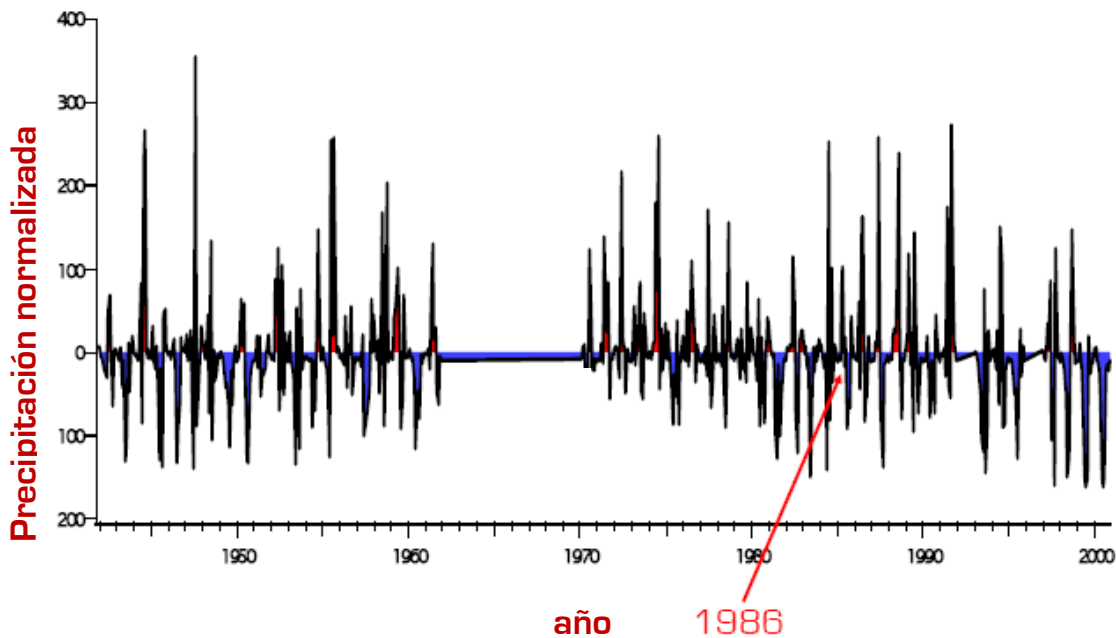


Figura 9.11. Precipitación normalizada al promedio de la precipitación mensual de los años 1947-1986, para el periodo comprendido de 1947 al 2000.

Otra manera de constatar esto es comparar la precipitación promedio mensual para los periodos de 1940-1980 y de 1980 a 2000 registrada. En ella se ve que ha habido una disminución a partir de 1980 para los meses de agosto, septiembre, octubre, lo cuales son los meses de mayor precipitación [durante el verano] (Figura 9.11)

Este cambio ha sido visto también para el oeste de la Unión Americana [Barnett et al., 2008], y ha sido explicado como un aumento de la temperatura de Abril a Julio, si bien se ha concluido que no correlaciona con el cambio climático global y es de carácter local [McCabe y Clark, 2005]. Al parecer los archivos instrumentales de Estados Unidos de América indican una sequía a partir de 1999, mientras que dicho cambio aparece instrumentalmente desde 1994 en México [Stahle *et al.*, 2009]. Esta sequía es más severa que la presentada en 1950 en México, sin descartar los errores en la manipulación de la información [Stahle *et al.*, 2009].

La existencia de esta sequía, así como su más temprana aparición en México y su mayor intensidad para esta misma zona, comparada con la del país vecino, es atribuida al cambio de uso de suelo ejercido (Stahle *et al.*, 2009).

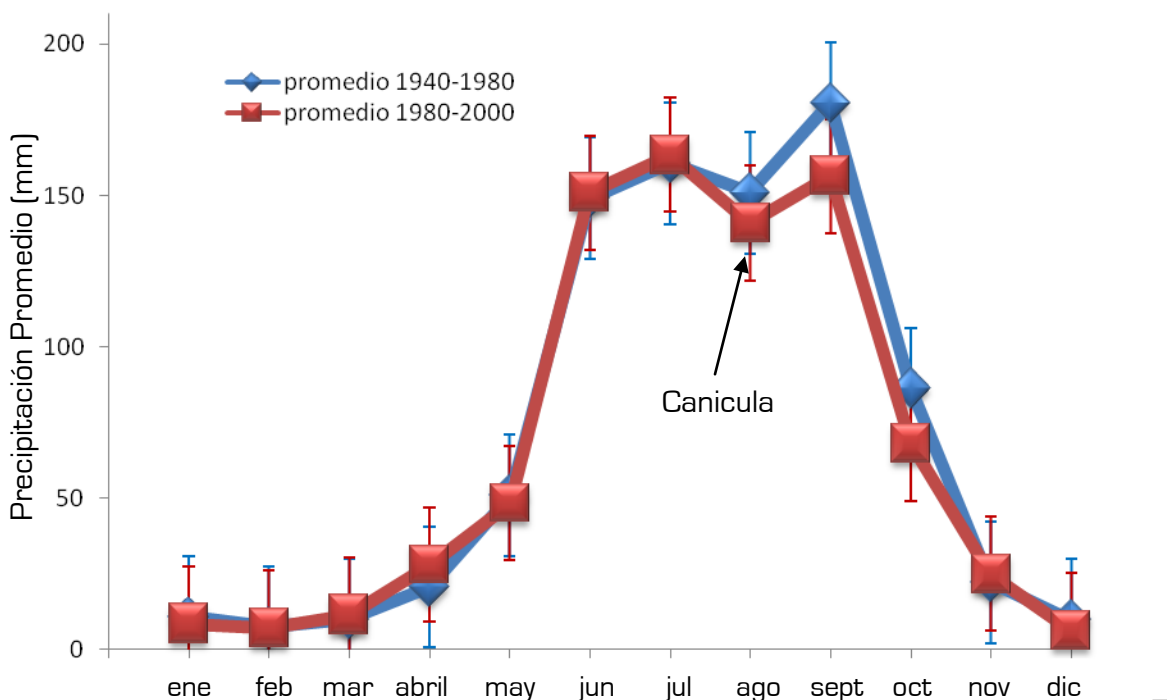


Figura 9.12. Precipitación promedio mensual para los periodos de 1940-1980 y de 1980 a 2000 registrada de la estación del SMN de México en Jalpan. (Datos, cortesía de la CONAGUA). Nótese como la lluvia ha cambiado desde 1980 para los meses de agosto, septiembre, octubre.

9.4 Espectro cruzado entre el registro de Chichancanab y las series de JR1a

Ahora que hemos visto todo los patrones climáticos a lo largo del Holoceno, es prudente ahora comparar también el archivo de densidad de los sedimentos en Chichancanab con los registros de JR1a por medio de un espectro cruzado para buscar periodicidades presentes en ambos.

La figura 9.13a muestra para el espectro cruzado entre la escala de grises y el archivo de densidad del sedimento en Chichancanab, tres periodicidades a los 179, 60 y 25 años, que corresponden a ciclos asociados con la interacción Viento Solar - Geo-magnetosfera, el PDO y el ciclo de Brucner, respectivamente. Dichas señales son las de coherencia superior a 0.4 (Figura 9.13b), y no coinciden con el ciclo de 213 años observado en el espectro de potencias de Chichancanab, pero si con una de sus componentes [señal armónica], a 26 años (Hodell *et al.*, 2005a). Este ciclo de 213 años encontrado en Chichancanab se repetiría entre el 600 y 1200 A. D. (Hodell *et al.*, 2005a).

Densidad del sedimento en Chichancanab vs JR1a

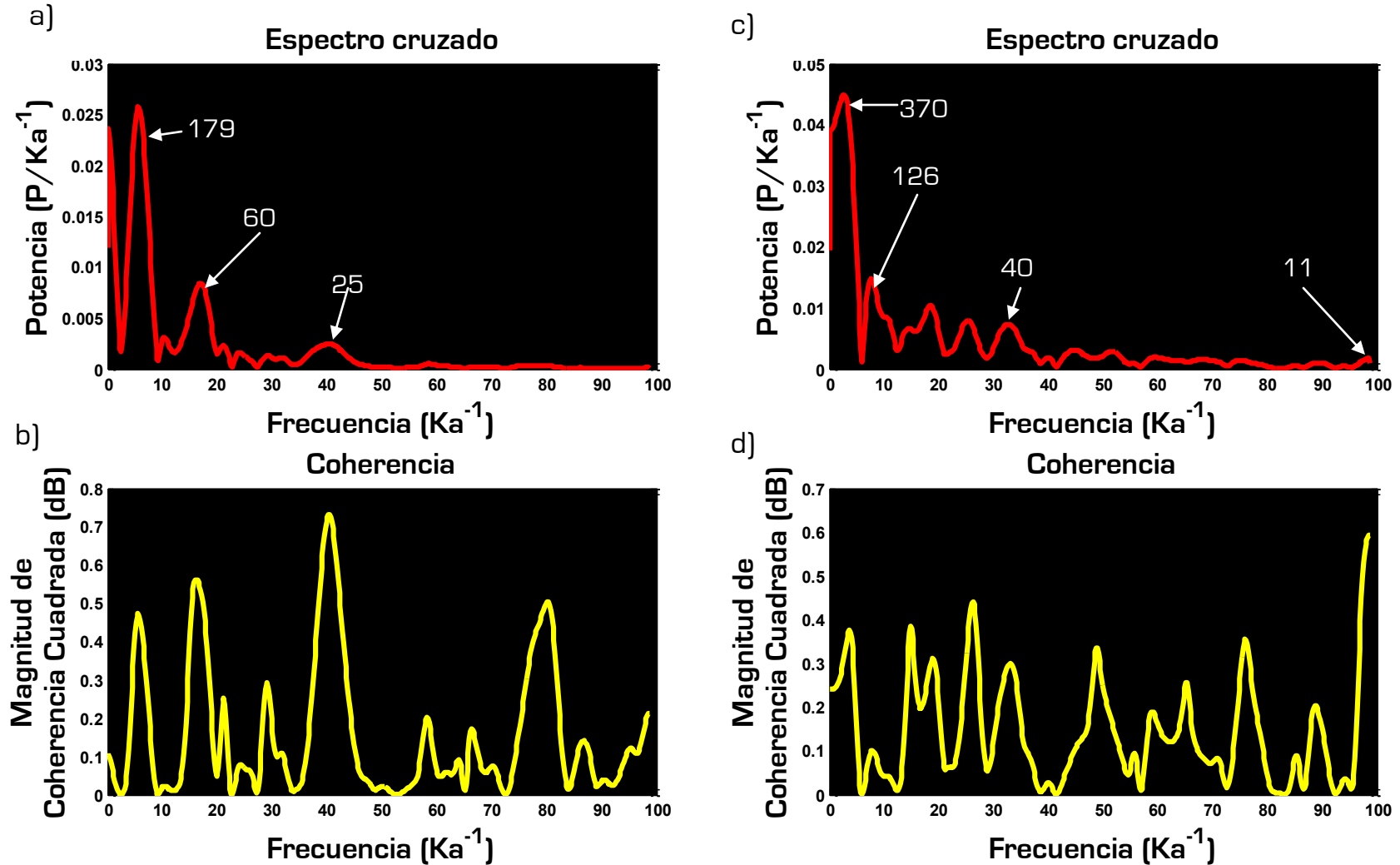


Figura 9.13. a) Espectro cruzado Blackman-Tukey de las series escala de grises JR1a y el archivo de densidad del sedimento en Chichancanab, b) La Coherencia entre los espectros de la escala de grises de JR1a y el archivo de densidad del sedimento en Chichancanab, c) Espectro cruzado Blackman-Tukey de las series de Mg/Ca de JR1a y el archivo de densidad del sedimento en Chichancanab, d) Coherencia entre los dos espectros anteriores.

Para el espectro cruzado entre Mg/Ca de JR1a y el archivo de densidad del sedimento en Chichancanab, las señales a su vez de mayor intensidad y coherencia superior a 0.4, son las de 370, 126, 52, 40 y 11 años (Figura 9.13c y d), siendo las primeras dos asociadas a la interacción campo geomagnético-viento solar, y las siguientes al PDO, Abbot y Schwabe, respectivamente. La señal de 52, sería vista en el espectro de potencias de Chichancanab a 50 años, considerándose armónicos de la señal de 213 años (Hodell *et al.*, 2005a). Lo mismo sucede con una señal a 39 años (Hodell *et al.*, 2001) que puede corresponder con la señal a 40 en el espectro cruzado. De manera que los espectros cruzados sólo pueden confirmar la naturaleza solar del forzamiento en el clima de Mesoamérica.

9.5 Posibles registros de erupciones volcánicas en JR1a

Finalmente, buscamos la fecha en la que ocurrieron erupciones volcánicas en Mesoamérica (Figura 9.14 y 9.15), pues alguna podría haber provocado una sequía a nivel local. Vemos que las fechas de las erupciones del Chichonal, Popocatepetl y Ceborruco (Macías, 2005) corresponden a las señales de sequía y colapso de 810, 860 y 910, respectivamente (recordemos la incertidumbre del fechamiento de las explosiones). El lapso de sequía (Figura 9.14 rosa) entra dentro de la incertidumbre del fechamiento del Popocatepetl, pudiendo ser causado por éste sin embargo este patrón coincidió con otros vistos en registros globales, incluyendo el ¹⁴C INTCALD4 por lo que es más probable un forzamiento solar de éste. (Figura 8.1, Capítulo VIII). La erupción del Tacaná coincide también con una señal de sequía. Hay que hacer notar, que el archivo de Mg/Ca parece ser más afectado por estas explosiones, según se ve en la magnitud de la señal. En la Figura 9.1 se muestra la localización de estos volcanes. Considerando que la explosión del Chichonal en los años 80's del siglo XX fue de magnitud 4 según la escala propuesta por Newhall (1982), y que ésta disminuyó la temperatura del planeta en décimas de grado, parece posible, que estas explosiones sean las responsables de las series de sequías a partir del año 810.

Resumiendo, JR1a apoya que el desarrollo y colapso de varias civilizaciones mesoamericanas estuvo influenciado por el clima, que es altamente probable que el colapso Maya fuera por factores climáticos, así mismo establece que además de la actividad solar, otro forzamiento probable del clima son las erupciones volcánicas.

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

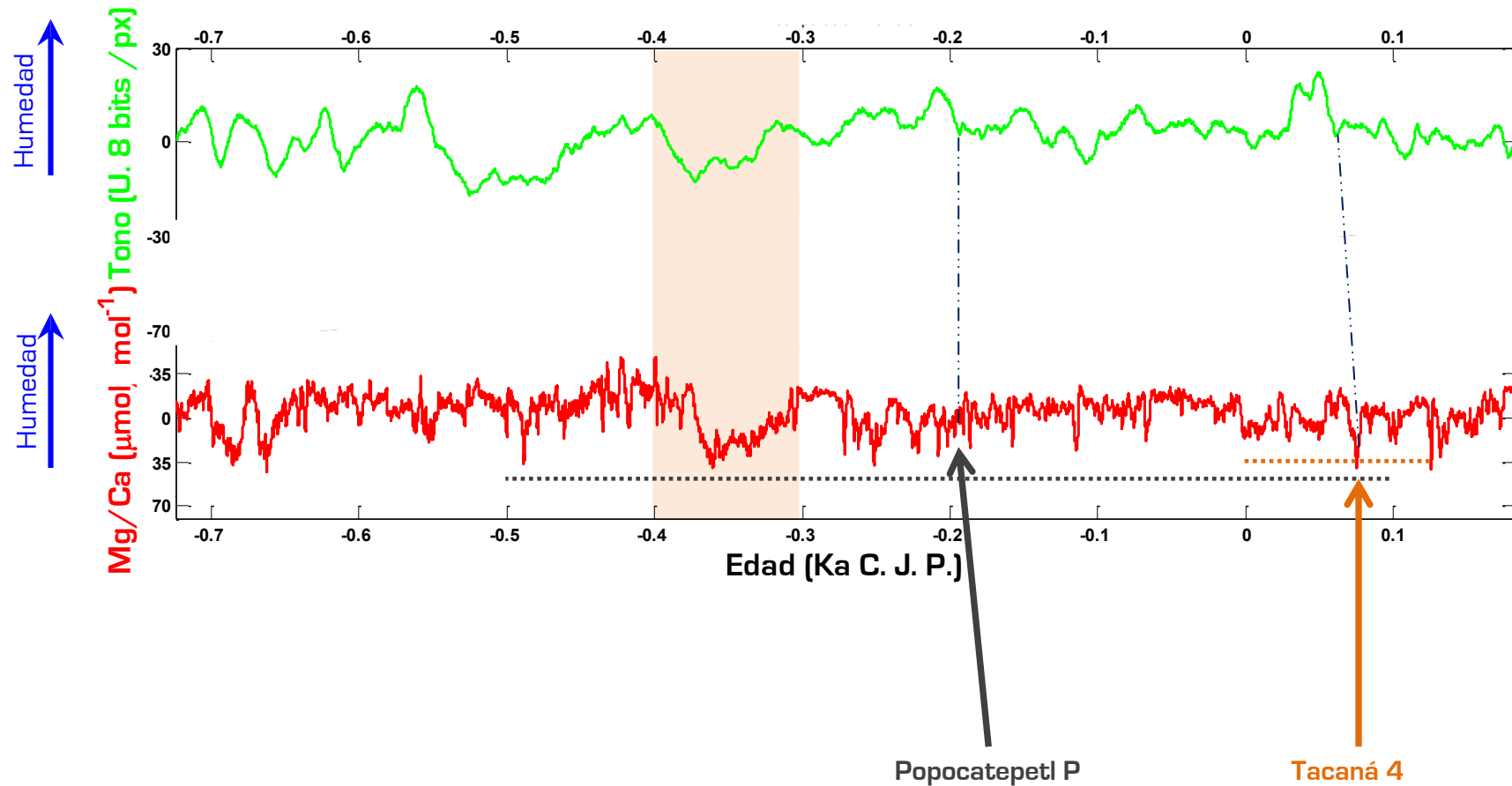


Figura 9.14. Erupciones volcánicas cerca o en Mesoamérica durante el Posclásico Tardío, el Clásico y el Posclásico Temprano. Los números indican la magnitud de la explosión en base a la escala propuesta por Newhall (1982), la P, indica una explosión Pliniana de una magnitud a gran escala aunque desconocida. Las líneas punteadas indican la incertidumbre del fechamiento. La zona en rosa de condiciones de sequía entra dentro de la incertidumbre del fechamiento del Popocatepetl, pudiendo ser causado por éste. Citado en www.volcano.si.edu/.

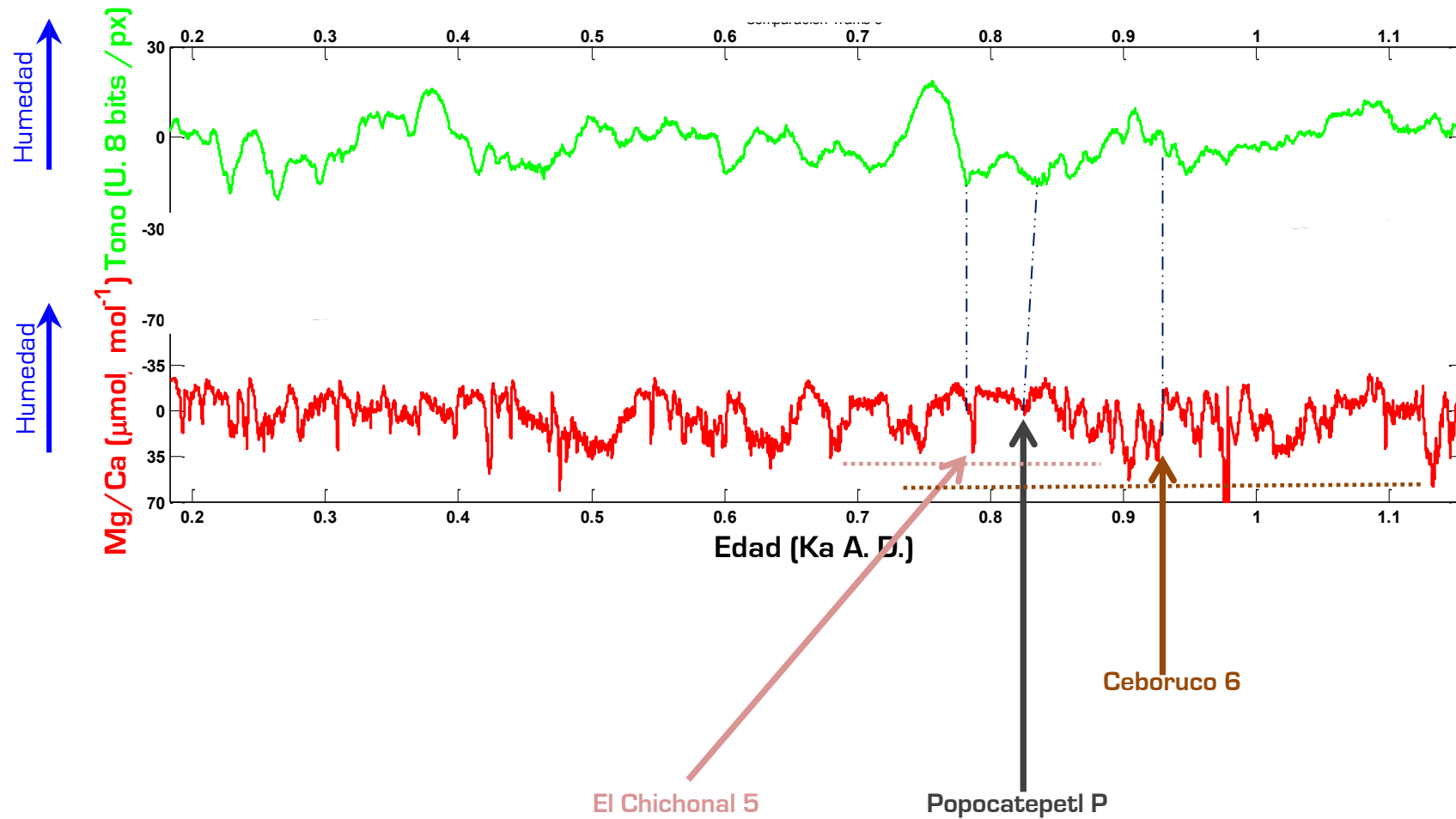


Figura 9.15. Erupciones volcánicas cerca de o en Mesoamérica durante el Posclásico Tardío, el Clásico y el Posclásico Temprano. Los números indican la magnitud de la explosión en base a la escala propuesta por Newhall (1982), la P, indica una explosión Pliniana de una magnitud a gran escala aunque desconocida. Las líneas punteadas indican la incertidumbre del fechamiento. La fecha de la erupción del Popocatepetl es histórica, 1 de Marzo, con una incertidumbre de 90 días. Citado en www.volcano.si.edu/.

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

Finalmente, esto resalta de nuevo la eficacia de la escala de grises como archivo paleoclimático. La cual, como todo archivo paleoclimático, debe ser leído e interpretado con cuidado, y de ser posible, usado en consonancia con otros archivos. De igual manera, vimos que parece ser menos susceptible a discernir señales climáticas acopladas con eventos volcánicos. Lo cual puede ser una desventaja en la reconstrucción local de paleoclimas, pero una ventaja en la correlación global del cambio climático.

Capítulo X

Conclusiones

"Inic ce tonatiuh on manca in itziuccan
4 atl inital mitoa atonatiuh inipan in
ye icuac in mochiuh in atoco ac in
anenextihuac in tlacamichtihuac."¹
La leyenda de los soles . Códice Chimalpopoca.

Nuestras conclusiones van más allá de refutar o afirmar las hipótesis planteadas en el primer capítulo, pues a lo largo de este trabajo descubrimos varios aspectos interesantes en el uso de la escala de grises de la estalagmita bandeada como indicador paleoclimático. De alguna manera en los cuatro capítulos anteriores ya habíamos puntualizado algunos aspectos referentes a cada tema estudiado. A continuación daremos nuestras conclusiones sobre estos aspectos.

10.1 Sobre la tonalidad del bandeo

Los tonos oscuros en la estalagmita, que confieren el bandeo y son vistos como mínimos en la escala de grises, son en su mayoría debidos a la presencia de materia orgánica y terrígenos, los cuales pueden estar incluidos en algunas fronteras de grano o como inclusiones sólidas en la estructura de la calcita.

De esta manera, la intensidad de la señal en la escala de grises, es una mezcla de la cantidad de materia orgánica y, en menor proporción, de terrígenos disponible. Lo anterior implica que una señal de sequía, identificada por un aumento en la señal Mg/Ca, puede llegar a pasar desapercibida en la serie de tiempo de escala de grises, porque, aunque la cantidad de agua es menor, también hay menor cantidad de materia orgánica disponible al disminuir la productividad de los suelos, de manera que combinados estos dos efectos, la señal podría no ser diferente a la de un régimen húmedo que tiene suficiente materia orgánica.

¹ El primer Sol [edad] que fue cimentado, su signo fue 4 Agua, se llamó Sol de Agua. En él sucedió que todo se lo llevó el agua. Las gentes se convirtieron en peces. Trad. Miguel León-Portilla.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

10.2 Sobre los factores que se necesitan controlar para obtener un indicador óptimo usando la escala de grises de una estalagmita

La resolución espaciotemporal del indicador se puede controlar con el grado de magnificación usada al obtener la imagen. Igualmente la sensibilidad de la escala de grises es dependiente de la resolución. Ambos impactan en la capacidad que pueden tener los algoritmos de conteo de bandas para detectar el bandeo anual. De esta manera, el desarrollo y evaluación de un método capaz de contar las bandas con base en la escala de grises requiere de una restricción que permita discernir cuál cambio de pendiente corresponde a una banda y cual no. En el presente trabajo se establecieron limitaciones geocronológicas con el fin de poder obtener una serie de tiempo con la misma "calidad" de información. Sin embargo, el cambio de resolución asociado con las variaciones en la tasa de crecimiento, afecta la cantidad y calidad de la información paleoclimática..

10.3 Sobre la viabilidad de la escala de grises de la estalagmita bandeada como archivo paleoclimático

El análisis espectrográfico en el visible en la escala de grises ha resultado ser un indicador paleoclimático de humedad capaz de dar información confiable a escala centenal y milenaria. La serie de tiempo generada a partir de la escala de grises es congruente con otros archivos instrumentales y paleoclimáticos, así como con la serie de tiempo generada a partir de las relaciones Mg/Ca (indicador de humedad) de la propia estalagmita. Los cambios regionales correlacionan con los cambios a nivel global a escala milenaria. Sin embargo, a escala anual y decenal, la escala de grises está afectada por una serie de variables puede generar falsos ambientes climáticos. De esta manera la comparación con otros indicadores de alta resolución, como Mg/Ca, resulta altamente útil para verificar la presencia o ausencia de cambios climáticos rápidos.

10.4 Sobre la naturaleza de los forzamientos climáticos

El análisis espectral muestra que las ciclicidades presentes en el clima para la segunda mitad del Holoceno en la región subtropical de Querétaro, es decir los ciclos de Bond, Suess, Gleissberg y la interacción Viento solar – magnetósfera son de carácter solar. Por lo que el forzamiento climático, en escala centenal está dado principalmente por el sol. Dichos ciclos son congruentes con lo reportado para la dinámica climática del Atlántico Norte. La baja intensidad de los ciclos de Bond, la aparición de la señal de 700 años, así como la poca variación en la temporalidad de las señales centenales y la gran variación en la temporalidad milenaria entre los diferentes

Conclusiones

indicadores de la estalagmita sugieren que la señal Bond es una frecuencia heterodina, tal como lo propone Clemens (2005).

La periodicidad del ENSO aparece sólo en el registro de Mg/Ca de JR1a, de manera intermitente a lo largo de todo el registro, siendo más marcada entre el -3000 y el -1600 C. J. P. Existe influencia de la periodicidad del PDO en regiones como Jalpan. Dicha periodicidad parece estar acoplada a la señal del ENSO. También existe un ciclo de 30 años asociado con el ciclo magneto-solar de Hale y con el PDO. Finalmente llama la atención la presencia de los ciclos de Abbot.

Algunas señales vistas en la serie de tiempo pueden ser el producto de erupciones volcánicas, por lo que otro factor de forzamiento climático pudo haber sido los eventos geológicos de esta naturaleza.

10.5 Sobre la evolución del clima regional a lo largo de la segunda mitad del Holoceno

El periodo comprendido entre el 4.5 y los 4.0 Ka a. C., refleja que el forzamiento principal en la humedad estuvo dado por una baja en la actividad solar y posiblemente por un aumento en la cantidad de rayos cósmicos recibidos por la Tierra.

La onduleta muestra que algunas ciclicidades, como la de 615 y 861 estuvieron presentes sólo en el cuarto y tercer milenio A. C.

La disminución en la humedad a lo largo de la segunda mitad del holoceno para la región de Jalpan está avalado por un descenso en la tendencia positiva de la serie de Mg/Ca y la tasa de crecimiento de JR1a.

Los eventos de Cambios Climáticos Rápidos son observados en JR1a, entre los que destacan el Período Cálido Medieval y la Pequeña Edad de Hielo, manifestados por un aumento y descenso de la humedad, respectivamente.

Existe una correlación en los patrones climáticos al final del Clásico entre JR1a y diversos registros paleoclimáticos de Mesoamérica que muestran una serie de eventos puntuales de disminución de la humedad, que serían los causantes del ocaso de la civilización Maya en esa época. De igual manera es altamente probable una relación entre las variaciones de humedad y los patrones culturales de diversas civilizaciones mesoamericanas durante el Formativo Tardío y el Clásico.

Análisis espectral de una estalagmita bandeada como indicador paleoclimático

Desde principios del siglo XX el forzamiento solar ha dejado de ser el principal forzamiento en el clima de la región. Sin embargo periodos cortos donde el forzamiento solar no ha sido el principal se han presentado a lo largo de la segunda mitad del Holoceno.

El registro de la estalagmita JR1a de Jalpan muestra que, a nivel local, para México, existe una tendencia climática a partir de 1986 hacia un régimen de menor humedad.

What about sunrise? What about rain? What about all the things that you said we were to gain? What about killing fields? Is there a time? What about all the things that you said were yours and mine? Did you ever stop to notice all the blood we've shed before? Did you ever stop to notice this crying Earth its weeping shores? What have we done to the world? Look what we've done. What about all the peace that you pledge your only son? What about flowering fields? Is there a time? What about all the dreams that you said was yours and mine? Did you ever stop to notice all the children dead from war? Did you ever stop to notice this crying Earth its weeping shores? I used to dream. I used to glance beyond the stars. Now I don't know where we are, although I know we've drifted. Hey, what about yesterday? (What about us?) What about the seas? (What about us?) The heavens are falling down. (What about us?) I can't even breathe. (What about us?) What about everything? (What about us?) I given you. (What about us?) What about nature's worth? It's our planet's womb. (What about us?) What about animals? (What about it?) We've turned kingdoms to dust. (What about us?) What about elephants (What about us?) Have we lost their trust. (What about us?) What about crying whales? (What about us?) We're ravaging the seas. (What about us?) What about forest trails, burnt despite our pleas? (What about us?) What about the holy land? (What about it?) Torn apart by creed. (What about us?) What about the common man? (What about us?) Can't we set him free? (What about us?) What about children dying? (What about us?) Can't you hear them cry? (What about us?) Where did we go wrong? Someone tell me why? (What about us?) What about baby boy? (What about it?) What about the days? (What about us?) What about all their joy? (What about us?) What about the man? (What about us?) What about the crying man? (What about us?) What about Abraham? (What about us?) What about death, again do we give a damn.

Earth Song, Michael Jackson

¿Qué hay del amanecer? ¿Qué hay de la lluvia? ¿Qué hay de todas las cosas que dijiste, que ganaríamos? ¿Qué hay de los campos de concentración? ¿Tienes un momento? ¿Qué hay de todas las cosas que dijiste que eran tuyas y mías? ¿Alguna vez te has parado a observar toda la sangre que hemos derramado anteriormente? ¿Alguna vez te has parado a observar la melancólica Tierra con sus costas llorosas? ¿Qué le hemos hecho al mundo? Mira lo que hemos hecho. ¿Qué hay de toda la paz que le prometiste a tu único hijo? ¿Qué hay de los campos florecientes? ¿Tienes un momento? ¿Qué hay de todos los sueños que dijiste que serían tuyos y míos? ¿Alguna vez te has parado a observar todos los niños que mueren por la guerra? ¿Alguna vez te has parado a observar la Tierra y las costas llorosas? Solía soñar. Solía mirar más allá de las estrellas. Ahora no sé donde estamos. Aunque sé que hemos ido lejos a la deriva. Hey, ¿Qué hay del ayer? (¿Qué hay de nosotros?) ¿Qué hay de los mares? (¿Qué hay de nosotros?) Los cielos están cayendo. (¿Qué hay de nosotros?) Ni siquiera puedo respirar. (¿Qué hay de nosotros?) ¿Qué hay de la Tierra sangrante? (¿Qué hay de nosotros?) ¿No podemos sentir sus heridas? (¿Qué hay de nosotros?) ¿Qué hay del valor de la naturaleza? Es el seno de nuestro planeta (¿Qué hay de nosotros?) ¿Qué hay de los animales? (¿Qué hay de eso?) Hem, convertido reinos en polvo. (¿Qué hay de nosotros?) ¿Qué hay de los elefantes? (¿Qué hay de nosotros?) ¿Hemos perdido su confianza? (¿Qué hay de nosotros?) ¿Qué hay de las ballenas que lloran? (¿Qué hay de nosotros?) Estamos destrozando los mares. (¿Qué hay de nosotros?) ¿Qué hay de los senderos del bosque, quemados a pesar de nuestras súplicas? (¿Qué hay de nosotros?) ¿Qué hay de la tierra santa? (¿Qué hay de eso?) Apartada por creencias. (¿Qué hay de nosotros?) ¿Qué hay del hombre común? (¿Qué hay de nosotros?) ¿Podemos liberarlo? (¿Qué hay de nosotros?) ¿Qué hay de los niños que mueren? (¿Qué hay de nosotros?) ¿Puedes oírlos llorar? (¿Qué hay de nosotros?) ¿Dónde nos equivocamos? Que alguien me diga ¿por qué? (¿Qué hay de nosotros?) ¿Qué hay de los bebés? (¿Qué hay de eso?) ¿Qué hay acerca de los días? (¿Qué hay de nosotros?) ¿Qué hay de toda su alegría? (¿Qué hay de nosotros?) ¿Qué hay del hombre? (¿Qué hay de nosotros?) ¿Qué hay del hombre que llora? (¿Qué hay de nosotros?) ¿Qué hay de Abraham? (¿Qué hay de nosotros?) ¿Qué hay de la muerte, otra vez nos trae sin cuidado?

Canción de la Tierra, Michael Jackson

Bibliografía

- Aliaga Campuzano, M.P., 2009. Distribución de elementos de tierras raras entre aguas de percolación y calcita secundaria en terrenos karsticos, UNAM, México D. F.
- Aliaga-Campuzano, M.P., Bernal, J.P. y Lounejeva Baturina, E., 2009. Distribution of Rare Earth Elements between cave-drip water and speleothem calcite, *Goldschmidt 2009*. Cambridge Publications, Davos, Schweiz.
- Almasi, P.F. y Bond, G., 2009. Sun-Climate Connections. En: V. Gornitz (Editor), *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 929-935.
- Anselmetti, F.S., Hodell, D. A., Ariztegui, D., Brenner, M., Rosenmeier, M., 2007. Quantification of soil erosion rates related to ancient Maya deforestation. *Geology*, 35(10): 915-918.
- Asmerom, Y. y Polyak, V.J., 2004. Comment on Betancourt et al. (2002) "A Test of "Annual Resolution" in Stalagmites Using Tree Rings ". *Quaternary Research*, 61: 119-121.
- Baker, A., Proctor, C.J. y Barnes, W.L., 1999. Variations in stalagmite luminescence laminae structure at Poole's Cavern, England , AD 1910-1996: calibration of a palaeoprecipitation proxy. *The Holocene*, 9(6): 683.
- Bard, E., Raisbeck, G.M., Yioub, F. y Jouzel, J., 1997. Solar modulation of cosmogenic nuclide production over the last millennium: comparison between ^{14}C and ^{10}Be records. *Earth and Planetary Science Letters*, 150(3-4): 453-462.
- Barnett, T.P., Pierce, D.W., Hidalgo, H.G., Bonfils, C., Santer, B.D., Das, T., Bala, G., Wood, A.W., Nozawa, T., Mirin, A.A., Cayan, D.R. y Dettinger, M.D., 2008. Human-Induced Changes in the Hydrology of the Western United States. *Science*, 319.(5866): 1080-1083.
- Baruch, J.O., 2008. Polémique sur les Rayons Cosmiques. *La Recherche* .(425): 42-43.
- Beach, T., Dunning, N., Luzzadder-Beach, S., 2003. Ancient Maya Impacts on Soils and Soil Erosion. En: I.C.o.L.D.a. Desertification (Editor), *Soil Erosion and Geomorphic Features of Land Degradation*, Mexico city, pp. 1-2.
- Bernal, J.P., McCulloch, M.T. y Lachniet, M.S., 2006. An early Holocene stalagmite record of dust and humidity from southwestern Mexico. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): A48.
- Betancourt, J.L., Grissino-Mayer, H.D., Salzer, M.W. y Swetnam, T.W., 2002. A Test of "Annual Resolution" in Stalagmites Using Tree Rings. *Quaternary Research*, 58: 197-199.
- Black, D.E., Hameed, S. y Peterson, L.C., 2009. Long-term tidal cycle influences on a Late-Holocene clay mineralogy record from the Cariaco Basin. *Earth and Planetary Science Letters*, 279: 139-146.
- Blackman, R.B. y Tukey, J., W., 1958. The measurement of power spectra from the point of view of communication engineering. Dover Publications, 190 pp pp.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

- Boch, R. y Spötl, C., 2008. The origin of lamination in stalagmites from Katerloch Cave, Austria: Towards a seasonality proxy. *PAGES news*, 16(3): 21-22.
- Bond, G., 2009. Millennial Climate Variability. En: V. Gornitz (Editor), *Encyclopedia of Paleoclimatology and ancient environments*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 568-573.
- Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M.N., Showers, W., Hoffman, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I. y Bonani, G., 2001. Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate During the Holocene. *Science*, 294: 2130-2136.
- Bond, G., Showers, W., Maziet, C., Lotti, R., Almasi, P., deMonacal, P., Priore, P., Cullen, H., Hajdas, I. y Bonani, G., 1997. A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates. *Science*, 278: 1257-1266.
- Braun, H., Christl, M., Rahmstorf, S., Ganopolski, A., Mangini, A., Kubatzki, C., Roth, K. y Kromer, B., 2005. Possible solar origin of the 1,470-year glacial climate cycle demonstrated in a coupled model. *Nature*, 438: 208-211.
- Bryksina, N., Last, W., 2005. Fractal Analysis of the Gray-Scale Intensity Data of Finely Laminated Sediments from Bainbridge Crater Lake, Galápagos. *Mathematical Geology*, 37(4): 327-336.
- Caballero, M., Ortega G.B., Valadez F., Macias J.L y Sugiura Y., 2002. Sta. Cruz Atizapan: a 22ka lake level record and climatic implications for the Late Holocene human occupation in the Upper Lerma Basin, Central Mexico,. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 186: 217-235.
- Carrillo, M. y Suter, M., 1982. Tectónica de los alrededores de Zimapan, Hidalgo y Querétaro. *Soc. Geol. Mexicana, México D. F.*, 1-20 pp.
- Carrillo, M.M., . 1990. Geometría estructural de la Sierra Madre Oriental entre Peñamiller y Jalpan, estado de Querétaro. *UNAM. Inst. de Geología. Revista.*, 9(1): 62-70.
- CETENAL, 1986. Precipitación y probabilidad de la lluvia en la República Mexicana y su evaluación. Querétaro e Hidalgo. Serie climas. Instituto de Geografía. UNAM., México D. F.
- Chakraborty, A. y Krishnamurti, T.N., 2003. Numerical simulation of the North American monsoon system. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 84: 57-82.
- Chamley, H., 2000. *Bases de sédimentologie*. Dunod, Paris, 178 pp.
- Clemens, S.C., 2005. Millennial-band climate spectrum resolved and linked to centennial-scale solar cycles. *Quaternary Science Reviews*, 24: 521-531.
- Climate Research Committee, N.R.C., 1995. *Natural Climate Variability on Decade-to-Century Time Scales*. National Academic Press, U. S. A.
- Cole, J.E., Rind, D., Webb, R.S., Jouzel, J. y Healy, R., 1999. Climatic controls on interannual variability of precipitation delta O-18: Simulated influence of temperature, precipitation amount, and vapor source region. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 104(D12): 14223-14235.

- Conserva, M.E. y Byrne, R., 2002. Late Holocene vegetation change in the Sierra Madre Oriental in Central Mexico. *Quaternary Research*, 58: 122-129.
- Cosford, J., Qing, H., Eglington, B., Matthey, D., Yuan, D., Zhang, M. y Cheng, H., 2008. East Asian monsoon variability since the Mid-Holocene recorded in a high-resolution, absolute-dated aragonite speleothem from eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 275: 296-307.
- Cruz, F.W., Burns, S.J., Jercinovic, M., Karmann, I., Sharp, W.D. y Vuille, M., 2007. Evidence of rainfall variations in Southern Brazil from trace element ratios Mg/Ca and Sr/Ca in a Late Pleistocene stalagmite. *Geochemical et Cosmochemical Acta*, 71(9): 2250-2263.
- Curien, H., 2001. *Dictionnaire des Roches et minéraux pétrologie et minéralogie.*, France, 1060 pp.
- Curtis, J.H., Hodell, D.A. y Brenner, M., 1996. Climate Variability on the Yucatan Peninsula (Mexico) during the Past 3500 Years, and Implications for Maya Cultural Evolution. *Quaternary Research*, 46: 37-47.
- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B. y Gundestrup, N., 1973. Stable Isotope Glaciology. *Meddelelser om Grønland*, 197(2): 1-153.
- De Villiers, J.P.R., 1971. Crystal structures of aragonite, strontianite, and witherite. *American Mineralogist*, 56: 758-767.
- Debret, M., Sebag, D., Crosta, X., Massei, N., Petit, J.-R., Chapron, E. y Bout-Roumazielles, V., 2009. Evidence from wavelet analysis for a mid-Holocene transition in global climate forcing. *Quaternary Science Reviews*, in press: 1-14.
- Deconinck, J.F., 2006. *Paléoclimats L'enregistrement des variations climatiques.* Société Géologique de France. Vuibert, France, 198 pp.
- del Castillo, A.E., Castaño-Meneses, G., Dávila-Montes, M.J., Miranda-Anaya, M., Morales-Malacara, J.B. y Paredes-León, R., 2009. Seasonal distribution and circadian activity in the troglophile long-footed robber frog, *Eleutherodactylus longipes* (Anura: Brachycephalidae) at Los Riscos Cave, Querétaro, Mexico: Field and laboratory studies. *Journal of Cave and Karst Studies*, 71(1).
- Delmonte, B., 2003. Quaternary variations and origin of continental dust in East Antarctica. *Dottorato Thesis, Università degli Studi di Siena, Siena, Italy*, 287 pp.
- deMenocal, P.B., 2001. Cultural Responses to Climate Change During the Late Holocene. *Sciencemag*, 292: 667-673.
- Dorale, J.A., Cheng, H., Edwards, R.L. y Richards, D.A., 1999. Uranium-series dating of speleothems; current techniques, limits and applications, Geological Society of America, 1999 annual meeting. Geological Society of America (GSA), Boulder CO, United States of America, pp. 89.
- Douglas, M.W., Maddox, R.A., Howard, K. y Reyes, S., 1996. The Mexican Monsoon. *Journal of Climate*, 6(8): 1665-1677.
- Embry, A.F.y.K., J. E., 1971. A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, Northwest Territories. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 19: 730-781.

- Endsley, E.A., Gallup, C.D., Hodell, D.A., Curtis, J.H., Brenner, M., Gentry, C.L., Edwards, R.L. y Cheng, H., 2007. Late Holocene Droughts Recorded in Speleothems From the Maya Lowlands of the Yucatan Peninsula, Mexico, Spring Meeting 2007. American Geophysical Union, Acapulco. Mexico.
- Fagundo Castillo, J.R., 2002. En el Techo del Planeta. La Ciencia para Todos., 191. Fondo de Cultura Económica, México, D.F., 167 pp.
- Fairchild, I.J., Frisia, S., Borsato, A. and Tooth, A.F., 2007. Speleothems. En: D.J.a.M. Nash, S.J (Editor), Geochemical Sediments and Landscapes. Blackwells, Singapore.
- Fairchild, I.J., Smith, C.L., Baker, A., Fuller, L., Spötl, C., Matthey, D., McDermott, F. y F., E.I.M., 2006. Modification and preservation of environmental signals in speleothems. *Earth-Science Reviews*, 75: 105-153.
- Fairchild, I.J. y Treble, P., 2009. Trace elements in speleothems as recorders of environmental change. *Quaternary Science Reviews*, 28: 449-468.
- Fairchild, J.e.a., 2000. Controls on trace element [Sr-Mg] compositions of carbonate cave waters: implications for speleothem climatic records. *Chemical Geology*, 166(Elsevier Science B.V.): 255-269.
- Fernández, F.G., Johnson, K. D. Terry, R. E., Nelson, S., Webster, D., 2005. Soil Resources of the Ancient Maya at Piedras Negras, Guatemala. *Soil Science Society of America Journal*, 69: 2020-2032.
- Fitch, E.K., 2006. Rapid Climate Change and the Collapse of the Maya Civilization.
- Fleitmann, D., Burns, S.J., Mudelsee, M., Neff, U., Kramers, J., Mangini, A. y Matter, A., 2003. Holocene Forcing of the Indian Monsoon Recorded in a Stalagmite from Southern Oman. *Science*, 300: 1737-1739.
- Flügel, E., 2004. *Microfacies of Carbonate Rocks Analysis, Interpretation and Application*. Springer, Germany, 976 pp.
- Frisia, S., Borsato, A., Fairchild, I.J., McDermott, F. y Selmo, E.M., 2002. Aragonite-Calcite Relationships in Speleothems (Grotte De Clamouse, France): Environment, Fabrics, and Carbonate Geochemistry. *Sedimentary Research*, 72(5): 687-699.
- García de Miranda, E. y Falcon de Gyves, Z., 1993. Nuevo atlas porrua de la república mexicana. Porrua S. A., México d. F.
- Garduño, R., 2003. El veleidoso clima. La Ciencia para Todos., 127. Fondo de Cultura Económica, México, D. F., 169 pp.
- Gershunov, A., Barnett, T.P. y Cayan, D.R., 1999. North Pacific interdecadal oscillation seen as a factor in ENSO-related North American climate anomalies. *Eos*, 80: 25-30.
- Gillieson, D. y Spate, A.P., 1996. *Caves: Processes and Deposition Mechanisms*. Blackwell Publishers Ltd., Oxford, U. K., 324 pp.

- Guilyardi, E., 2008. El Niño reste imprévisible. *La recherche*, 31(Trimestrel): 42.
- Harmon, R.S., Thompson, P., Schwarcz, H.P. y Ford, D.C., 1978. Late Pleistocene paleoclimates of North America as inferred from stable isotope studies of speleothems. *Quaternary Research*, 9: 54-70.
- Haug, G.H., Günther, D., Peterson, L.C., Sigman, D.M., Hughen, K. y Aeschlimann, B., 2003. Climate and Collapse of Mayan Civilization. *Science*, 299: 1731-1735.
- Haug, G.H., Günther, G., Peterson, L. C., Sigman, D. M., Hughen, K. A., Aeschlimann, B., 2003. Does Climate make History? *Climate and the Decay of the Maya Culture*. GeoForschungsZentrum.
- Heine, K., 1978. Ökologische Katastrophe in Mexiko? *UMSCHAU in Wissenschaft und Technik*, 78. Jahrgang(16): 491-496.
- Heine, K., 2003. Paleopedological evidence of human-induced environmental change in the Puebla - Tlaxcala area (Mexico) during the last 3,500 years. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20(3): 235-244.
- Hellstrom, J.C., McCulloch, M. T., 2000. Multi-proxy constrains on the climatic significance of trace element records from a New Zealand speleothem. *Earth and Planetary Science Letters*, 179: 287-297.
- Hendy, C.H. y Wilson, A.T., 1968. Paleoclimate data from speleothems. *Nature*, 219: 48-51.
- Hernández-Mendiola, E., 2008. Indicadores geoquímicos de condiciones paleohidrológicas y paleoclimáticas en una estalagmita desarrollada durante el último máximo glacial. *Experimental Thesis, UNAM, Ciudad Universitaria*, 89 pp.
- Hodell, D.A., Brenner, M. y Curtis, J.H., 2005a. Terminal Classic drought in the northern Maya Lowlands inferred from multiple sediment cores in Lake Chichancanab (Mexico). *Quaternary Science Reviews*, 24: 1413-1427.
- Hodell, D.A., Brenner, M. y Curtis, J.H., 2007. Climate and Cultural History of the northeastern Yucatan Peninsula, Quintana Roo, Mexico. *Climatic Change*, 83: 215-140.
- Hodell, D.A., Brenner, M., Curtis, J.H. y Guilderson, T., 2001. Solar forcing of drought frequency in the Maya lowlands. *Science*, 292(1367-1369).
- Hodell, D.A., Brenner, M., Curtis, J.H., Medina-Gonzalez, R., Rosenmeier, M.F., Guilderson, T.P., Chan-Can, E.I. y Albornaz-Pat, A., 2005b. Climate change on the Yucatan Peninsula during the Little Ice Age. *Quaternary Research* 63:109-121. *Quaternary Research*, 63: 109-121.
- Hoefs, J., 2004. *Stable Isotope Geochemistry*. Springer, New York, 244 pp.
- Hoyt, D.V. y Schatten, K.H., 1997. *The Role of the Sun in Climate Change*, U. S. A.
- Hu, C., Huang, J., Fang, N., Xie, S., Henderson, G.M. y Cai, Y., 2005. Adsorbed silica in stalagmite carbonate and its relationship to past rainfall. *Geochemical et Cosmochemical Acta*, 69(9): 2285-2292.

- Hughen, K.A., Overpeck, J.T., Peterson, L.C. y Trumbore, S., 1996. Rapid climate changes in the tropical Atlantic region during the last deglaciation. *Nature*, 380,: 51 - 54.
- INEGI, 1996. Querétaro. Censo de Población y Vivienda 1995. Resultados definitivos. Tabulados básicos. INEGI, 289 pp.
- INEGI., 1986. Síntesis Geográfica, Nomenclator y Anexo Cartográfico del Estado de Querétaro.
- Jex, C., Claridge, E., Baker, A. y Smith, C., 2008. Hyperspectral imaging of speleothems. *Quaternary International*, 187: 5-14.
- Johnsen, O., 2002. *L'encyclopédie des minéraux*. Delachaux et Niestlé, France, 438 pp.
- Klein, C., Hurlbut, C. S. Jr., 1999. *Manual of Mineralogy*. John Wiley & Sons, United States of America, 683 pp.
- Lachniet, M.S., 2009. Climatic and environmental controls on speleothem oxygen-isotope values. *Quaternary Science Reviews*, 28(5-6): 412-432.
- Lachniet, M.S., Burns, S.J., Piperno, D.R., Asmerom, Y., Polyak, V.J., Moy, C.M. y Christenson, K., 2004. El Niño/Southern Oscillation and rainfall history for the Isthmus of Panama from speleothem calcite. *Geophysical Research*, 109(D20): 1-8.
- Latham, A.G., Schwarcz, H.P. y Ford, D.C., 1986. The paleomagnetism and U-Th dating of Mexican stalagmite, DAS2. *Earth and Planetary Science Letters*, 79(1-2): 195-207.
- Lazcano, S.C., 1986. *Las cavernas de la Sierra Gorda*. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Legendre, P. y Legendre, L., 2003. *Numerical Ecology*. Elsevier, Montréal.
- Li, H.-C., Ku, T.-L., You, C.-F., Cheng, H., Edwards, R.L., Ma, Z.-B., Tsai, W.-s. y Li, M.-D., 2005. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and Sr/Ca in speleothems for paleoclimate reconstruction in Central China between 70 and 280 kyr ago. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(16): 3933-3947.
- Lira, J., 1997. *La Percepción Remota. Nuestros ojos desde el espacio*. La Ciencia para Todos, 33. Fondo de Cultura Económica, México, D. F., 150 pp.
- Lomb, N.R., 1972. Least-Squared Frequency Analysis of Unequally Spaced Data. *Astrophysics and Space Sciences*, 39: 447-462.
- Lounejeva Baturina, E., Morales Puente, P., Cinfuegos Alvarado, E., Sedov, S. y Solleiro Rebolledo, E., 2007. Late Quaternary Environment in the Teotihuacan Valley, México, Inferred from $\delta^{13}\text{C}$ in Soils. *Society for Archaeological Sciences*, 30(1): 6-11.
- Lozano, S., Sosa, S., Sugiura, Y. y Caballero, M., 2005. 23,000 yr of vegetation history of the Upper Lerma, a tropical high-altitude basin in Central Mexico. *Quaternary Research*, 64: 70-82.
- Lozano-García, M.S., Caballero, M., Ortega, B., Rodríguez, A. y Sosa, S., 2007. Tracing the effects of the Little Ice Age in the tropical lowlands of eastern Mesoamerica. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(41): 16200-16203.
- Ludwig, K.R. y Paces, J.B., 2002. Uranium-series dating of pedogenic silica and carbonate, Crater Flat, Nevada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(3): 487-506.

- Ludwig, K.R., Simmons, K.T., Szabo, B.J., Winograd, I.J., Landwehr, J.M., Riggs, A.C. y Hoffman, R.J., 1992. Mass-Spectrometric ^{230}Th - ^{234}U - ^{238}U Dating of the Devils Hole Calcite Vein. *Science*, 258: 284-287.
- Macías Vázquez, J.L., Capra Pedol, Lucía., 2005. Los Volcanes y sus Amenazas. La Ciencia para Todos., 210. FCE, SEP, CONACyT., México. D.F., 159 pp.
- Magaña, V., Amador, J.A. y Medina, S., 1999. The midsummer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12(6): 1577-1588.
- Mayewski, P.A., Rohling, E.E., Stager, J.C., Karlén, W., Maasch, K.A., Meeker, L.D., Meyerson, E.A., Gasse, F., van Kreveld, S., Holmgren, K., Lee-Thorp, J., Rosqvist, G., Rack, F., Staubwasser, M., Schneider, R.R. y Steig, E.J., 2004. Holocene climate variability. *Quaternary Research*, 62: 243-255.
- McCabe, G.J. y Clark, M.P., 2005. Trends and Variability in Snowmelt Runoff in the Western United States. *Journal of Hydrometeorology*, 476-482.
- McDermott, F., 2004a. Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review. *Quaternary Science Reviews*, 23(7-8): 901-918.
- McDermott, F., 2004b. Paleo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review. *Quaternary Science Reviews*, 23: 901-918.
- McDonough, W.F. y Sun, S., 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223-254.
- McGarry, S.F. y Baker, A., 2000. Organic acid fluorescence: applications to speleothem palaeoenvironmental reconstruction. *Quaternary Science Reviews*, 19: 1087-1101.
- Metcalfe, S.E. y Davies, S., 2007. Deciphering recent climate change in central Mexican lake records. *Climatic Change*, 83: 169-186.
- Metcalfe, S.E., O'Harab, S.L., Caballero, M. y J., D.S., 2000. Records of late Pleistocene-Holocene climatic change in Mexico - a review. *Quaternary Science Reviews*, 19: 699-721.
- Mortimer, G.E., McCulloch, M.T., Kinsley, L.P.J. y Esat, T.M., 2002. High precision ^{234}U - ^{230}Th dating using MC-ICP-MS. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 66: 66(A): 527.
- Mosiño Alemán, P.A. y García, E., 1974. The climate of Mexico. En: R.A. Bryson y F.K. Hare (Editors), *World Survey of Climatology. The climates of North America*. Elsevier Scientific Publishing., Amsterdam, pp. 345-404.
- Moy, C.M., Seltzer, G.O., Rodbell, D.T. y Anderson, D.M., 2002. Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch. *Nature*, 420: 162-165.
- Mueller, A.D., Anselmetti, F.S., Ariztegui, D., Brenner, M., Hillesheim, M.B., Hodell, D.A. y McKenzie, J.A., 2008. Human-Climate-Environment interactions in the Maya Lowlands: Evidence from Lake Petén Itzá (Guatemala). *Quaternary Research*.
- Newhall, C.G.S., S., 1982. The volcanic explosivity index /VEI/ - An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Geophysical Research*, 87(20): 1231-1238.

- Niggemann, S., Mangini, A., Mudelsee, M., Richter, D.K. y Wurth, G., 2003. Sub-Milankovitch climatic cycles in Holocene stalagmites from Sauerland, Germany. *Earth and Planetary Science Letters*, 216: 539-547.
- Ogurtsov, M.G., Lindholm, M., Helama, S., Eronen, M., Raspopov, O.M. y Dergachev, V.A., 2004. On The Possible Regional Distribution Of Ca 2.4 Kyr Climatic Cycle, *American Geophysical Union, Fall Meeting 2004*, AGU, Sn Francisco. California. U.S.A.
- Otaola, J.A., Mendoza, B. y Pérez, R., 2003. *El Sol y la Tierra: Una relación tormentosa*, 114. Fondo de Cultura Económica., México, D.F., 119 pp.
- Partin, J.W., Cobb, K.M. y Banner, J.L., 2008. Climate variability recorded in tropical and sub-tropical speleothems. *Past Global Changes*, 16(3): 9-10.
- Pavia, E.G., 2004. La influencia de los ciclones tropicales en la lluvia del noroeste de Baja California y el sureste de California. *GEOS*, 24(1): 69-72.
- Pérez Enríquez, R., Böhnell, H. y Bernal, J.P., 2007. *Stalagmite analysis for Paleoclimate Studies*, Centro de Geociencias. UNAM, Querétaro.
- Pérez-Cruz, L., 2006. Climate and ocean variability during the middle and late Holocene recorded in laminated sediments from Alfonso Basin, of Gulf of California, Mexico. *Quaternary Research*, 65: 401-410.
- Pérez-Enríquez, R., Böhnell, H. y Bernal, J.P., 2007. *Stalagmite analysis for Paleoclimate Studies*, Centro de Geociencias. UNAM, Querétaro.
- Perrette, Y., Delannoy, J.J., Desmet, M., Lignier, V. y Destombes, J.J., 2005. Speleothem organic matter content imaging. The use of Fluorescence Index to characterise the maximum emission wavelength. *Chemical Geology*, 214: 193-208.
- Perrette, Y., Genty, D., Destombes, J.-L., Delannoy, J.-J. y Quinif, Y., 1997. *Characterisation of Speleothem Crystalline Fabrics by Spectroscopic and Digital Image Processing Methods*, UIS Conges. Choranche, Vercors, France.
- Porter, S.C., 2000. High-Resolution Paleoclimatic Information from Chinese Eolian Sediments Based on Grayscale Intensity Profiles. *Quaternary Research*, 53(1): 70-77.
- Ramírez Izquierdo, H., Bernal, J.P., Pérez Enríquez, R., Böhnell, H., Morales Malacara, J.B. y McCulloch, M.T., 2007. Band-counting and grey tone spectral analysis in banded stalagmites, a new proxy for paleoclimate reconstruction?, *AGU- Annual summer meeting 2007*.
- Ramírez-Izquierdo, H., Bernal, J.P., Pérez Enríquez, R., Böhnell, H., Morales Malacara, J.B. y McCulloch, M.T., 2007. Band-counting and grey tone spectral analysis in banded stalagmites, a new proxy for paleoclimate reconstruction?, *AGU- Annual summer meeting 2007*.
- Raspopov, O.M., Dergachev, A.V., Kolström, T., Kuzmin, A.V., Lopatin, E.V. y Lisitsyna, O.V., 2007. Long-term solar activity variations as a stimulator of abrupt climate change. *Russian Journal of Earth Sciences*, 9: ES3002.

- Raspopov, O.M., Shumilov, O.I., Kasatkina, E.A., Turunen, E. y Lindholm, M., 2000. 35-year Climatic Bruckner Cycle - Solar Control of Climate Variability? Proceedings of the 1st Solar and Space Weather Euroconference, 463: 517-520.
- Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bayliss, A., Beck, J.W., Bertrand, C., Blackwell, P.G., Buck, C.E., Burr, G., Cutler K.B. y Damon, P., 2004. INTCAL04 Terrestrial Radiocarbon age calibration, 0-26 Cal Kyr BP. Radiocarbon, 46: 1029-1058.
- Richards, D.A., Bottrell, S.H., Cliff, R.A., Ströhle, K. y Rowe, P.J., 1998. U-Pb dating of a speleothem of Quaternary age. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(23-21): 3683-3688.
- Richards, D.A. y Dorale, J.A., 2003a. Uranium-series chronology and environmental applications of speleothems. En: B. Bourdon, G.M. Henderson, C.C. Lundstrom y C. Turner (Editors), Uranium-Series geochemistry. Reviews in mineralogy and geochemistry. Mineralogical Society of America & The Geochemical Society, Washington D.C., USA.
- Richards, D.A. y Dorale, J.A., 2003b. Uranium-series chronology and environmental applications of speleothems. En: B. Bourdon, G.M. Henderson, C.C. Lundstrom y C. Turner (Editors), Uranium-Series geochemistry. Reviews in mineralogy and geochemistry. Mineralogical Society of America & The Geochemical Society, Washington D.C., USA, pp. 407-450.
- Ristvet, L., 2003. Agriculture, Settlement, and Abrupt Climate Change: The 4.2ka BP event in Northern Mesopotamia. En: A.G. Union (Editor), Fall Meeting 2003.
- Rivera-Uria, M.Y., Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., Pérez-Pérez, J., McClung, E., Gonzáles, A. y Gama-Castro, J., 2007. Degradación ambiental en el valle Teotihuacan: evidencias geológicas y paleopedológicas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59(2): 203-217.
- Rootaru, M., Gaillardet, J., Steinberg, M. y Trichet, J., 2006. Les Climats passés de la Terre. Société Géologique de France. Vuibert, France, 195 pp.
- Rosenthal, Y., Field, M.P. y Sherrell, R.M., 1999. Precise Determination of Element/Calcium Ratios in Calcareous Samples Using Sector Field Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Analytical Chemistry*, 71(15): 3248-3253.
- Scargle, J.D., 1989. Studies in Astronomical Time Series Analysis. III. Fourier Transforms Autocorrelation Functions, and Cross-Correlation Functions of Unevenly Spaced Data. *Astrophysics*, 343: 874-887.
- Self, A.C. y Hill, C.A., 2003. How speleothems grow: an introduction to the ontogeny of cave minerals. *Journal of Cave and Karst studies*, 65 (2): 130-151.
- Sharp, W.D., Ludwig, K.R., Chadwick, O.A., Amundson, R. y Glaser, L.L., 2003. Dating fluvial terraces by $^{230}\text{Th}/\text{U}$ on pedogenic carbonate, Wind River Basin, Wyoming. *Quaternary Research*, 59: 139-150.
- Shopov, Y.Y., Ford, D.C. y Schwarcz, H.P., 1994. Luminescent microbanding in speleothems: High-resolution chronology and paleoclimate. *Geology*, 22(5): 407-410.

- Sloan, T. y Wolfendale, A.W., 2008. Testing the proposed causal link between cosmic rays and cloud cover. *Environmental Research Letters*, 3: 024001.
- Smith, C.L., Fairchild, I.J., Spötl, C., Frisia, S., Borsato, A., Moreton, S.G. y Wynn, P.M., 2009. Chronology building using objective identification of annual signals in trace element profiles of stalagmites. *Quaternary Geochronology*, 4: 11-21.
- SMN, 2008. Normales Climatológicas 1971-2000. Estación 00022008 Jalpan, Jalpan, CONAGUA, Mexico.
- Solleiro-Rebolledo, E., Sedov, S., McClung de Tapia, E., Cabadas, H., Gama-Castro, J. y Vallejo-Gómez, E., 2006. Spatial variability of environment change in the Teotihuacan Valley during the Late Quaternary: Paleopedological inferences. *Quaternary International*, 156-157: 13-31.
- Springs, K.D., 2006. Civilization, Transformation and Collapse. *Journal of World Anthropology: Occasional Papers*, III(1): 97-112.
- Stahle, D.W., Cook, E.R., Villanueva Díaz, J., Fye, F.K., Burnette, D.J., Griffin, R.D., Acuña Soto, R., Seager, R. y Heim, J.R.R., 2009. Early 21st-Century Drought in Mexico. *Eos*, 90(11): 89-100.
- Stuiver, M. y Braziunas, T.F., 1989. Atmospheric ^{14}C and century-scale solar oscillations. *Nature*, 338: 405-408.
- Svensmark, H. y Marsh, N., 2003. Solar Influence on Earth's Climate. *Space Science Reviews*, 107(1-2): 317-325.
- Therrell, M.D., Stahle, D.W. y Acuña-Soto, R., 2004. Aztec Drought and the "Curse of One Rabbit". *American Meteorological Society*, 85(9): 1263-1272.
- Thomson, D.J., 2009. Time-Series Analysis of Palaeoclimate Data. En: V. Gornitz (Editor), *Encyclopedia of Paleoclimatology and ancient environments*. Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Trauth, M.H., 2007. *Matlab Recipes for Earth Sciences*. Springer, Berlin, 288 pp.
- Treble, P., Chappell, J., Gagan, M.K., McKeegan, K.D. y Harrison, T.M., 2005. In situ measurement of seasonal $\delta^{18}\text{O}$ variations and isotopic trends in a modern speleothem from southwest Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 233: 17-32.
- Treble, P., Shelley, J.M.G. y Chappell, J., 2003. 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*, 6835: 1-13.
- Tucker, M.E. y Wright, V.P., 1990. *Carbonate Sedimentology*. Blackwell Science, United States of America, 482 pp.
- Usoskin, I.G., Schüssler, M., Solanki, S.K. y Mursula, K., 2007. Solar activity over the last 1150 years: does it correlate with climate? En: F. Favata, G.A.J. Hussain y Battrick, B. (Editors), *Proceedings of the 13th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems and the Sun*. European Space Agency, Hamburg, Germany, pp. 19-22.

- van Calsteren, P. y Thomas, L., 2006. Uranium-series dating applications in natural environmental science. *Earth-Science Reviews*, 75(1-4): 155-175.
- Villanueva-Diaz, J., Stahle, D.W., Luckman, B.H., Cerano-Paredes, J., Therrell, M. D. y Cleaveland, M.K., 2007. Winter-spring precipitation reconstructions from tree rings for northeast Mexico. *Climatic Change*, 83: 117-131.
- Vinther, B.M., Clausen, H.B., Johnsen, S.J., Rasmussen, S.O., Andersen, K.K., Buchardt, S.L., Dahl-Jensen, D., Seierstad, I.K., M-L., S.-A., Steffensen, J.P. y A. Svensson, 2006. A synchronized dating of three Greenland ice cores throughout the Holocene. *Journal of Geophysical Research*, 111[D13]: 112.
- Webster, J.W., Brook, G.A., Railsback, L.B., Cheng, H., Lawrence Edwards, E., Alexander, C. y Reeder, P.P.-. 2007. 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: 1-17.
- White, W.B., 1981. Reflectance spectra and colour in speleothems. *National Speleological Society Bulletin*, 43: 20-26.
- White, W.B., 2001. Paleoclimates records from speleothems in limestone caves. En: J.M. ID Sasowsky (Editor), *Studies of cave sediments: Physical and chemical records of paleoclimate*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, U.S.A., pp. 135-175.
- White, W.B., 2004. Paleoclimates records from speleothems in limestone caves. En: J.M. ID Sasowsky (Editor), *Studies of cave sediments: Physical and chemical records of paleoclimate*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, U.S.A., pp. 135-175.
- Woo, K.S., 2005. *Caves, A Wonderful Underground*. Hollym Corp., Publishers, Seoul, Korea, 230 pp.
- Wu, W. y Liu, T., 2004. Possible role of the "Holocene Event 3" on the collapse of Neolithic Cultures around the Central Plain of China. *Quaternary International*, 117(1): 153-166.
- Wyckoff, R.W.G., 1964. *Crystal Structures"* volume 2, pp 359 (John Wiley). 2. John Wiley, New York.