



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

CARRERA DE BIOLOGÍA

TESIS

*“Stenotaphrum secundatum (Walter) Kuntze (Poaceae)
como biomonitor de la variación de ¹⁴C atmosférico”*

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I O L O G O

PRESENTA:

María Iliana Yesika Ortiz Romero

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Laura E. Beramendi Orosco

ASESOR INTERNO DE TESIS

M. en C. Germán Calva Vásquez

MEXICO, D.F. 2011





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.

Contenido	Página
Resumen	
I. Introducción	3
II. Justificación	6
III. Hipótesis	7
IV. Objetivos	8
4.1 General	8
4.2. Particulares	8
V. Marco Teórico	
5.1. Radiocarbono	9
5.2. El ^{14}C atmosférico moderno	13
5.2.1 Variaciones de la concentración en la atmósfera	13
5.2.2 Efecto "Suess"	16
5.2.3 Aplicaciones	17
5.3. Monitoreo de $^{14}\text{CO}_2$	18
5.3.1. Monitoreo de ^{14}C en muestras de CO_2 atmosférico	19
5.3.2. Monitoreo de ^{14}C en plantas	20
5.3.2.1. Análisis con resolución anual	21
5.3.2.2. Análisis con resolución subanual	23
5.4. Métodos de biomonitoreo	24
5.5. Biología de la especie	27
5.5.1. Distribución, clima y suelos	29
5.5.2. Importancia	30

VI. Material y métodos

6.1. Etapa de acondicionamiento de los sistemas	
6.1.1. Sistema con <i>Stenotaphrum secundatum</i> bajo cultivo	31
6.1.2. Sistema de captura de CO ₂ atmosférico	32
6.2. Etapa de muestreo	
6.2.1. Sistema con <i>Stenotaphrum secundatum</i> bajo cultivo	33
6.2.2. Sistema de captura de CO ₂ atmosférico	34
6.3. Etapa de análisis	
6.3.1. Síntesis de benceno	35
6.3.2. Análisis de ¹³ C	37
6.3.3. Análisis de ¹⁴ C	37

VII. Resultados y Discusión

7.1. Acondicionamiento del sistema <i>Stenotaphrum secundatum</i>	42
7.2. Muestreo del sistema de <i>Stenotaphrum secundatum</i>	44
7.3. Muestreo del sistema de captura de CO ₂ atmosférico	46
7.4. F ¹⁴ y Δ ¹⁴ C en las muestras de <i>Stenotaphrum secundatum</i> y de CO ₂ atmosférico	48

VIII. Conclusiones y recomendaciones

60

IX. Referencias

62

X. Referencias electrónicas

68

Figuras

Figura		Página
1	Diagrama esquemático de la formación de Carbono 14	9
2	Reacción de decaimiento del Carbono 14.	10
3	^{14}C atmosférico a finales de los años 50's del siglo XX y magnitud de la detonación nuclear.	13
4	Representación del sistema de acondicionamiento para el cultivo y cosecha de <i>Stenotaphrum secundatum</i> .	31
5	Sistema de bombeo para la captura de CO_2 atmosférico con una solución 0.7M de NaOH libre de CO_3^{-2} .	32
6	Sintetizador de benceno "Task".	34
7	Espectrómetro de Centelleo Líquido.	37
8	Establecimiento de <i>Stenotaphrum secundatum</i> .	42
9	Representación de la etapa de recuperación de <i>Stenotaphrum secundatum</i> a partir de los diferentes tiempos de corte.	44
10	Comparación entre los valores de $F^{14}\text{C}$ para las muestras de CO_2 atmosférico (rombos) y <i>Stenotaphrum secundatum</i> (cuadros). Las barras horizontales representan el periodo de muestreo y el símbolo está localizado en el día correspondiente al punto medio de cada periodo de muestreo.	53
11	Comparación entre los valores de $\Delta^{14}\text{C}$ en CO_2	55

atmosférico (rombos) y *Stenotaphrum secundatum* (cuadros) Las barras horizontales representan el periodo de muestreo y el símbolo está localizado en el día correspondiente al punto medio de cada periodo de muestreo.

Cuadros

Cuadro		Página
1	Muestreo de <i>Stenotaphrum secundatum</i> con el periodo, el peso de la muestra y las observaciones del periodo para cada una de ellas.	43
2	Resultados del muestreo de CO ₂ atmosférico, con el periodo, la resolución, el peso de la muestra y las observaciones para cada una de ellas.	45
3	Resultados del análisis de ¹⁴ C en las muestras de CO ₂ atmosférico y <i>Stenotaphrum secundatum</i> , con el tipo de muestra, el periodo, la fecha de análisis, los gramos de benceno obtenidos al final del análisis en el ECL; los CPM y el error de CPM, así como la corrección por el blanco, la composición isotópica de ¹³ C ($\delta^{13}\text{C}$) y el factor de normalización por fraccionamiento isotópico del estándar y cada muestra. La última columna corresponde a la actividad del estándar (A_o) y de cada muestra (A_c).	49
4	Resultados de $\Delta^{14}\text{C}$ y $F^{14}\text{C}$ para las muestras de CO ₂ atmosférico y <i>Stenotaphrum secundatum</i> , con el tipo de muestra, el valor de $F^{14}\text{C}$, el error en $F^{14}\text{C}$, así como el año de análisis y el valor de $\Delta^{14}\text{C}$ para cada muestra.	51

Resumen

Después del importante aumento en la concentración de radiocarbono en la atmósfera durante la década de los años 50's y 60's del siglo pasado derivado de las pruebas nucleares, en años recientes se ha tenido una disminución casi exponencial debido al intercambio de $^{14}\text{CO}_2$ entre la atmósfera y los océanos. La disminución está muy relacionada a la emisión de $^{12}\text{CO}_2$ derivado de la quema de combustibles fósiles. Desde que se reconoció que la cantidad de ^{14}C atmosférico ha variado de manera importante, varios países realizan un monitoreo del $^{14}\text{CO}_2$ atmosférico, sin embargo, en México hay muy pocos estudios sobre la variación de este radioisótopo (Beramendi *et al.*, 2010; Vay *et al.*, 2009), a pesar de la necesidad de conocer y establecer el intercambio de carbono entre los diferentes reservorios, y también, su relación con el cambio climático global y la necesidad de cuantificar las emisiones de CO_2 .

Diversos grupos de plantas realizan eficientemente la fotosíntesis incorporando CO_2 atmosférico para los procesos de la biosfera (Fontúrbel, 2002), monitoreándolos nos permiten determinar el intercambio de carbono y sus perturbaciones. El registro del $^{14}\text{CO}_2$ por métodos químicos puede vincularse con la asimilación ^{14}C por las plantas y así su cuantificación.

En el presente estudio se llevó a cabo el monitoreo de ^{14}C en un sistema de captura de CO_2 atmosférico y uno de cultivo de *Stenotaphrum secundatum*, con el fin de determinar si esta especie se puede usar como biomonitor de las variaciones de ^{14}C atmosférico. Ambos tipos de muestra se obtuvieron de manera

paralela y se analizaron por la técnica de Espectrometría de Centello Líquido en el Laboratorio Universitario de Radiocarbono de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Los resultados obtenidos de $F^{14}C$ para *Stenotaphrum secundatum* fluctuaron de 0.9429 a 1.0609, mientras que, para el CO_2 atmosférico estuvieron entre 0.7299 y 1.0841, indicando que hay una correspondencia entre ambos tipos de muestra, con una diferencia promedio entre ambas de 0.015‰. Por otro lado, los valores obtenidos de $\Delta^{14}C$ para *Stenotaphrum secundatum* estuvieron en un rango de -63.91‰ a 53.34‰, mientras que, para los de CO_2 atmosférico fueron de -50.59‰ a 76.34‰, dichos resultados, comparados con una zona de monitoreo alejada de fuentes antropogénicas de CO_2 , Niwot Ridge (con un $\Delta^{14}C$ de 47 y 39‰), presentaron diferencias significativas ya que los valores fueron menores, lo que reflejó las altas emisiones de CO_2 derivado de los combustibles fósiles, sin embargo, para muestras como; UNAM-0934, UNAM-0956, UNAM-0960 y UNAM-0969 (con valores de $\Delta^{14}C$ de 55.25, 75.15, 76.34 y 53.34‰, respectivamente) los valores fueron mayores, resultado en cierta medida inesperado, por lo que, es recomendable hacer un análisis de las posibles fuentes que ocasionan estas variaciones.

Se concluyó que *Stenotaphrum. secundatum* tiene el potencial como biomonitor de ^{14}C tanto para zonas urbanas como rurales. Se recomienda duplicar la superficie de la producción de biomasa.

I. Introducción

En la actualidad se han visto grandes perturbaciones sobre la superficie de la Tierra generadas tanto por agentes naturales como por la acción del hombre. Tal es el caso de la cantidad de ^{14}C en la atmósfera, la cual se mantuvo relativamente constante a lo largo de la escala de tiempo del ^{14}C (i.e. 50,000 años) hasta que desde finales del siglo XIX la actividad humana se incrementó exponencialmente y comenzó a alterar de manera significativa la concentración atmosférica de este.

Por un lado, la concentración atmosférica de CO_2 ha aumentado de manera importante como consecuencia de la quema de combustibles fósiles, en un 80% entre 1970 y 2004 (IPCC, 2007). Este aumento en la cantidad de CO_2 atmosférico, libre de ^{14}C , ha ocasionado que la concentración de dicho isótopo disminuya alrededor de un 20‰, lo cual fue observado en muestras de madera de finales del siglo XIX, cuando la Revolución Industrial se generalizó, esta variación es conocida como Efecto “Suess”. Por otro lado, en los años 50’s y 60’s del siglo pasado este isótopo fue producido en la atmósfera durante las pruebas nucleares, registrando un máximo entre 1963 y 1964, cuando el nivel de la concentración fue dos veces más alto que la de ^{14}C natural. Desde la firma del tratado para la prohibición de pruebas nucleares en 1963, la concentración de ^{14}C atmosférico se ha ido reduciendo debido al intercambio de $^{14}\text{CO}_2$ entre la atmósfera y los océanos, pero también debido al aumento de las emisiones de $^{12}\text{CO}_2$ originado de la quema de combustibles fósiles (Rakowski *et al.*, 2005).

La variación local del contenido de radiocarbono puede ser un indicador del consumo de combustibles fósiles dentro de un ambiente urbano (Levin y Hesshaimer, 2000; Tollefson, 2010). Los combustibles fósiles no contienen radiocarbono, cuya vida media es de 5730 años, por ende, el CO₂ emitido por su quema está libre de este radioisótopo, de este modo, el ambiente en las grandes ciudades tiene una concentración baja de radiocarbono, comparado con el aire limpio en una zona no urbanizada. Por lo tanto, al comparar la concentración de radiocarbono contenida en el CO₂ atmosférico de un ambiente urbano con la concentración en el aire limpio, se pueden estimar las emisiones locales de CO₂ fósil.

Las medidas de la concentración de ¹⁴CO₂ atmosférico han sido realizadas en varias estaciones, principalmente en Europa y Asia, ya sea a partir de programas de monitoreo de ¹⁴C en el CO₂ atmosférico y material vegetal, o reconstruido a partir de secuencias de anillos de crecimiento de árbol (Muraki *et al.*, 2001). Por ejemplo, Rakowski *et al.* (2004, 2008) determinaron que para las zonas urbanas de Cracovia (Polonia), Nagoya (Japón) y Arequipa (Perú), el ¹⁴C contenido en anillos de crecimiento de árbol es significativamente inferior al contenido en muestras atmosféricas de zonas “limpias” debido al gran aporte a las atmósferas urbanas de CO₂ derivado de la quema de combustibles fósiles, pudiendo además establecer una cronología anual del aporte de CO₂ antropogénico para el periodo 1980-2003. Sin embargo, el patrón de variación de ¹⁴C registrado en anillos de crecimiento de árboles puede generarse con una resolución anual, en contraste con la alta resolución con la que se registra el ¹⁴C atmosférico en programas de

monitoreo, ya sea en el aire o en material vegetal. Esto puede resultar en una limitante al intentar comparar ambos registros con la finalidad de estimar las emisiones de CO₂ en zonas urbanas.

A pesar del potencial del ¹⁴C como trazador y de la importancia de poder estimar las emisiones de CO₂ fósil, en Norteamérica se han llevado a cabo pocos registros de ¹⁴C atmosférico, particularmente en México se ha realizado únicamente una reconstrucción de los niveles de ¹⁴C durante la segunda mitad del siglo XX, a partir de una secuencia de anillos de crecimiento de árboles (Beramendi *et al.*, 2010).

II. Justificación

Diversos grupos de plantas responden de una manera determinada a las perturbaciones, y pueden ser usadas para evidenciar y monitorear los procesos que ocurren en la biosfera (Fontúrbel, 2002), como la variación en la concentración de ^{14}C . Los individuos de la familia Poaceae, han sido utilizados en la realización de modelos para conocer la dinámica atmosférica del carbono. Por otra parte, se han llevado a cabo estudios de cuantificación de ^{14}C para estimar la concentración de CO_2 de origen fósil en la atmósfera, en especies como *Zea mays* (Hsueh *et al.*, 2007), *Agropyron repens* (Quarta *et al.*, 2007), *Hordeum vulgare*, *Triticum aestivum*, *Secale cereale*, *Avena sativa* (Tauber 1967; Barrette *et al.*, 1980), entre otros. Los resultados han sido satisfactorios. En el presente trabajo se evaluó si *Stenotaphrum secundatum* (Walter) Kuntze es un buen biomonitor para el análisis de la variación de ^{14}C mediante su cultivo, monitoreo mensual, y la comparación con el ^{14}C registrado por un sistema de captura de CO_2 atmosférico. Las características biológicas de esta especie permitirán iniciar programas de monitoreo con una frecuencia mensual en diversos sitios de México, con la finalidad de estimar las emisiones de CO_2 fósil en la cuenca endorreica conocida como Valle de México a mediano plazo.

III. Hipótesis

Las concentraciones de ^{14}C en la gramínea *Stenotaphrum secundatum* reflejan la composición isotópica del CO_2 atmosférico del sitio donde se desarrolla, por lo que puede utilizarse como biomonitor de la variación de ^{14}C atmosférico, lo que permitirá generar registros de ^{14}C con alta resolución.

IV. Objetivos

4.1 Objetivo general

- Evaluar el potencial de *Stenotaphrum secundatum* como biomonitor de las variaciones de ^{14}C atmosférico, con el fin de establecer un programa sencillo de monitoreo de alta resolución, que pueda ser utilizado tanto en zonas urbanas como rurales, aislada de fuentes de emisiones de CO_2 .

4.2 Objetivos particulares

- Establecer un sistema de cultivo de *Stenotaphrum secundatum*. para determinar las condiciones necesarias de su desarrollo.
- Establecer un sistema de captura de CO_2 como carbonato.
- Evaluar los niveles de ^{14}C registrados por *Stenotaphrum secundatum*, mediante la comparación con los valores obtenidos por el sistema de captura de CO_2 atmosférico como carbonato.

V. Marco Teórico

5.1. Radiocarbono

El carbono tiene tres isótopos; dos isótopos estables no radiactivos, carbono 12 (^{12}C), carbono 13 (^{13}C), y un isótopo que es inestable y radioactivo, carbono 14 (^{14}C), el cual se desintegra espontáneamente emitiendo radiaciones beta de bajo nivel. De los isótopos estables el 98.89% corresponde a ^{12}C y el 1.1% a ^{13}C . Mientras que, la abundancia en la naturaleza de ^{14}C es de un átomo por cada 10^{12} átomos de ^{12}C .

El ^{14}C ha sido usado en estudios cronológicos para muestras orgánicas de no más de 50000 años, sin embargo, en los últimos años, se ha usado extensamente como un marcador natural en análisis relacionados con problemas ambientales (Alessio *et al.*, 2002), por ser importante para el desarrollo de esta investigación nos enfocaremos al fundamento de su estudio.

Este isótopo del carbono está formado por seis protones y ocho neutrones, que lo hace radioactivo. El radiocarbono es producido naturalmente mediante el bombardeo de la atmósfera por los rayos cósmicos, que convierten los átomos de nitrógeno en carbono radiactivo mediante la ganancia de un neutrón y la liberación de un protón (figura 1).

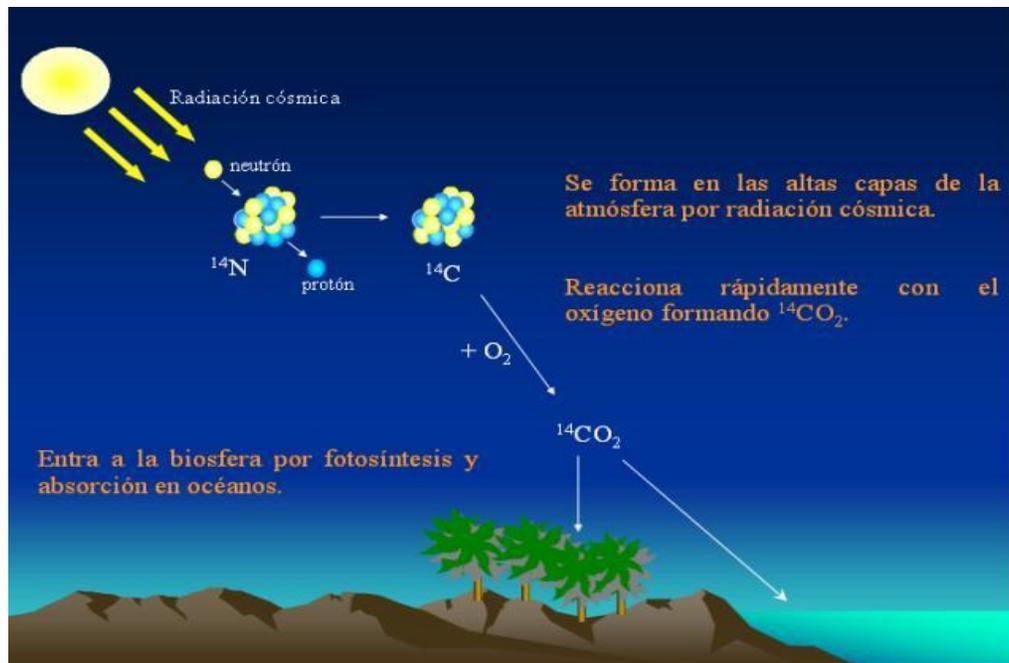


Figura 1. Diagrama esquemático de la formación de Carbono 14 (Tomado de www.geologia.unam.mx/igl/deptos/geoq/lur).

La tasa más alta de producción de ^{14}C tiene lugar entre 9 y 15 km de altura, y en latitudes geomagnéticas altas, aproximadamente el 55% de ^{14}C es formado en la estratosfera, mientras que, el 45% en la troposfera (Hua, 2009), pero el ^{14}C se distribuye uniformemente sobre la atmósfera y reacciona con el oxígeno dando lugar al monóxido de carbono (^{14}CO) y dióxido de carbono ($^{14}\text{CO}_2$) (<http://blogs.hoy.es/historiayciencia/2008/9/17/el-radiocarbono-o-c14>). Este $^{14}\text{CO}_2$ penetra en los océanos, disolviéndose en el agua; en las plantas a través del proceso de fotosíntesis se incorpora el átomo radiactivo; y los animales lo incorporan por ingestión a su metabolismo. De esta manera, la proporción $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ en los organismos vivos es similar a la atmosférica y relativamente constante. Tras la muerte de un organismo no se incorporan nuevos átomos de ^{14}C a los tejidos y la concentración del isótopo va decreciendo conforme va transformándose en ^{14}N por decaimiento radiactivo (figura 2).

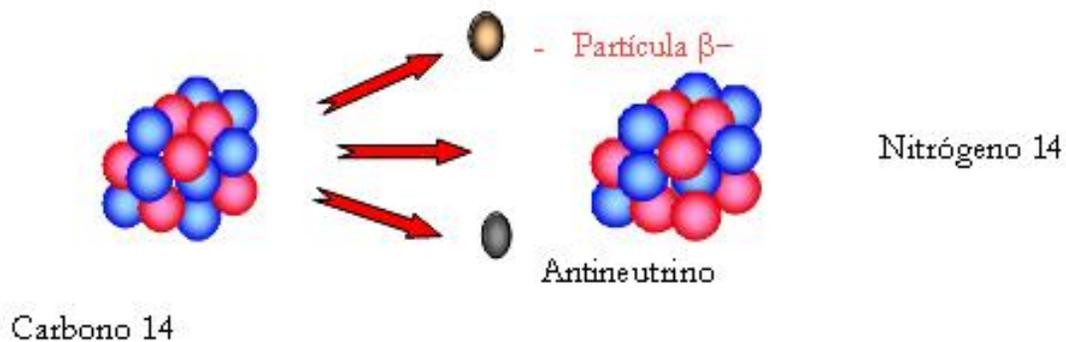


Figura 2. Reacción de decaimiento del carbono 14 (Tomado de www.geologia.unam.mx/igl/deptos/geoq/lur).

El decaimiento del ^{14}C es un proceso espontáneo que ocurre a una razón aproximadamente constante y es generalmente expresada como la vida media (tiempo necesario para que la mitad de un número dado de átomos de ^{14}C decaiga). Al medir la cantidad de radiactividad en una muestra de origen orgánico se calcula la cantidad de ^{14}C que aún queda en el material, así puede ser datado el momento de la muerte del organismo correspondiente (González y Beramendi, 2005).

En la década de los 50's del siglo XX, un grupo de científicos liderados por W.F. Libby determinó que el tiempo de vida media del ^{14}C era 5568 ± 40 años y a partir de los siguientes principios desarrolló el método de datación por radiocarbono.

1. La producción de ^{14}C en la atmósfera ha sido constante y su contenido se encuentra en estado de equilibrio en la Tierra.

2. La vida media del radiocarbono es constante y conocida con precisión.
3. No hay procesos de fraccionamiento que alteren las relaciones isotópicas de ^{14}C , ^{13}C y ^{12}C .

Sin embargo, los principios anteriores no se cumplen por completo, ya que la producción de ^{14}C y su contenido en los diferentes reservorios han sufrido variaciones por cambios en la radiación cósmica, la actividad solar, la intensidad del campo magnético bipolar terrestre, así como por las pruebas con armas nucleares realizadas durante la segunda mitad del siglo XX.

Por otro lado, se ha recalculado la vida media del ^{14}C y el valor aceptado actualmente, para estudios geoquímicos es de 5730 ± 40 . Finalmente, existe fraccionamiento isotópico dependiendo del ambiente y origen de las muestras (González y Beramendi, 2005). Este concepto se refiere a la diferencia en la composición isotópica de un elemento entre el material original y el resultante de un proceso físico, químico o biológico. Es resultado de las pequeñas diferencias en las propiedades fisicoquímicas entre los diferentes isótopos de un elemento, y es proporcional a la diferencia entre sus masas (Fritz y Fontes, 1980; Mook, 2000). Por lo anterior, el fraccionamiento del ^{14}C es del doble que el del ^{13}C (Olsson, 2009).

5.2. El ^{14}C atmosférico moderno

5.2.1. Variaciones de la concentración en la atmósfera

La variación en la concentración de ^{14}C en la atmósfera se debe a efectos naturales y antropogénicos. Entre los naturales tenemos variaciones en la tasa de producción de este radioisótopo en las altas capas de la atmósfera y el intercambio de éste entre la atmósfera y otros reservorios, tales como los océanos y la biósfera. Por otro lado, los efectos antropogénicos se deben a las pruebas con armas nucleares y al desarrollo de la industria para la generación de electricidad, el ^{14}C antropogénico ha sido producido en reactores nucleares y liberado a la atmósfera en cantidades cuantificables (Rakowski *et al.*, 2005; Rakowski *et al.*, 2004; Povinec *et al.*, 1986).

Durante las pruebas nucleares que se llevaron a cabo al aire libre en los años 50's y principios de los 60's del siglo pasado, grandes cantidades de ^{14}C , en total 630×10^{26} átomos de ^{14}C , o más, fueron producidos en la atmósfera (Levin y Hesshaimer, 2000). Esta entrada de ^{14}C artificial causó un incremento global en la proporción $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ($\Delta^{14}\text{C}$) del CO_2 atmosférico, alcanzando un máximo en 1963–1965 cuando el nivel de la concentración fue dos veces más alto que la concentración de radiocarbono natural antes de 1850 (figura 3), provocando un desequilibrio de ^{14}C entre la atmósfera, biósfera y la superficie oceánica (Levin y Hesshaimer, 2000; Rakowski *et al.*, 2005). De 1963 a 1965, cuando el Tratado para la prohibición de las pruebas nucleares fue decretado, la concentración de

^{14}C en la troposfera ha disminuido, debido al rápido intercambio de CO_2 entre la atmósfera y otros reservorios de carbono, principalmente los océanos y la biósfera (Rakowski *et al.*, 2005) y a la dilución por el importante aumento en la emisión de CO_2 libre de ^{14}C derivado de la quema de combustibles fósiles (Hsueh *et al.*, 2007; Rakowski *et al.*, 2008).

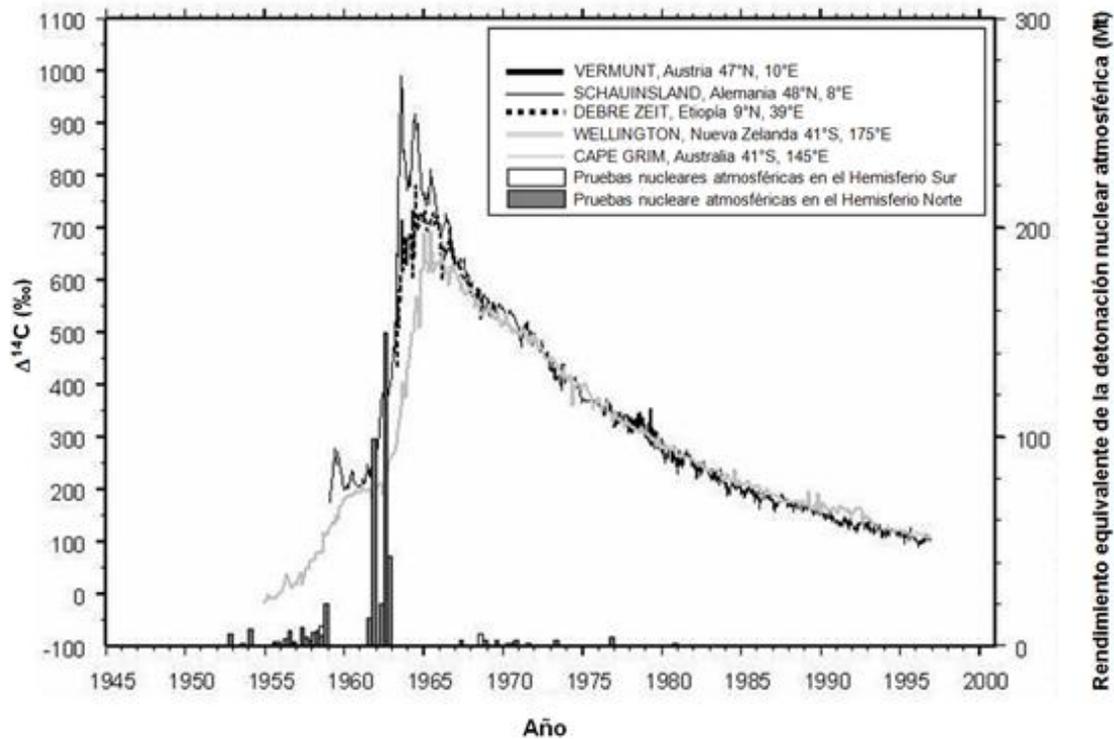


Figura 3. ^{14}C atmosférico a finales de los años 50's del siglo XX y magnitud de la detonación nuclear (Hua y Barbetti, 2004).

El exceso de ^{14}C producido por las pruebas nucleares en la atmósfera fue en su mayoría transferido hacia el Hemisferio Norte y su distribución no fue homogénea, por lo que éste se encuentra dividido en tres zonas, de las cuales México se ubica en la zona dos. En el Hemisferio Sur, este exceso de ^{14}C fue menor y de manera uniforme, debido a que dichas pruebas fueron llevadas a cabo principalmente en el Hemisferio Norte (modificado de Hua y Barbetti, 2004).

Por otra parte, debido a las actividades humanas desde la Revolución Industrial, la carga atmosférica de muchos gases de efecto invernadero se ha incrementado dramáticamente. Las medidas directas en las últimas décadas y los análisis de aire antiguo capturado en el hielo de las regiones polares, permitieron la cuantificación del cambio en la concentración de dichos gases en la atmósfera. De una probable situación preindustrial “intacta” desde hace varios cientos de años hasta hoy, la proporción del CO₂ se incrementó casi en un 30% (Levin y Hesshaimer, 2000). En las últimas décadas este incremento ha sido casi exponencial, el promedio global de la cantidad de CO₂ es de casi 370 ppm, debido, en su mayoría, a la emisión derivada de la quema de combustibles fósiles tales como, carbón, petróleo y gas natural. Este incremento en la concentración de CO₂ ha afectado la composición isotópica de ¹⁴C en la atmósfera, así como en los océanos y la biósfera (Rakowski *et al.*, 2005; Rakowski *et al.*, 2004).

La mayor perturbación que ha hecho el hombre al ciclo del CO₂ atmosférico es producto de la quema de combustibles fósiles, con el 95% del CO₂ liberado en el Hemisferio Norte. Hoy las emisiones de combustibles fósiles contribuyen aproximadamente en un 50% a la disminución del $\Delta^{14}\text{CO}_2$, tendencia observada en la atmósfera global (Levin y Hesshaimer, 2000). Este exceso de CO₂ libre de ¹⁴C provoca una dilución en la composición atmosférica de dicho isótopo, evento conocido como “Efecto Suess”.

Los estudios de ¹⁴C han jugado un papel crucial como una herramienta para aclarar la variación temporal y espacial de las fuentes y los sumideros de carbono.

Además, recientes investigaciones han mostrado un interés en medir las variaciones atmosféricas de CO₂ a escalas regionales o locales, para estudiar los efectos de la emisión y difusión del CO₂ derivado de los combustibles fósiles, los cuales están libres de ¹⁴C (Levin y Hesshaimer, 2000).

5.2.2. Efecto “Suess”

En 1953 Hans Suess, descubrió el llamado “Efecto Suess”, que consiste en una reducción global en la proporción de ¹⁴C/¹²C en el CO₂ atmosférico, el cual fue observado en anillos de árboles. Dicho descubrimiento demostró que los bosques que crecieron entre 1930 y 1950 tenían valores de Δ¹⁴C de 20-40‰ por debajo de aquellos que lo hicieron antes del año 1890 como resultado de las emisiones de CO₂ antropogénico derivado de la quema de combustibles fósiles libres de ¹⁴C desde la Revolución Industrial (Levin et al., 1989; Nydal y Lövseth, 1996). Por lo tanto el efecto describe una reducción gradual de ¹⁴C en la atmósfera desde 1850, aproximadamente (Rakowski et al., 2008). A pesar de su naturaleza global, el Efecto “Suess” global no puede ser evaluado directamente del análisis de ¹⁴C atmosférico debido, principalmente, a las pruebas con armas nucleares. Solo puede ser estimado a través de modelos matemáticos del ciclo del carbono global. Sin embargo, es posible estimar el Efecto “Suess” a nivel local en zonas urbanas, mediante la comparación entre la concentración atmosférica de ¹⁴C de la zona urbana con la concentración de este radioisótopo en un ambiente limpio, alejado de fuentes de emisión de CO₂ fósil. Esto se debe a que la magnitud de la dilución

de ^{14}C es mayor en zonas urbanas por la alta densidad de fuentes de emisión asociadas a las actividades industriales y de autotransportes.

5.2.3. Aplicaciones

El máximo en la actividad de ^{14}C atmosférico registrado durante los primeros años de la década de los 60's del siglo XX, permite fechar muestras con una alta precisión, además, dio la oportunidad de estudiar varios procesos en los sistemas terrestres tales como el transporte atmosférico, velocidad de intercambio aire-oceano de dicho gas, el ciclo de carbono en el suelo, Efecto "Suess" y modelos regionales de la concentración de CO_2 derivado de combustibles fósiles, los cuales proporcionan información acerca de procesos locales, incluyendo las contribuciones biológicas en las emisiones de CO_2 urbano, y variación temporal y espacial en la composición isotópica de emisiones urbanas. Un valor preciso del inventario de ^{14}C en la atmósfera y el cambio en el tiempo son cruciales para la validación de modelos teóricos sobre la proporción de carbono en las diferentes fuentes de origen (Nydal y Lövseth, 1983; Chakraborty *et al.*, 2008; Pataki *et al.*, 2003). Así pues, el ^{14}C ha sido usado extensamente, en los últimos años, como un marcador natural en estudios relacionados con problemas ambientales. Por otra parte, el estudio en $^{14}\text{CO}_2$ atmosférico es importante en investigaciones forenses, así como para la datación de especímenes orgánicos posteriores al periodo de los ensayos nucleares (post-bomba) (Levin y Kromer, 2004).

5.3. Monitoreo de $^{14}\text{CO}_2$

El monitoreo de radiocarbono y su concentración en la atmósfera y la biósfera comenzó desde los años 60's del siglo pasado, al mismo tiempo que ocurrió el disturbio antropogénico de la distribución natural de ^{14}C con las pruebas nucleares (Krajcar-Bronić *et al.*, 1998).

El análisis de la concentración de $^{14}\text{CO}_2$ atmosférico se ha llevado a cabo en varias estaciones de Europa, Canadá, Lejano Oriente. Algunos investigadores analizan directamente el contenido de ^{14}C en el CO_2 atmosférico, ya sea capturado como carbonato por la reacción con hidróxido de sodio (NaOH), o en forma gaseosa aislado de muestras de aire (Levin *et al.*, 1980; Nydal y Lövseth, 1983; Povinec *et al.*, 1986; Nydal y Lövseth, 1996; Meijer *et al.*, 1996; Krajcar-Bronić *et al.*, 1998; Rakowski *et al.*, 2001; Kuc *et al.*, 2003; Hua y Barbetti, 2004; Levin y Kromer, 2004; Rakowski *et al.*, 2004; Rakowski *et al.*, 2005); mientras que, otros lo hacen a partir de material vegetal, principalmente en hojas de árbol (Levin *et al.*, 1980; McNeely, 1994; Krajcar-Bronić *et al.*, 1998; Muraki *et al.*, 2001), plantas con ciclo de vida corto (Tauber, 1967; Barrette *et al.*, 1980; Krajcar-Bronić *et al.*, 1998; Hsueh *et al.*, 2007; Quarta *et al.*, 2007) y secuencias de anillos de árbol (Levin *et al.*, 1980; Dai y Fan, 1986; Rakowski *et al.*, 2001; Pawelczyk y Pazdur, 2004; Rakowski *et al.*, 2004; Rakowski *et al.*, 2005; Pazdur *et al.*, 2007; Quarta *et al.*, 2007; Chakraborty *et al.*, 2008; Rakowski *et al.*, 2008). Los resultados muestran que las fuertes emisiones locales de CO_2 de los combustibles fósiles causan grandes disturbios en la composición isotópica de la atmósfera y

biósfera local, además tienen influencia a escala global y regional. Este hecho no sólo es observado en áreas industrializadas, sino también, en regiones urbanizadas donde el CO₂ es emitido por pequeñas instalaciones industriales, vehículos y otras fuentes. La magnitud del efecto de la variación en la concentración de ¹⁴C depende de la distancia de las fuentes de emisión de CO₂ (Rakowski *et al.*, 2004).

5.3.1. Monitoreo de ¹⁴C en muestras de CO₂ atmosférico

El monitoreo de CO₂ atmosférico se ha llevado a cabo principalmente en estaciones de Europa desde 1959 con una resolución semanal o mensual, a través de la reacción entre el CO₂ y una solución de NaOH a diferentes concentraciones (Levin *et al.*, 1980; Nydal y Lövseth, 1983; Povinec *et al.*, 1986; Nydal y Lövseth, 1996; Meijer *et al.*, 1996; Krajcar-Bronić *et al.*, 1998; Rakowski *et al.*, 2001; Kuc *et al.*, 2003; Hua y Barbetti, 2004; Levin y Kromer, 2004; Rakowski *et al.*, 2004; Rakowski *et al.*, 2005).

Además, en los últimos años, el monitoreo se ha realizado a través de la captura de CO₂ en muestras de aire en forma gaseosa en matraces previamente evacuados de los que se aísla y purifica el CO₂ para el análisis de ¹⁴C (Turnbull *et al.*, 2006; Turnbull *et al.*, 2007; Vay *et al.*, 2009). La principal diferencia entre este tipo de registros y los que se realizan mediante la reacción con una solución básica es el tiempo de muestreo. Los registros generados mediante captura de aire gaseoso son puntuales pues capturan el aire en un periodo corto (de diez

minutos aproximadamente); mientras que, los registros obtenidos mediante la captura de CO₂ por reacción con una solución básica integran al CO₂ atmosférico en periodos que van desde una semana hasta un mes.

Algunos resultados muestran un descenso estacional de ¹⁴C debido en parte, a las variaciones estacionales de intercambio estratósfera-tropósfera y al desequilibrio en los flujos de ¹⁴C entre la biósfera y atmósfera (Nydal y Lövseth, 1996; Levin y Kromer, 2004), por otra parte, otros resultados han mostrado, con un análisis isotópico y una comparación de muestras de aire limpio, un descenso en ¹⁴C, debido a la incorporación de combustibles fósiles (Levin *et al.*, 1980).

5.3.2. Monitoreo de ¹⁴C en plantas

La composición isotópica de carbono en los tejidos de las plantas puede proporcionar información de la composición isotópica de la atmósfera en la que se desarrollan. Esta depende de la composición isotópica del CO₂ asimilado durante el proceso de fotosíntesis. Por esta razón, la determinación de $\Delta^{14}\text{C}$ en las plantas sirve como un indicador de la composición isotópica del CO₂ atmosférico y por ende permite estimar las emisiones de CO₂ causadas por la quema de combustibles fósiles producto de la actividad humana (Pawelczyk y Pazdur, 2004).

El análisis de ¹⁴C en plantas comenzó a partir de 1957, inicialmente en semillas de *Avena sativa* y otros cereales como *Hordeum vulgare*, *Triticum aestivum*, *Secale cereale*, (Barrette *et al.*, 1980; Tauber, 1967), además de hojas de plantas

(Levin *et al.*, 1980; McNeely, 1994; Krajcar-Bronić *et al.*, 1998; Muraki *et al.*, 2001) y anillos de crecimiento de árbol (Levin *et al.*, 1980; Dai y Fan, 1986; Rakowski *et al.*, 2001, Pawelczyk y Pazdur, 2004; Rakowski *et al.*, 2004; Rakowski *et al.*, 2005; Pazdur *et al.*, 2007; Quarta *et al.*, 2007; Chakraborty *et al.*, 2008; Rakowski *et al.*, 2008).

Se observa una diferencia entre la composición isotópica de ^{14}C de las plantas y la atmosférica, debida al hecho de que las plantas fijan el CO_2 , por fotosíntesis, durante el día, mientras que, las muestras atmosféricas se colectan durante todo el día y la noche, incluyendo el periodo en el que se presenta la respiración (Levin *et al.*, 1980). Se ha reportado que el CO_2 producto de la respiración, tanto autotrófica como heterotrófica, está enriquecida en ^{14}C con respecto a la atmósfera (Turnbull *et al.*, 2006; Levin *et al.*, 2008), explicando entonces la diferencia entre los registros generados a partir de plantas y los generados por la captura de CO_2 atmosférico.

5.3.2.1. Análisis con resolución anual

La concentración de radiocarbono ($\Delta^{14}\text{C}$) en anillos de árbol (especialmente en pinos y encinos de zonas con clima templado) permite reconstruir los niveles de ^{14}C atmosférico en sitios donde no se realizó un programa de monitoreo. Esto se debe a que la composición isotópica de carbono en los anillos de árbol depende de la composición isotópica del CO_2 asimilado durante el proceso de la fotosíntesis (Pawelczyk y Pazdur, 2004). Una ventaja importante en el monitoreo

de ^{14}C en anillos de especies de pino, es el hecho de que estas coníferas, tienen un periodo de crecimiento más largo que los árboles deciduos, es decir, son de mayor longevidad, lo que permite monitorear cambios en la concentración de ^{14}C en un periodo más largo (Rakowski *et al.*, 2001).

La información isotópica registrada en anillos de árboles proporciona información para la reconstrucción de la concentración de radiocarbono que había en el pasado y datos como éstos, también pueden ser usados para cálculos analíticos en la construcción de modelos que describan la relación entre los componentes de los combustibles fósiles y la composición isotópica de carbono, así como aquellos que describan el intercambio de carbono entre los diferentes reservorios y para determinar los tiempos de residencia del ^{14}C en la atmósfera (Rakowski *et al.*, 2001, 2005, 2008), así mismo, éste método proporciona un valioso monitor ambiental. Los registros a través de este tipo de muestras se obtienen con una resolución anual, lo que ha permitido llevar a cabo un monitoreo para la reconstrucción de la concentración de CO_2 derivado de combustibles fósiles en el periodo anterior al de los ensayos nucleares (pre-bomba), sin embargo, el monitoreo que se lleva a cabo es con una resolución anual.

Además, el monitoreo con resolución anual se puede hacer a partir de hojas de árboles. Por ejemplo, en Canadá se ha realizado a partir de hojas de maple (*Acer saccharinum*) (McNeely, 1994); y en Japón a partir de hojas del olmo de agua (*Zelkova serrata*) y roble oriental (*Quercus variabilis*) provenientes tanto de zonas urbanas como de zonas aisladas de emisiones de CO_2 fósil (Muraki *et al.*, 2001).

Sin embargo, tanto en la interpretación del monitoreo con anillos de crecimiento, como el de hojas se requiere conocer el periodo de desarrollo de la planta para explicar adecuadamente el nivel de ^{14}C registrado (Levin *et al.*, 1980).

Así mismo, los niveles de radiocarbono en plantas anuales como *Zea mays* se han utilizado para mapear los flujos de combustibles fósiles en el aire a escala regional y continental, proporcionando una prueba útil para modelos de transporte atmosférico y ayudando a estimar la distribución espacial de las fuentes y los sumideros de carbono (Hsueh *et al.*, 2007).

En comparación con el análisis de ^{14}C en CO_2 atmosférico, los árboles presentan la ventaja de proporcionar de manera eficiente un valor en el monitoreo de la concentración de $\Delta^{14}\text{C}$ atmosférico, debido a que se pueden muestrear con relativa facilidad. Esto ofrece una ventaja en términos de muestreo a gran escala en gradientes ambientales rurales y urbanos. También proporcionan una prueba única del efecto de las emisiones de los combustibles fósiles (Hsueh *et al.*, 2007).

5.3.2.2. Análisis con resolución sub-anual

En las plantas con un ciclo de vida corto o herbáceas no se acumula el carbono del CO_2 por varios años, sino que el carbono presente es el fijado de la atmósfera del pasado reciente, por ejemplo unas cuantas semanas, esto permite llegar a tener programas de monitoreo con una resolución mayor, hasta de semanas. Esto permite hacer diversos estudios relacionados con la cuantificación de emisiones

de CO₂ fósil y su distribución y dispersión en zonas amplias (Hsueh *et al.*, 2007). También, es posible utilizar al ¹⁴C como trazador para evaluar tiempos de residencia del C en estudios de ecosistemas (Levin y Hesshaimer, 2000). La otra ventaja que ofrecen las herbáceas es la posibilidad de monitorear el ¹⁴C atmosférico de manera confiable en lugares remotos en los que no se cuente con fuentes antropogénicas de CO₂.

Por otra parte, Lichtfouse *et al.* (2005) determinaron que los pastos perennes localizados en zonas urbanas presentan un fuerte agotamiento de ¹⁴C debido a la fijación del CO₂ derivado de las emisiones vehiculares y no por combustión orgánica, y que éstos llegan a almacenar hasta un 13% del carbono fósil.

5.4. Métodos de biomonitoreo

Las ciudades concentran grandes poblaciones, además de materiales y actividades diversas, por lo tanto, niveles altos de contaminación, que se traduce en gran impacto ambiental. Aunque la cuantificación de los contaminantes por métodos físico-químicos es de mucha importancia, no permite obtener conclusiones sobre los posibles efectos que las concentraciones de éstos llegan a tener sobre los seres vivos. Para ello, se utilizan los llamados biomonitores o bioindicadores, éstos complementan a dichos métodos físico-químicos, y aportan información sobre los efectos de la contaminación sobre los organismos.

Las plantas junto con otros organismos, responden de distintas maneras a estímulos externos como los contaminantes atmosféricos. Pueden ser utilizadas como indicadores o monitores de la actividad biológica de dichos contaminantes, ya que no solo son sensibles, sino también proporcionan respuestas características a contaminantes atmosféricos frecuentes. Los efectos producidos por la contaminación atmosférica se pueden manifestar por la alteración de diversos mecanismos vitales de las plantas. Así, las funciones metabólicas y los tejidos vegetales se pueden ver afectados como consecuencia de la acción de gases como el anhídrido sulfuroso, el monóxido de carbono y los compuestos de flúor. Los daños causados se manifiestan en forma de necrosis foliar en áreas localizadas que presentan un color marrón-rojizo-blanco, de clorosis, adquiriendo el tejido una coloración verde pálida o amarilla, o por la aparición de manchas puntuales necróticas. Si la acción del contaminante es muy fuerte puede llegar a paralizar el crecimiento de la planta.

En las últimas décadas han sido desarrollados diferentes métodos de bioindicación, biomonitoreo y bioensayo en laboratorio. Estos se han establecido como una herramienta rutinaria de diagnóstico, monitoreo y gestión en las entidades ambientales, tanto en países desarrollados como industrializados (Anze *et al.*, 2007).

El monitoreo ambiental con métodos biológicos tuvo su origen en Europa y datan de la década de los años 60's del siglo pasado, para este fin se utilizaron una gran variedad de organismos vegetales de diferentes taxa, en relación directa

con las propiedades químicas del contaminante a monitorear y con la forma (adsorción o absorción) de asimilarlo (Markert, 1993). Puesto que ciertos grupos de plantas responden de una determinada manera a las perturbaciones, pueden ser usadas para evidenciar y monitorear los procesos de la biosfera (Fontúrbel, 2002).

Los bioindicadores son organismos o comunidades que pueden responder a la contaminación ambiental a través de alteraciones en su fisiología o en su capacidad para acumular contaminantes. Estos miden los efectos de la contaminación en los seres vivos, por lo que, ofrecen información sobre los riesgos para otros organismos, ecosistemas y el hombre.

Por otro lado, los biomonitores son organismos, partes de organismos o una comunidad, que permiten “cuantificar” la calidad atmosférica mediante comparación de rangos o en relación con un nivel considerado de fondo (limpio). Así pues, el biomonitoreo es la utilización de biomonitores en series definidas de medición con la finalidad de evaluar la calidad del aire en un sitio determinado, para un contaminante específico o un grupo de ellos en una determinada zona. Cuando se utilizan especies que se encuentran presentes en los ecosistemas a evaluar, entonces se habla de un biomonitoreo pasivo. En cambio, cuando son especies que se introducen (transplantes) o se utilizan sistemas de exposición controlada se trata de un biomonitoreo activo (Anze *et al.*, 2007).

Se puede observar que el uso del término bioindicador o biomonitor, se basa exclusivamente en una diferencia cualitativa y cuantitativa (Markert, 1993), el uso de cada uno de ellos va a depender solo del objetivo que se pretenda alcanzar en el estudio. Por otra parte, ambos tienen ventajas, ya que son de bajo costo y fácil mantenimiento, además, permiten el monitoreo simultáneo de grandes áreas y representan el impacto del contaminante sobre un ser vivo o un sitio específico.

5.5. Biología de la especie

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Orden: Poales

Familia: Poaceae

Subfamilia: Panicoideae

Tribu: Paniceae

Género: *Stenotaphrum*

Especie: *S. secundatum* (Walter) Kuntze

El nombre correcto es *Stenotaphrum secundatum* y sus sinónimos son *Ischaemum secundatum*, *Stenotaphrum glabrum*, y *Stenotaphrum americanum*. Tiene diferentes nombres comunes: pasto de San Agustín, gramón, lastón, gramillón, grama catalana, grama americana, hierba de San Agustín, grama dulce, pasto colchón, pelope, zacate de San Agustín. Es una planta perenne, robusta, que forma céspedes de textura gruesa por sus hojas anchas. Es un pasto estolonífero y puede ser propagado por trasplante, brotes o esquejes, los últimos

son los más usados debido a que no existen muchos problemas para que se establezca rápidamente, sin embargo, el trasplante es exitoso siempre y cuando el sitio se prepare antes y se conserve después de la plantación. De manera natural alcanza una longitud de 12 a 15 cm, sin embargo, su altura total debe mantenerse entre 2.5 y 3.5 cm.

El culmo es glabro, ramificado, compreso, las ramas florales erectas de 10 a 30 cm de longitud; nudos prominentes, usualmente con 2 hojas subopuestas y 2 ramas erectas en cada nudo; plantas hermafroditas o polígamas. Vaina, glabra o con cilios dispersos en los márgenes; lígula, corta membrana ciliada; láminas, succulentas, glabras, planas, de coloración verde oscuro; menos de 15 cm de largo por 4 a 10 mm de ancho, lanceoladas con el ápice obtuso, nervio prominente en el envés.

Inflorescencia, espiga suberosa, aplanada, terminal y axilar, 5 a 10 cm de largo por 4 a 6 mm de ancho, con espiguillas, 3.5–5.2 mm de largo, embebidas en un lado de un raquis corchoso, con 2 flósculos lanceoloides u ovoides, agudas, no aristadas; con 1 a 3 espiguillas sésiles o subsésiles, la parte inferior con una ó 2 espiguillas generalmente no desarrolladas; desarticulándose tardíamente en los nudos del raquis. Gluma inferior pequeña y redondeada fuera del raquis, 0.5–1.6 mm de largo, obtusa, redondeada o truncada, generalmente enervia; gluma superior, larga como la lema del flósculo inferior, membranácea, marcadamente gibosa, ovada y aguda. Flósculo inferior estéril, estaminado o bisexual; lema inferior tan larga como la espiguilla, firme, aplanada en el envés; pálea inferior

rígida, aguda, gibosa, los márgenes delgados; Lema superior sin arista, con márgenes delgados y planos; pálea superior endurecida; lodículas 2; estambres 3, las anteras 2–2.5 mm de largo, café-amarillentas o purpúreas; estilos 2. Ovario generalmente glabro en el ápice. Cariopsis con embrión generalmente grande. Algunos clones estériles presentes. Se propaga vegetativamente debido a que sus semillas tienen un bajo porcentaje de germinación (Fagúndez y Barrada, 2007; Torres y Martínez, 1993).

5.5.1. Distribución, clima y suelos

Es nativa de las regiones tropicales y subtropicales del Viejo Mundo, del Mediterráneo y del Golfo de México. Ha sido introducida en regiones tropicales del mundo, por lo que su distribución actual es pantropical (Deputy *et al.*, 1998 y Fagúndez y Barrada, 2007). Se encuentra en diferentes hábitats, como ciudades, playas, lotes baldíos, orillas de carreteras, terrenos húmedos; se establecen principalmente a una altitud de 0 a 1300 m (Torres y Martínez, 1993).

Es una especie de clima cálido con baja resistencia o tolerancia a la sequía. Si se deja de regar, en cierto grado, durante los meses de mayor demanda hídrica puede presentar una difícil recuperación, incluso puede llegar a morir. Se adapta muy bien a zonas con inviernos templados de 5°C y tiende a resistir temperaturas altas en verano de 35°C, suele prosperar bien en zonas donde se reciben alrededor del 50% del total de luz solar; es tolerante a zonas con sombra moderada. No obstante, cuando se desarrolla bajo sombra densa, esta especie

crece ahiladamente, presenta clorosis y poca densidad poblacional. No tolera las heladas y deja de crecer adoptando una coloración marrón, por lo que su desarrollo óptimo se da entre los 20°C y 30°C. Debe recibir riego adicional en zonas donde la precipitación anual sea menor a 75 cm, o bien en regiones áridas como es el caso del norte de México. Se recomienda que la frecuencia promedio de riego sea entre 2 a 3 veces por semana, sin crear condiciones de encharcamiento.

De forma natural crece en suelos calcáreos o con alto contenido de sílice, cerca de la costa; cultivada se desarrolla en una gran variedad de suelos, desde arcillosos hasta ligeramente arenosos. Su crecimiento óptimo ocurre en suelos con pH de 6-8.5. El suelo debe contener un mínimo de 480 ppm de potasio y 150 ppm de fósforo para que se desarrolle un pasto de calidad (Deputy *et al.*, 1998). Es tolerante a la salinidad creciendo satisfactoriamente en suelos con niveles de salinidad cercanos a los 15 mhos.

5.5.2. Importancia

Es cultivada para céspedes de jardines y parques. Es utilizada en otros países como planta ornamental. Presenta un valor forrajero regular a bueno cuando la planta es joven debido a que en la madurez pierde palatabilidad, bajo condiciones de pastoreo. Es útil para conservar suelos y altamente resistente a distintos competidores naturales como pastos invasivos y hierba (Torres y Martínez, 1993).

VI. Material y métodos

Se realizó una comparación de los valores de ^{14}C registrados por *Stenotaphrum secundatum* con los obtenidos por un sistema de captura de CO_2 atmosférico para los mismos periodos y en la misma localidad. Se instalaron de manera simultánea dos sistemas, uno con el cultivo de *S. secundatum* y otro para capturar CO_2 atmosférico, las actividades de ambos sistemas se desarrollaron en tres etapas de manera simultánea.

6.1. Etapa de acondicionamiento de los sistemas

6.1.1. Sistema con *Stenotaphrum secundatum* bajo cultivo

El sistema donde se cultivó *Stenotaphrum secundatum* consistió en dos recipientes de plástico con un área de 1260.75 cm^2 cada uno, lo cual proporcionó un área total de 2521.5 cm^2 , se les agregaron 2.5 kg de una mezcla de “tierra orgánica plus ultra”, la cual contenía abono de borrego, tabaco en polvo y 35% de materia orgánica (M.O.), con N, P_2O_5 , K_2O , Cu, Fe, S, Ca, B, Mg, Mn y Zn. Por encima de ésta mezcla se colocó una capa de *S. secundatum* y después, sobre el pasto una luz de malla con abertura en hexágono de 1 pulgada (figura 4), de tal manera que la malla fuera el límite basal para realizar el corte del pasto.

El sistema se acondicionó al aire a temperatura ambiente, soleado y con riego asistido dos veces por semana, a un costado del Laboratorio Universitario de Radiocarbono, dentro de Ciudad Universitaria.

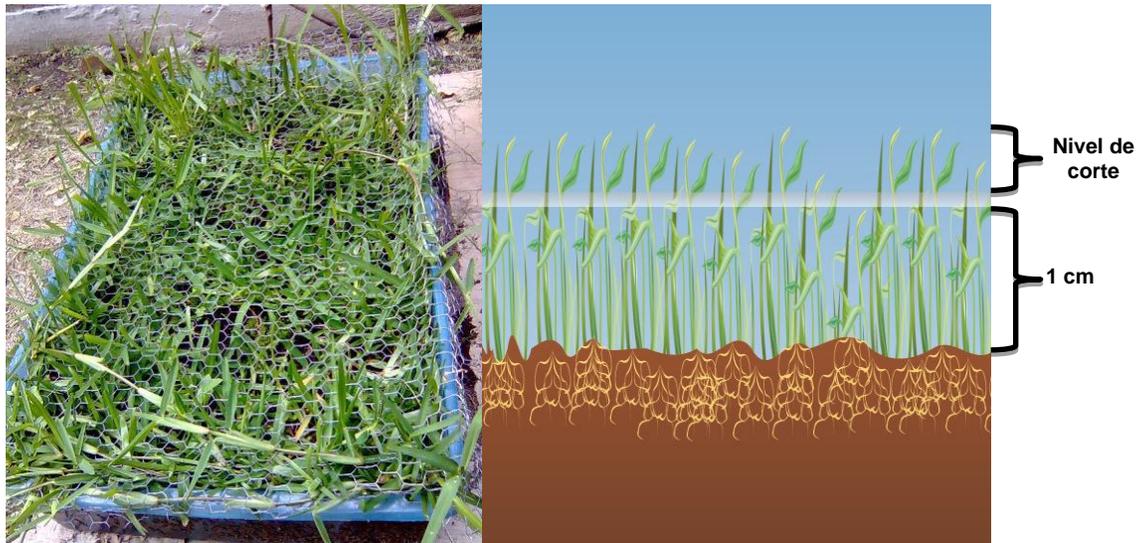
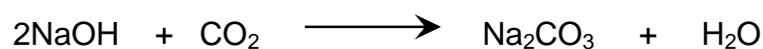


Figura 4. Representación del sistema de acondicionamiento para el cultivo y cosecha de *Stenotaphrum secundatum*.

6.1.2. Sistema de captura de CO₂ atmosférico

El sistema para la captura de CO₂ atmosférico consistió en una probeta de un litro conteniendo una solución 0.7M de hidróxido de sodio libre de carbonatos, por la que se bombeó aire a través de una bomba para pecera marca “Maxima” con un flujo de 1250 cm³/min y una válvula de control de flujo marca “Elite 178” abierta al 50%. El CO₂ fue capturado como carbonato de sodio como resultado de la reacción con el hidróxido de sodio (figura 5).



El dispositivo se colocó al aire libre, a un costado del sistema de cultivo de *Stenotaphrum secundatum*; y fue calibrado previamente en el Laboratorio Universitario de Radiocarbono UNAM.



Figura 5. Sistema de bombeo para la captura de CO₂ atmosférico con una solución 0.7M de NaOH libre de CO₃²⁻.

6.2. Etapa de Muestreo

6.2.1. Sistema con *Stenotaphrum secundatum* bajo cultivo

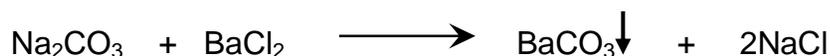
El muestreo de *Stenotaphrum secundatum* se realizó con una frecuencia mensual. La toma de muestra se hizo mediante la poda del pasto con tijeras de acero inoxidable, a cada hoja de pasto se le eliminó aproximadamente un centímetro del

ápice. Posteriormente, se lavó con agua destilada y se colocó en un horno de secado marca “Felisa” a una temperatura de 50 °C durante 72 horas, hasta peso seco, se separó aproximadamente un gramo para el análisis de ^{13}C y finalmente, se envolvió en papel aluminio, se etiquetó y almacenó hasta su análisis.

Para conocer la cantidad en gramos de pasto que se requeriría para su síntesis a benceno, se separó un gramo de muestra peso seco, la cual se molió en un molino marca “FRITSCH” y se envió al Laboratorio de Edafología Ambiental del Instituto de Geología para el análisis de carbono total, donde se analizó la muestra por duplicado utilizando un Analizador Elemental CHNS/O Perkin Elmer 2400 series II en modo CHN, posteriormente se determinó, de acuerdo al manual de operación TASK, que la cantidad de pasto requerida para obtener un mililitro de benceno es, aproximadamente de 2.0 a 2.5 gramos.

6.2.2. Sistema de captura de CO_2 atmosférico

La captura de CO_2 atmosférico se llevó a cabo durante periodos de 14 a 22 días, el carbonato se recuperó de la solución adicionando una solución 0.7M de cloruro de bario para precipitarlo como carbonato de bario, se filtró y posteriormente se puso a secar en un horno, marca “Felisa”, a una temperatura de 50°C por cuatro días, ya seca la muestra, se separó aproximadamente un gramo para el análisis de ^{13}C , finalmente la muestra se guardó en frasco de vidrio y se etiquetó para su análisis.



6.3. Etapa de Análisis

6.3.1. Síntesis de benceno

Previo al análisis de ^{14}C por Espectrometría de Centelleo Líquido, las muestras se transformaron a $^1\text{benceno}$ en un sintetizador de benceno marca TASK, en el Laboratorio Universitario de Radiocarbono (figura 6), mediante las siguientes reacciones, realizadas al vacío:



Figura 6. Sintetizador de benceno "Task".

- 35 -

¹ El disolvente de conteo ideal es el benceno, debido a su alto contenido de carbono (92%) proveniente exclusivamente de la muestra, es un buen disolvente de los centelleadores, tiene excelentes propiedades de transmisión de luz y transferencia de energía, y no se ha detectado contaminación radiactiva ni fraccionamiento isotópico durante su síntesis (González y Beramendi, 2005).

En el caso de las muestras de *Stenotaphrum secundatum* ya limpias y secas se pesaron en una balanza analítica marca “Ohaus” y se colocaron dentro del tubo de combustión del sintetizador donde se combustionó con oxígeno de alta pureza para generar dióxido de carbono.

Para las muestras de carbonato, entre 29 y 48 g de muestra seca se pesaron en una balanza analítica marca “Ohaus” y se colocaron dentro del matraz de reacción donde se realizó una oxidación adicionando una solución de ácido clorhídrico al 30% para generar dióxido de carbono mediante la siguiente reacción:



El CO₂ generado por ambos procesos se purifica pasando a través de tres trampas criogénicas sumergidas en hielo seco y nitrógeno líquido. Posteriormente, el CO₂ se hace reaccionar con Li fundido a una temperatura de 800°C produciendo carburo de litio, el cual una vez enfriado a temperatura ambiente, se hace reaccionar con agua destilada para formar acetileno mediante una hidrólisis. Finalmente, el acetileno se trimeriza con un catalizador de óxido de cromo al 0.15% para formar benceno, que es desorbido del catalizador a 100 °C y atrapado en una trampa criogénica con hielo seco. Todo el proceso de síntesis de benceno se realiza al vacío para evitar contaminación con CO₂ atmosférico (González y Beramendi, 2005).

El benceno obtenido a partir de ambos tipos de muestra se mezcló con 0.5 mL de centellador (0.5 g de PPO (2,5-difeniloxazol) + 0.02 g de POPOP (1,4-bis(5-

feniloxazol-2-il)benceno) en 100 g de benceno grado espectrofotométrico libre de ^{14}C) en viales de teflón con una capacidad de 3 mL.

6.3.2. Análisis de ^{13}C

Con el objetivo de poder corregir los datos de ^{14}C por el fraccionamiento isotópico de cada muestra, se determinó la composición isotópica de ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$). Una alícuota de cada muestra se envió al Laboratorio de Espectrometría de Masas de Isótopos Estables del Instituto de Geología. Estas fueron analizadas conforme al método de combustión tipo Dumas con Analizador Elemental e interfase acoplados a un Espectrómetro de Masas Delta Plus XL con una precisión de 0.2‰. Los valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ reportados están medidos y expresados relativos a la escala del estándar VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite).

6.3.3. Análisis de ^{14}C

El ^{14}C se determinó por Espectrometría de Centelleo Líquido en un Espectrómetro de ultra bajo nivel, modelo Wallac 1220 Quantulus, Perkin Elmer (figura 7) en el Laboratorio Universitario de Radiocarbono. De manera simultánea con la muestra se analizaron el estándar SRM4990C (ácido oxálico) y un blanco analítico (benceno grado espectrofotométrico libre de ^{14}C). Cada muestra se analizó por 2500 minutos distribuidos en 50 ciclos de 50 minutos cada uno, alternando estándar, blanco y muestra.



Figura 7. Espectrómetro de Centelleo Líquido.

Para obtener $\Delta^{14}\text{C}$ y $F^{14}\text{C}$, el cálculo de los datos obtenidos del espectrómetro fueron realizados de acuerdo a Stuiver y Polach (1977). Estos datos se encuentran en unidades de Conteos por Minuto (CPM), para la muestra y el estándar y el blanco, por lo que, para llevar a cabo dicho cálculo, primero se deben referir los CPM respectivamente a los gramos de carbono presentes en cada vial:

$$\text{CPM}_{\text{muestra}}/\text{gramos}_{\text{muestra}}$$

$$\text{CPM}_{\text{estandar}}/\text{gramos}_{\text{estandar}}$$

$$\text{CPM}_{\text{blanco}}/\text{gramos}_{\text{blanco}}$$

Posteriormente, se hizo una corrección con el blanco, el cual monitorea las señales de fondo durante el proceso de análisis, mediante la resta del blanco a la muestra y al estándar:

$$A_S = \left(\frac{CPM_{muestra}}{gramos_{muestra}} \right) - \left(\frac{CPM_{blanco}}{gramos_{blanco}} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$A_O = \left(\frac{CPM_{estandar}}{gramos_{estandar}} \right) - \left(\frac{CPM_{blanco}}{gramos_{blanco}} \right) \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

A_S es la actividad de la muestra, A_O es la actividad del estándar y CPM conteos por minuto.

Después, las actividades se corrigieron por fraccionamiento isotópico, éste se refiere al cambio en la composición isotópica de carbono durante el proceso de asimilación de carbono por la muestra. Debido a que el fraccionamiento del ^{14}C es el doble del de ^{13}C , este factor se calculó determinando la $\delta^{13}\text{C}$ y aplicando la ecuación 3. Por convención, el fraccionamiento isotópico del ^{13}C en todas las muestras, independientemente de su origen, deben ser normalizadas a -25 ‰, el cual es el valor postulado para muestras de madera y carbón recientes (Stuiver y Polach, 1977):

$$A_{SN} = A_S \left(1 - \frac{2(25 + \delta^{13}\text{C})}{1000} \right) \dots\dots\dots (3)$$

Así mismo, la actividad normalizada del estándar A_{ON} se determinó como sigue:

$$A_{ON} = A_o \left(1 - \frac{2(25 + (-17.8))}{1000} \right) (0.7459) \dots\dots\dots (4)$$

Donde -17.8 es el valor de $\delta^{13}\text{C}$ del estándar de ácido oxálico y 0.7459 es el factor de ajuste de la actividad de ^{14}C del estándar de ácido oxálico referente a la cantidad de ^{14}C atmosférico correspondiente a 1950.

Con los resultados del cálculo anterior se obtuvo la fracción de carbono moderno ($F^{14}\text{C}$) en la muestra con respecto al estándar de la siguiente forma:

$$F^{14}\text{C} = \frac{A_{SN}}{A_{ON}} \dots\dots\dots (5)$$

Por otra parte, se calculó el $\Delta^{14}\text{C}$ de la muestra con respecto al estándar, sin embargo, se requirió hacer el cálculo de la actividad absoluta del estándar (A_{ABS}), ya que la actividad normalizada del estándar (A_{ON}) depende del año de muestreo (y) el cual ha sido corregido por decaimiento entre 1950 y el año (y) actual, dado por:

$$A_{ABS} = A_{ON} e^{\lambda(y-1950)} \dots\dots\dots (6)$$

Donde:

λ es la constante de decaimiento de ^{14}C , cuyo valor es: $\frac{1}{8267} \text{año}^{-1}$

y es el año en que se analizó la muestra

Por lo que, para calcular $\Delta^{14}\text{C}$ se tiene:

$$\Delta^{14}\text{C} = \left(\frac{A_{SN}}{A_{ABS}} - 1 \right) 1000 \quad \dots\dots\dots (7)$$

VII. Resultados y discusión

7.1. Acondicionamiento del sistema de *Stenotaphrum secundatum*

El sistema de *Stenotaphrum secundatum* respondió adecuadamente a las condiciones en que se estableció (figura 8) y del cual se obtuvo una primera muestra. En el transcurso de su restablecimiento, posterior a la toma de la primera muestra, se presentó el periodo de contingencia sanitaria por la influenza AH1N1, con duración de 10 días (del 23 de abril al 7 de mayo de 2009), lo cual impidió mantener el riego asistido; aunado a esto, las condiciones ambientales fueron extremas en cuanto a temperatura y precipitación pluvial. La temperatura máxima promedio para los meses de abril y mayo de 2009 en el Distrito Federal fue de 27.6 y 26.9 °C, respectivamente y hubo precipitación pluvial de 0.1–5 mm únicamente los días 26 y 27 de abril y 4 de mayo (SMN, 2010). Esto afectó el restablecimiento de la especie mostrando un grado de marchites, sin embargo, se logró obtener una muestra de tamaño suficiente para la síntesis de benceno que cubriera el periodo correspondiente a un mes.

Para el siguiente periodo se observó más afectación en el restablecimiento de la especie, mostró un mayor grado de marchites, por lo que se decidió dejar restablecer por más tiempo hasta que se lograra obtener muestras de tamaño adecuado para la síntesis de benceno, sin volver a afectar su crecimiento. El restablecimiento se dio después de un lapso de tres meses, y a partir de ese momento se volvió a muestrear con una frecuencia mensual. A pesar de que la

cantidad de muestra ya no era la misma que al principio, se lograron obtener cantidades suficientes de biomasa.



Figura 8. Establecimiento de *Stenotaphrum secundatum*.

De acuerdo con las condiciones ambientales que se presentan en la Ciudad de México; región subtropical con clima templado, temperaturas por encima de los 20°C, y con una intensa radiación solar todo el año (Velasco *et al.*, 2005), *Stenotaphrum secundatum* se podría considerar como un modelo estable y reproducible, ya que esta especie se desarrolla ampliamente en regiones subtropicales, a temperaturas entre los 20 y 30°C. Sin embargo, como menciona Deputy *et al.* (1998), esta especie de clima cálido no es de las que más resistencia o tolerancia presenta a la sequía, pues si se deja de regar, en cierto grado, durante los meses de mayor demanda hídrica, puede presentar una difícil recuperación, incluso, registrar un elevado porcentaje de mortandad, similar a lo observado durante el desarrollo experimental, debido al periodo de contingencia sanitaria, el cual impidió el mantenimiento de las condiciones del sistema.

7.2. Muestreo del sistema de *Stenotaphrum secundatum*

En el cuadro 1 se presentan los resultados del muestreo que se llevó a cabo con *Stenotaphrum secundatum* y en la cual se observa que el periodo mínimo de muestreo fue de 28 días, mientras que, el periodo máximo de 70 días, que refleja el periodo posterior a la contingencia sanitaria por la influenza AH1N1. Por otro lado, se registró el peso de las muestras obtenidas, que oscilaron entre 3 y 5 g peso seco; así como las observaciones del periodo.

Cuadro 1. Muestreo de *Stenotaphrum secundatum* con el periodo, el peso de la muestra y las observaciones del periodo para cada una de ellas.

Muestra	Periodo	Resolución (días)	Peso (g)	Observaciones
UNAM-09-41	23/03/09-20/04/09	28	3.188	Semana santa (4-12 abril)
UNAM-09-48	20/04/09-26/05/09	36	2.5948	Contingencia por la Influenza AH1N1(23 abril - 7 mayo) Pasto muy seco
UNAM-09-61	26/05/09-04/08/09	70	5.132	Vacaciones de verano (4 - 26 julio)
UNAM-09-69	04/08/09-01/09/09	28	4.277	Empezó el semestre (10 de agosto)
UNAM-09-71	01/09/09-05/10/09	34	5.0875	Festejo del 15 de septiembre
UNAM-09-76	05/10/09-04/11/09	30	3.617	Precontingencia ambiental por PM ₁₀ del 3 al 5 de noviembre
UNAM-09-81	04/11/09-09/12/09	35	3.2457	Precontingencia ambiental por PM ₁₀ del 3 al 5 de noviembre

A pesar de la contingencia sanitaria, se tuvo un periodo en el que la cantidad de muestra obtenida fue menor (aproximadamente un 60% en la muestra UNAM-09-48), para los siguientes periodos de muestreo se obtuvieron cantidades del mismo orden que en el primer muestreo, indicando que la especie se logró recuperar una vez que se reinició el riego asistido e inició la temporada de lluvias en la Ciudad de México. También, se determinó la periodicidad del crecimiento de *Stenotaphrum secundatum* que comprendió tres etapas: *i*) establecimiento del pasto, que fue de dos meses (coincide con el inicio de ciclo biológico de *S. secundatum*), *ii*) estabilidad en la acumulación de biomasa, que osciló entre 4 y 5 g en un tiempo transcurrido de tres meses, y *iii*) depresión o latencia (Figura 9).

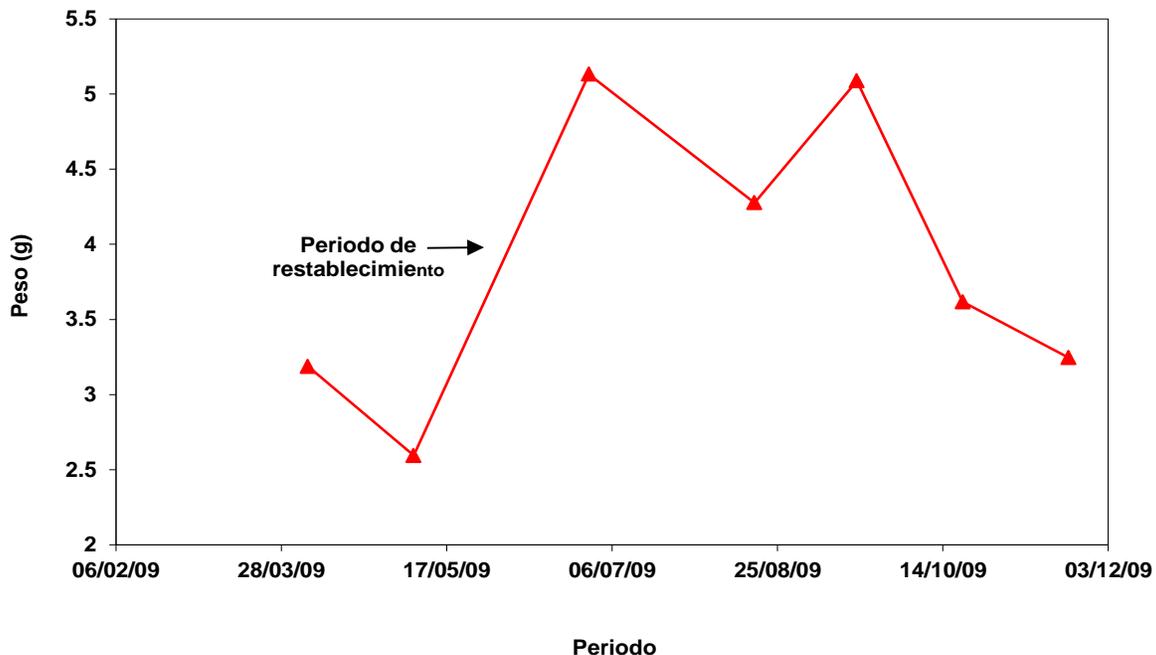


Figura 9. Representación de la etapa de recuperación del pasto a partir de los diferentes tiempos de corte.

7.3. Muestreo del sistema de captura de CO₂ atmosférico

Con el fin de evaluar los valores de ¹⁴C registrados por la especie estudiada, se capturó CO₂ atmosférico como carbonato de sodio, que posteriormente se recuperó como carbonato de bario, para el análisis de ¹⁴C (cuadro 2).

Se puede observar que el periodo mínimo de muestreo fue de 11 y el máximo de 22 días respectivamente, debido al periodo de contingencia sanitaria por la influenza AH1N1.

Cuadro 2. Resultados del muestreo de CO₂ atmosférico con el periodo, peso de la muestra y las observaciones para cada una de ellas.

Muestra	Periodo	Resolución (días)	Peso (gramos de BaCO ₃)	Observaciones
UNAM-09-34	06/03/09-23/03/09	17	47.6174	
UNAM-09-36	23/03/09-03/04/09	11	29.749	
UNAM-09-37	03/04/09-20/04/09	17	48.87	Semana santa (4 – 12 abril)
UNAM-09-38	20/04/09-12/05/09	22	46.677	Contingencia por la Influenza AH1N1 (23 abril - 7 mayo) captura por 3 semanas
UNAM-09-49	12/05/09-26/05/09	14	33.6763	Primera muestra después de la contingencia por la Influenza AH1N1
UNAM-09-50	26/05/09-09/06/09	14	37.8137	

Cuadro 2 (Continuación)

UNAM-09-51	09/06/09-23/06/09	14	34.8491	
UNAM-09-55	23/06/09-07/07/09	14	35.894	Primeros días de las vacaciones de verano (4 - 26 julio)
UNAM-09-56	07/07/09-21/07/09	14	32.815	Vacaciones de verano (4 - 26 julio)
UNAM-09-60	21/07/09-04/08/09	14	34.9685	Últimos días de las vacaciones de verano (4 - 26 julio)
UNAM-09-65	04/08/09-18/08/09	14	32.8452	Empezó el semestre (10 de agosto)
UNAM-09-68	18/08/09-01/09/09	14	37.6067	
UNAM-09-70	01/09/09-21/09/09	20	48.4407	Festejo de la Independencia (15 septiembre)
UNAM-09-72	21/09/09-05/10/09	14	37.5341	
UNAM-09-74	05/10/09-19/10/09	14	35.2988	
UNAM-09-75	19/10/09-04/11/09	16	37.2442	Precontingencia ambiental por PM ₁₀ del 3 al 5 de noviembre
UNAM-09-79	04/11/09-18/11/09	14	32.5	Precontingencia ambiental por PM ₁₀ del 3 al 5 de noviembre
UNAM-09-80	18/11/09-09/12/09	21	49.2076	

Cabe destacar que la variación en el peso de la muestra (en g de BaCO₃), que osciló entre 29 y 48 g, se debió a la diferencia en el número de días de captura del CO₂; los cuales variaron entre 17 y 21 días, si se considera que el bombeo fue

aproximadamente constante (alrededor de $1250 \text{ cm}^3/\text{min}$), la cantidad promedio de BaCO_3 obtenida fue de $2.51 \pm 0.2 \text{ g/día}$. La variación de la cantidad de muestra obtenida por día de bombeo puede ser resultado de pérdida de muestra durante la recuperación de la misma, pues se realizó mediante precipitación con BaCl_2 y filtración, y no de manera cuantitativa, aunque también puede atribuirse a cambios en la concentración de CO_2 atmosférico.

7.4. F^{14}C y $\Delta^{14}\text{C}$ en las muestras de *Stenotaphrum secundatum* y de CO_2 atmosférico

Las muestras de benceno sintetizado a partir de *Stenotaphrum secundatum* y de CO_2 atmosférico (recuperado como BaCO_3) se analizaron en el equipo de Espectrometría de Centelleo Líquido (ECL), simultáneamente con el estándar SRM4990C (ácido oxálico) y un blanco analítico (benceno grado espectrofotométrico libre de ^{14}C) para determinar su actividad de ^{14}C . Como se detalló en la metodología, cada muestra se analizó por 2500 minutos distribuidos en 50 ciclos de 50 minutos cada uno, alternando estándar, blanco y muestra.

El cuadro 3 contiene el periodo de muestreo de CO_2 atmosférico y de *Stenotaphrum secundatum*, la fecha de análisis de cada muestra, los gramos de benceno después de su análisis, los Conteos por Minuto (CPM) de la muestra, el estándar y el blanco, los cuales son datos registrados por el espectrómetro; así como el resultado de la composición de ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$), dato obtenido del Laboratorio

de Espectrometría de Masas de Isótopos Estables del Instituto de Geología, el cual nos permite calcular el factor de corrección por el fraccionamiento isotópico de cada muestra. Con esta información y las ecuaciones detalladas en la sección 3.3 del capítulo de Materiales y Métodos, se calculó la actividad de ^{14}C para cada una de las muestras.

Cuadro 3. Resultados del análisis de ^{14}C en las muestras de CO_2 atmosférico y *Stenotaphrum secundatum*.

Muestra	Tipo de muestra	Periodo de muestreo	Fecha análisis	Gramos de benceno (g)	CPM	Error CPM	CPM/g de benceno	CPM - Bkg	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Factor $\delta^{13}\text{C}$	Actividad
UNAM-08-18A	SRM 4990C	-	09/06/2009	1.4410	15.144	0.078	10.5091	10.35999	-17.8	0.9856	7.6162
UNAM-08-35	Blanco	-	-	1.4289	0.213	0.009	0.1491	0.00000	-	-	-
UNAM-09-41	<i>Stenotaphrum secundatum</i>	23/03/09 - 20/04/09	09/06/2009	0.9101	7.528	0.055	8.2719	8.12281	-13.6	0.9772	7.9376
UNAM-08-18A	SRM 4990C	-	16/07/2009	1.4418	16.063	0.081	11.1408	10.9888	-17.8	0.9856	8.0785
UNAM-08-35	Blanco	-	-	1.4209	0.216	0.009	0.1520	0.0000	-	-	-
UNAM-09-38	CO_2 atmosférico	20/04/09 - 12/05/09	16/07/2009	1.4608	12.422	0.071	8.5037	8.3516	-14.45	0.9789	8.1754
UNAM-09-48	<i>S. secundatum</i>	20/04/09 - 26/05/09	16/07/2009	0.6759	5.633	0.048	8.3338	8.1818	-13.6	0.9772	7.9952
UNAM-09-62	SRM 4990C	-	25/08/2009	1.3447	15.091	0.075	11.2226	11.0682	-17.8	0.9856	8.1369
UNAM-09-63	Blanco	-	-	1.3667	0.211	0.009	0.1544	0.0000	-	-	-
UNAM-09-49	CO_2 atmosférico	12/05/09 - 26/05/09	25/08/2009	1.0531	9.128	0.058	8.6678	8.5134	-14.73	0.9795	8.3385
UNAM-09-50	CO_2 atmosférico	26/05/09 - 09/06/09	25/08/2009	1.3323	11.608	0.065	8.7125	8.5581	-13.82	0.9776	8.3667
UNAM-09-62	SRM 4990C	-	07/09/2009	1.3414	16.163	0.077	12.0497	11.8762	-17.8	0.9856	8.7309
UNAM-09-63	Blanco	-	-	1.3716	0.238	0.009	0.1735	0.0000	-	-	-
UNAM-09-51	CO_2 atmosférico	09/06/09 - 23/06/09	07/09/2009	1.0784	10.118	0.061	9.3824	9.2089	-12.29	0.9746	8.9748
UNAM-09-55	CO_2 atmosférico	23/06/09 - 07/07/09	07/09/2009	1.3793	12.888	0.069	9.3439	9.1703	-14.02	0.9780	8.9690
UNAM-09-61	<i>S. secundatum</i>	26/05/09 - 04/08/09	07/09/2009	1.9511	17.676	0.081	9.0595	8.8860	-14.08	0.9782	8.6919
UNAM-09-62	SRM 4990C	-	12/10/2009	1.3502	13.959	0.076	10.3388	10.2180	-17.8	0.9856	7.5119
UNAM-09-63	Blanco de preparación	-	-	1.3744	0.166	0.008	0.1208	0.0000	-	-	-
UNAM-09-56	CO_2 atmosférico	07/07/09 - 21/07/09	12/10/2009	1.1865	10.031	0.065	8.4540	8.3333	-13.06	0.9761	8.1343
UNAM-09-60	CO_2 atmosférico	21/07/09 - 04/08/09	12/10/2009	1.2894	10.906	0.067	8.4581	8.3374	-13.36	0.9767	8.1433
UNAM-09-62	SRM 4990C	-	06/11/2009	1.3427	15.091	0.078	11.2393	11.0890	-17.8	0.9856	8.1522
UNAM-09-63	Blanco de preparación	-	-	1.3642	0.205	0.009	0.1503	0.0000	-	-	-
UNAM-09-36	CO_2 atmosférico	23/03/09 - 03/04/09	06/11/2009	1.1406	9.886	0.063	8.6674	8.5171	-15.2	0.9804	8.3502
UNAM-09-65	CO_2 atmosférico	04/08/09 - 18/08/09	06/11/2009	1.2362	10.898	0.066	8.8157	8.6655	-13.85	0.9777	8.4722
UNAM-09-68	CO_2 atmosférico	18/08/09 - 01/09/09	06/11/2009	1.2025	10.493	0.065	8.7260	8.5757	-13.62	0.9772	8.3805
UNAM-09-77	SRM 4990C	-	26/11/2009	1.4865	17.433	0.084	11.7275	11.5270	-17.8	0.9856	8.4742
UNAM-09-78	Blanco de preparación	-	-	1.4110	0.2830	0.011	0.2006	0.0000	-	-	-
UNAM-09-69	<i>S. secundatum</i>	04/08/09 - 01/09/09	26/11/2009	1.2701	11.951	0.070	9.4095	9.2089	-13.12	0.9762	8.9901
UNAM-09-34	CO_2 atmosférico	06/03/09 - 23/03/09	26/11/2009	1.4050	13.247	0.073	9.4285	9.2279	-13	0.9760	9.0064
UNAM-09-37	CO_2 atmosférico	03/04/09 - 20/04/09	26/11/2009	1.5050	13.661	0.074	9.0773	8.8767	-13.84	0.9777	8.6786

CPM: Conteos por minuto
 Bkg: Blanco

Cuadro 3. (Continuación).

UNAM-09-77	SRM 4990C	-	25/01/2010	1.4780	15.8870	0.0800	10.7491	10.5834	-17.8	0.9856	7.7805
UNAM-09-78	Blanco de preparación	-	-	1.4064	0.2330	0.0100	0.1657	0.0000	-	-	-
UNAM-09-70	CO ₂ atmosférico	01/09/09 - 21/09/09	25/01/2010	1.4153	8.4520	0.0590	5.9719	5.8063	-14.03	0.9781	5.6789
UNAM-09-77	SRM 4990C	-	02/02/2010	1.4772	16.508	0.0870	11.1751	10.9966	-17.8	0.9856	8.0842
UNAM-09-78	Blanco de preparación	-	-	1.4058	0.2510	0.0110	0.1785	0.0000	-	-	-
UNAM-09-71	<i>Stenotaphrum secundatum</i>	01/09/09 - 05/10/09	02/02/2010	0.4006	3.2890	0.0390	8.2097	8.0312	-13.15	0.9763	7.8409
UNAM-09-72	CO ₂ atmosférico	21/09/09 - 05/10/09	02/02/2010	1.2034	10.0970	0.0700	8.3901	8.2116	-14.51	0.9790	8.0393
UNAM-09-77	SRM 4990C	-	19/02/2010	1.4749	16.8810	0.0830	11.4454	11.2623	-17.8	0.9856	8.2796
UNAM-09-78	Blanco de preparación	-	-	1.4037	0.2570	0.0100	0.1831	0.0000	-	-	-
UNAM-09-74	CO ₂ atmosférico	05/10/09 - 19/10/09	19/02/2010	1.2508	10.7470	0.0660	8.5923	8.4092	-14.08	0.9782	8.2256
UNAM-09-75	CO ₂ atmosférico	19/10/09 - 04/11/09	19/02/2010	0.9729	8.0590	0.0570	8.2837	8.1006	-13.73	0.9775	7.9180
UNAM-08-18A	SRM 4990C	-	17/10/2010	1.4325	14.539	0.0770	10.1494	10.0193	-17.8	0.9856	7.3658
UNAM-08-35	Blanco de preparación	-	-	1.3533	0.176	0.0090	0.1301	0.0000	-	-	-
UNAM-09-76	<i>S. secundatum</i>	05/10/09 - 04/11/09	17/10/2010	0.2227	1.613	0.0260	7.2422	7.1121	-13.27	0.9765	6.9453
UNAM-09-80	CO ₂ atmosférico	18/11/09 - 09/12/09	17/10/2010	0.6201	4.638	0.0444	7.4794	7.3494	-13.88	0.9778	7.1859
UNAM-08-18A	SRM 4990C	-	25/10/2010	1.4314	15.572	0.072	10.8788	10.7232	-17.8	0.9856	7.8832
UNAM-08-35	Blanco de preparación	-	-	1.3431	0.209	0.008	0.1556	0.0000	-	-	-
UNAM-09-81	<i>S. secundatum</i>	04/11/09 - 09/12/09	25/10/2010	1.0298	8.675	0.054	8.4236	8.2680	-13.67	0.9773	8.0807
UNAM-08-18A	SRM 4990C	-	03/11/2010	1.4308	15.433	0.075	10.7863	10.6247	-17.8	0.9856	7.8109
UNAM-08-35	Blanco de preparación	-	-	1.3370	0.216	0.009	0.1616	0.0000	-	-	-
UNAM-09-79	CO ₂ atmosférico	04/11/09 - 18/11/09	03/11/2010	1.3761	11.218	0.064	8.1520	7.9905	-14.49	0.9790	7.8225

En el cuadro 4 se muestran los resultados obtenidos de la fracción de carbono atmosférico moderno ($F^{14}C$) en las muestras con respecto al estándar, así como los valores de $\Delta^{14}C$, calculados a partir de los datos de la Tabla 3 utilizando las ecuaciones 5 y 7, respectivamente (sección 3.3 de Materiales y Métodos). En las figuras 10 y 11 se presentan los resultados de $F^{14}C$ y de $\Delta^{14}C$ de manera gráfica con el fin de comparar los valores registrados por *Stenotaphrum secundatum* con los registrados por el CO_2 atmosférico.

Cuadro 4. Resultados de $\Delta^{14}C$ y $F^{14}C$ para las muestras de CO_2 atmosférico y *Stenotaphrum secundatum*.

Muestra	Tipo de muestra	$F^{14}C$	Error $F^{14}C$	Año de lectura	$\Delta^{14}C$ (‰)
UNAM-08-18A	SRM 4990C	-	-	2009	-
UNAM-08-35	Blanco	-	-	2009	-
UNAM-09-41	<i>Stenotaphrum secundatum</i>	1.04219	0.002218	2009	34.7830
UNAM-08-18A	SRM 4990C	-	-	2009	-
UNAM-08-35	Blanco	-	-	2009	-
UNAM-09-38	CO_2 atmosférico	1.01200	0.002273	2009	4.8020
UNAM-09-48	<i>S. secundatum</i>	0.98969	0.002212	2009	-17.3464
UNAM-09-62	SRM 4990C	-	-	2009	-
UNAM-09-63	Blanco	-	-	2009	-
UNAM-09-49	CO_2 atmosférico	1.02478	0.002215	2009	17.4955
UNAM-09-50	CO_2 atmosférico	1.02825	0.002235	2009	20.9359
UNAM-09-62	SRM 4990C	-	-	2009	-
UNAM-09-63	Blanco	-	-	2009	-
UNAM-09-51	CO_2 atmosférico	1.02794	0.002230	2009	20.6276
UNAM-09-55	CO_2 atmosférico	1.02727	0.002253	2009	19.9635
UNAM-09-61	<i>S. secundatum</i>	0.99554	0.002293	2009	-11.5435
UNAM-09-62	SRM 4990C	-	-	2009	-
UNAM-09-63	Blanco de preparación	-	-	2009	-
UNAM-09-56	CO_2 atmosférico	1.08285	0.002238	2009	75.1502
UNAM-09-60	CO_2 atmosférico	1.08405	0.002243	2009	76.3407
UNAM-09-62	SRM 4990C	-	-	2009	-
UNAM-09-63	Blanco de preparación	-	-	2009	-
UNAM-09-36	CO_2 atmosférico	1.02429	0.002239	2009	17.0027
UNAM-09-65	CO_2 atmosférico	1.03926	0.002248	2009	31.8681
UNAM-09-68	CO_2 atmosférico	1.02801	0.002245	2009	20.7018
UNAM-09-77	SRM 4990C	-	-	2009	-
UNAM-09-78	Blanco de preparación	-	-	2009	-
UNAM-09-69	<i>S. secundatum</i>	1.06089	0.002282	2009	53.3427

Cuadro 4. (Continuación).

UNAM-09-34	CO ₂ atmosférico	1.06281	0.002291	2009	55.2536
UNAM-09-37	CO ₂ atmosférico	1.02412	0.002295	2009	16.8384
UNAM-09-77	SRM 4990C	-	-	2010	-
UNAM-09-78	Blanco de preparación	-	-	2010	-
UNAM-09-70	CO ₂ atmosférico	0.72988	0.002278	2010	-275.3935
UNAM-09-77	SRM 4990C	-	-	2010	-
UNAM-09-78	Blanco de preparación	-	-	2010	-
UNAM-09-71	<i>Stenotaphrum secundatum</i>	0.96990	0.002222	2010	-37.1182
UNAM-09-72	CO ₂ atmosférico	0.99444	0.002312	2010	-12.7470
UNAM-09-77	SRM 4990C	-	-	2010	-
UNAM-09-78	Blanco de preparación	-	-	2010	-
UNAM-09-74	CO ₂ atmosférico	0.99348	0.002282	2010	-13.7076
UNAM-09-75	CO ₂ atmosférico	0.95633	0.002241	2010	-50.5882
UNAM-08-18A	SRM 4990C	-	-	2010	-
UNAM-08-35	Blanco de preparación	-	-	2010	-
UNAM-09-76	<i>S. secundatum</i>	0.94291	0.002161	2010	-63.9119
UNAM-09-80	CO ₂ atmosférico	0.97558	0.002190	2010	-31.4748
UNAM-08-18A	SRM 4990C	-	-	2010	-
UNAM-08-35	Blanco de preparación	-	-	2010	-
UNAM-09-81	<i>S. secundatum</i>	1.02504	0.002195	2010	17.6296
UNAM-08-18A	SRM 4990C	-	-	2010	-
UNAM-08-35	Blanco de preparación	-	-	2010	-
UNAM-09-79	CO ₂ atmosférico	1.00149	0.002232	2010	-5.7510

Los valores de F¹⁴C para las muestras de *Stenotaphrum secundatum* fluctúan de 0.9429 a 1.0609, mientras que, para las muestras de CO₂ atmosférico los valores están entre 0.7299 y 1.0841. En la Figura 10 se puede observar que hay correspondencia entre los valores registrados por ambos tipos de muestra, con una diferencia promedio entre ambos de únicamente 0.015‰. Sin embargo, en general los valores registrados por *S. secundatum* están por debajo de los valores registrados por las muestras derivadas de CO₂ atmosférico para los periodos correspondientes, excepto para las muestras UNAM-0941, UNAM-0969 y UNAM-0981. El que los valores registrados por *S. secundatum* sean ligeramente más

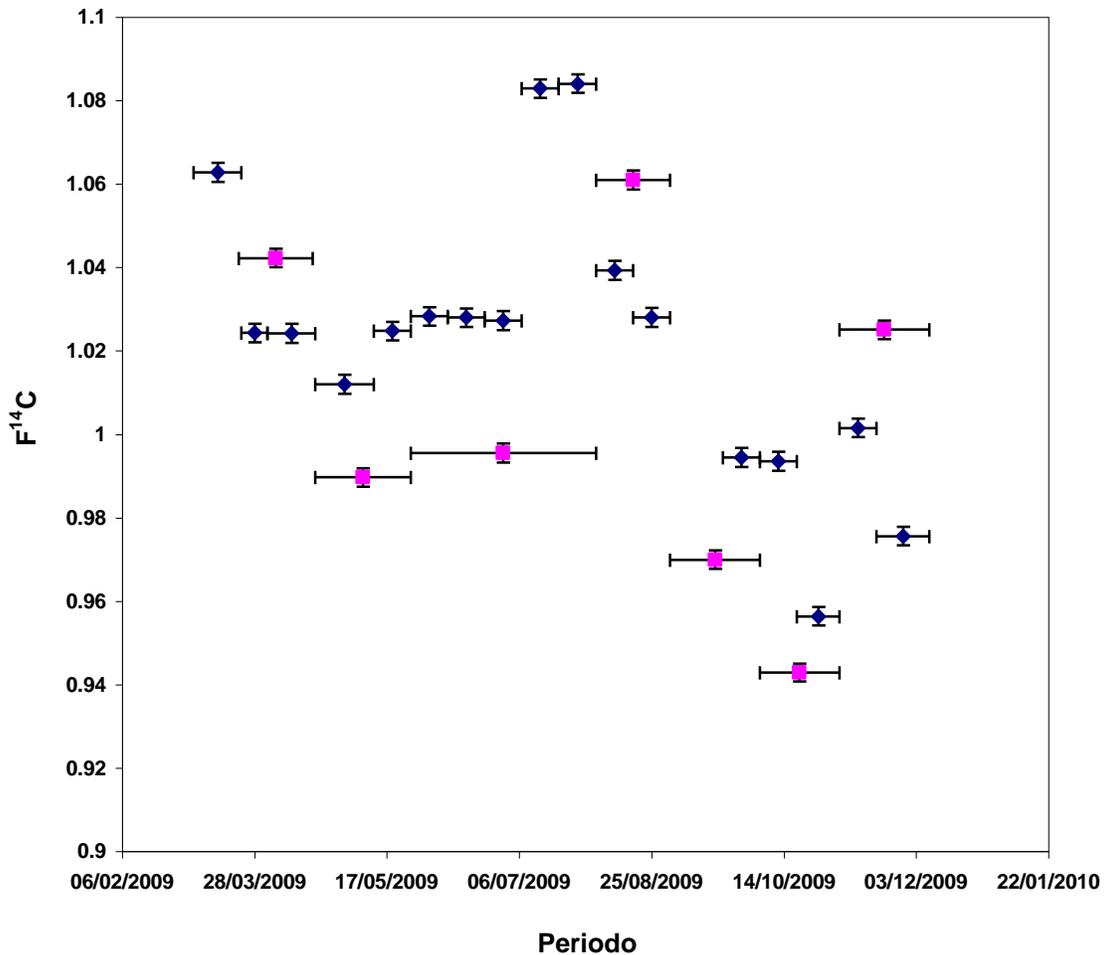


Figura 10. Comparación entre los valores de ¹⁴C (F¹⁴C) para las muestras de CO₂ atmosférico (rombos) y *Stenotaphrum secundatum* (cuadros). Las barras horizontales representan el periodo de muestreo y el símbolo está localizado en el día correspondiente al punto medio de cada periodo de muestreo.

bajos, probablemente se debe a que en el muestreo con el sistema de bombeo se capta tanto el CO₂ de día como el de la noche (respiración de las plantas) mientras que, con el de *S. secundatum* se capta solamente el CO₂ de día (fotosíntesis). Se ha indicado que la respiración heterotrófica tiene valores de ¹⁴C por encima del valor promedio de ¹⁴C atmosférico, enriqueciendo ligeramente la atmósfera local durante la noche debido a que la materia orgánica en descomposición tiene una alta concentración de ¹⁴C porque contiene carbono fijado durante los años en que la actividad de este radioisótopo en la atmósfera se

incrementó al 200% derivado de las pruebas nucleares (Turnbull *et al.*, 2006; Levin *et al.*, 2008, Rakowski *et al.*, 2005).

Por el contrario, las tres muestras de *Stenotaphrum secundatum* que presentan valores de ^{14}C por encima de los registrados por las muestras de CO_2 correspondientes, podrían indicar que dichas muestras aún reflejan el ^{14}C fijado durante el periodo de muestreo anterior, pues para las muestras UNAM-0941 y UNAM-0969 justamente coincide con que el CO_2 atmosférico del periodo anterior registró valores altos de $F^{14}\text{C}$. De cualquier manera, como ya se mencionó, la diferencia entre ambos tipos de muestras no es significativa y hay buena correspondencia entre las variaciones de $F^{14}\text{C}$ registradas. De acuerdo a lo anterior, *S. secundatum* refleja la composición isotópica del CO_2 atmosférico del sitio en el que se desarrolla, por lo que, podría funcionar como un biomonitor de ^{14}C tanto para zonas urbanas como rurales, permitiendo llevar registros con resoluciones mensuales y podría ser también un parámetro para estudiar el almacenaje de carbono fósil en la vegetación.

Con el fin de poder comparar los resultados de ^{14}C encontrados en este estudio con los reportados para otros sitios, se transformaron a la escala de $\Delta^{14}\text{C}$ (figura 11) considerando el año de análisis, con lo que se corrige el pequeño decaimiento de ^{14}C que ocurrió entre el momento en que la muestra fijó el ^{14}C y el momento del análisis. Los valores de $\Delta^{14}\text{C}$ obtenidos para *Stenotaphrum secundatum* presentan un rango de -63.91‰ a 53.34‰, lo que da como resultado

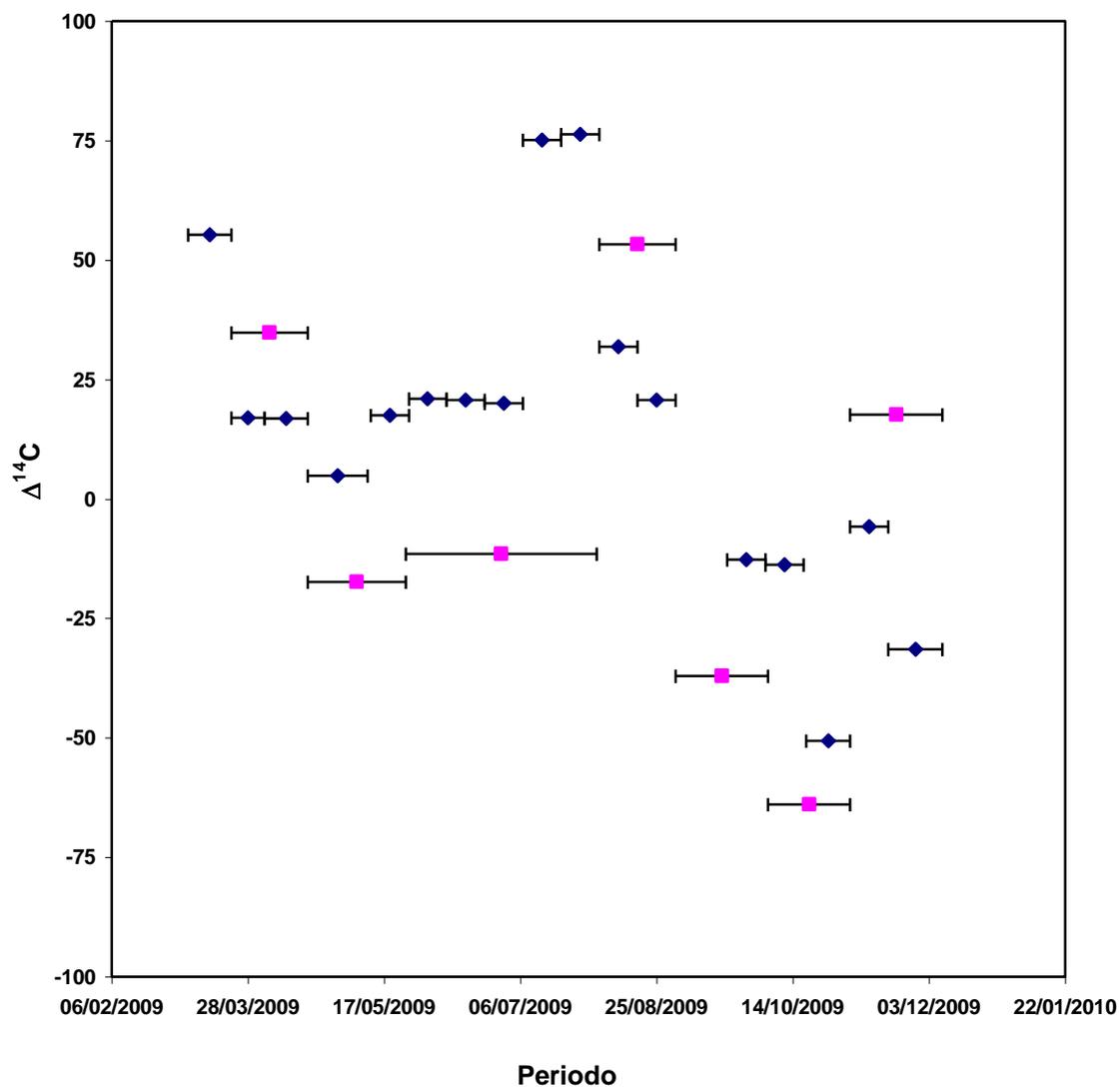


Figura 11. Comparación entre los valores de $\Delta^{14}\text{C}$ en CO_2 atmosférico (rombos) y *Stenotaphrum secundatum* (cuadros). Las barras horizontales representan el periodo de muestreo y el símbolo está localizado en el día correspondiente al punto medio de cada periodo de muestreo.

una variación de 117.25%, mientras que, para las muestras de CO_2 atmosférico el rango fue de -50.59²% a 76.34% con una variación de 126.93%.

² En la tabla cuatro se muestra que el valor más bajo es de -275.3935% para las muestras de CO_2 atmosférico, sin embargo, por ser un valor fuera del promedio con respecto a los otros valores obtenidos, se le considera como un valor anómalo, el cual se pudo haber debido a un error analítico, por lo que, no se consideró para el análisis de los resultados.

El registro más cercano con el que se pueden comparar los valores de $\Delta^{14}\text{C}$ es el realizado en la estación de monitoreo Niwot Ridge en Colorado, Estados Unidos de Norteamérica, ubicada a 3,500 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) y considerada como una zona limpia, alejada de fuentes antropogénicas de CO_2 (Turnbull et al., 2007; 2008). Los valores de $\Delta^{14}\text{C}$ reportados para este sitio durante el 2009 varían entre 47 y 39‰ (datos tomados de: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/iadv/>).

Los datos obtenidos para Ciudad Universitaria en el muestreo realizado en este trabajo tienen diferencias significativas con los registrados para Niwot Ridge, Colorado, EUA. Para la mayoría de las muestras, tanto de *Stenotaphrum secundatum* como de CO_2 atmosférico, los valores de $\Delta^{14}\text{C}$ son menores, reflejando las altas emisiones de CO_2 derivado de los combustibles fósiles, lo que tiene como consecuencia la dilución de ^{14}C atmosférico (Efecto "Suess"). Sin embargo, hay muestras, tanto de *S. secundatum* (UNAM-0969, $\Delta^{14}\text{C}=53.34\text{‰}$) como de CO_2 atmosférico (UNAM-0934, UNAM-0956, UNAM-0960, con valores de $\Delta^{14}\text{C}$ de 55.25, 75.15 y 76.34‰, respectivamente), con valores mayores a los reportados para Niwot Ridge, Colorado, EUA. Este resultado es en cierta medida inesperado, pues debido a que en la Ciudad de México se queman una gran cantidad de combustibles fósiles, se esperaba que todos los valores de ^{14}C estuviesen por debajo de los valores reportados para una zona limpia (valores de fondo).

No es la primera vez que se obtienen para el Valle de México valores de $\Delta^{14}\text{C}$ por encima de los valores de fondo; Vay et al. (2009) reportaron, en un estudio con muestras de CO_2 tomadas en el Valle de México y sus alrededores durante la campaña MILAGRO en marzo de 2006, un valor promedio de $\Delta^{14}\text{C}$ de $72\pm 26\text{‰}$, con un 76% de los valores por encima de los valores registrados en Niwot Ridge para ese mismo año (promedio de $57\pm 2\text{‰}$), a pesar de las emisiones de combustibles fósiles en uno de los ambientes con mayores emisiones contaminantes del mundo. Determinaron que presumiblemente esto se debe a diferentes fuentes de emisión de CO_2 , algunas enriquecidas con ^{14}C , tales como: la quema de biomasa como combustible, la quema de desechos peligrosos y la incineración de desechos médicos, e incluso la producción de $^{14}\text{CO}_2$ de los reactores en la Planta Nuclear Laguna Verde, localizada en Veracruz.

Por otro lado, Hsueh *et al.* (2007) obtuvieron para un sitio no contaminado cerca de Tapalpa, Jalisco, México, un valor de ^{14}C en julio de 2004 de 64.6‰ , mientras que, el valor correspondiente para ese mismo periodo registrado en Niwot Ridge fue de 65.3‰ , esto indica una diferencia menor al 1‰ , validando que se utilice al monitoreo de Niwot Ridge como los valores de referencia para zonas limpias en América del Norte.

Como parte del seguimiento de este tipo de estudios, sería recomendable hacer un análisis de las posibles influencias que tendrían dichas fuentes, pues la Ciudad de México tiene grandes emisiones derivadas de la quema de

combustibles fósiles, por sus altas densidades de tráfico, consumo de energía, procesos industriales y elevados niveles de combustión de biomasa, quema de basura y el uso doméstico e industrial de combustibles.

VIII. Conclusiones y recomendaciones

- Se determinaron las condiciones experimentales necesarias para el cultivo de *Stenotaphrum secundatum*.
- Se determinó experimentalmente la cantidad de biomasa requerida para el experimento, aunque se recomienda duplicar el área (2, 521.5 cm²) de cultivo a fin de soslayar las contingencias ambientales y garantizar la estabilidad del diseño experimental.
- Se determinó que, tanto las muestras de CO₂ atmosférico y de *Stenotaphrum secundatum* tienen un mismo patrón de variación.
- *Stenotaphrum secundatum* tiene potencial como biomonitor para evaluar el ¹⁴C en el CO₂ atmosférico con la posibilidad de aplicarse a los agostaderos o ecosistemas con sucesión secundaria.
- El diseño experimental permite evaluar el almacenaje de carbono fósil en la vegetación, para llevar a cabo estudios de inventario de emisiones de CO₂ con una resolución temporal de un mes.
- *Stenotaphrum secundatum* puede establecerse como un modelo biológico adecuado para el monitoreo de ¹⁴C.

- Se recomienda analizar una parcela “problema” y una zona limpia “testigo” para evaluar los niveles de CO₂ derivado de los combustibles fósiles (Efecto “Suess”).
- El diseño experimental permite evaluar las emisiones de CO₂ fósil en zonas urbanas como la Ciudad de México, así como las fuentes de enriquecimiento de ¹⁴C.
- El diseño experimental permite evaluar las emisiones de CO₂ fósil en zonas urbanas como la Ciudad de México, así como las fuentes de enriquecimiento de ¹⁴C. Se recomienda llevar a cabo la evaluación con especies nativas del lugar de monitoreo de la familia Poaceae, que no requieran de riego asistido, garantizando su desarrollo y la generación de biomasa adecuada para el monitoreo. Así mismo, al utilizar una especie nativa y no introducida, se evitarían posibles afectaciones al ecosistema.

IX. Referencias

- Alessio, M., S. Anselmi, L. Conforto, S. Improta, F. Manes y L. Manfra. 2002. Radiocarbon as a biomarker of urban pollution in leaves of evergreen species sampled in Rome and in rural areas (Lazio-Central Italy), *Atmospheric Environment* **36**: 5405-5416.
- Anze, R., M. Franken, M. Zeballo, M.R. Pinto, G. Zeballos, M.A. Cuadros, A. Canseco, A. De la Rocha, V.H. Estellano y S. Del Granado. 2007. Bioindicadores en la detección de la contaminación atmosférica en Bolivia. *Revista Virtual REDESMA*, pp. 54-74.
- Barrette, L., P. Lasalle, Y. Martel y C. Samson. 1980. Variations of ^{14}C in oats Brown from 1957 to 1978 in Quebec. *Radiocarbon* **22**: 410-414.
- Beramendi, L.E., G. Gonzalez, J. Villanueva, F.J. Santos, I. Gomez, E. Cienfuegos, P. Morales, J. Urrutia. 2010. Modern radiocarbon levels for northwestern Mexico derived from tree rings – A comparison with Northern Hemisphere zones 2 and 3 curves. *Radiocarbon* **52**: 907-914.
- Chakraborty, S., K. Dutta, A. Bhattacharyya, M. Nigam, E. Schuur y S. Shah. 2008. Atmospheric ^{14}C variability recorded in tree rings from Peninsular India: Implications for fossil fuel CO_2 emission and atmospheric transport. *Radiocarbon* **50**: 321-330.
- Deputy, J., D. Hensley y J. Tavares. 1998. St. Augustinegrass. *College of Tropical Agriculture and Human Resources. University of Hawaii at Mānoa. Honolulu*, pp.1-2.

- Dai, K. y C. Fan. 1986. Bomb produced ^{14}C content in tree rings grown at different latitudes. *Radiocarbon* **28**: 346-349.
- Fagúndez, J. y M. Barrada. 2007. Plantas invasoras de Galicia, Biología, distribución e métodos de control. Consellería de Medio Ambiente. Xunta de Galicia, pp. 144-146.
- Fontúrbel, F.R. 2002. Especies de plantas de valor científico específico. *Ciencia Abierta* **19**: pp. 1-10.
- Fritz, P. y J.Ch. Fontes. 1980. *Handbook of environmental isotope geochemistry*. Elsevier. Ámsterdam.
- González Hernández, G. y L.E. Beramendi. 2005. LUR. A un año de su creación. Serie: Infraestructura científica y desarrollo tecnológico 5, Instituto de Geofísica, UNAM México, D.F.
- Hsueh, D.Y., N.Y. Krakauer, J.T. Randerson, X. Xu, S.E. Trumbore y J.R. Southon. 2007. Regional patterns of radiocarbon and fossil fuel-derived CO_2 in surface air across North America. *Geophysical Research Letters* **34**: 1-6.
- Hua, Q. y M. Barbetti. 2004. Review of tropospheric bomb ^{14}C data for carbon cycle modeling and age calibration purposes. *Radiocarbon* **46**: 1273-1298.
- Hua, Q. 2009. Radiocarbon: A chronological tool for the recent past. *Quaternary Geochronology* **4**: 378-390.
- Krajcar-Bronić, I., N. Horvatinčić y B. Obelić. 1998. Two decades of environmental isotope records in Croatia: Reconstruction of the past and prediction of future levels. *Radiocarbon* **40**(1):399-416.

- Kuc. T., K. Rozanski, M. Zimnoch, J.M. Necki y A. Korus. 2003. Anthropogenic emissions of CO₂ and CH₄ in an urban environment. *Applied energy* **75**: 193-203.
- Levin, I., K.O. Münnich y W. Weiss. 1980. The effect of anthropogenic CO₂ and ¹⁴C sources on the distribution of ¹⁴C in the atmosphere. *Radiocarbon* **22**: 379-391.
- Levin, I., J. Schuchard, B. Kromer y K.O. Münnich. 1989. The Continental European Suess effect. *Radiocarbon* **31**: 431-440.
- Levin, I. y V. Hesshaimer. 2000. Radiocarbon – A unique tracer of global carbon cycle dynamics. *Radiocarbon* **42**: 69-80.
- Levin, I. y B. Kromer. 2004. The tropospheric ¹⁴CO₂ level in mid-latitudes of the northern hemisphere (1959-2003). *Radiocarbon* **46**:1261-1272.
- Levin, I., S. Hammer, B. Kromer y F. Meinhardt. 2008. Radiocarbon observations in atmospheric CO₂: determining fossil fuel CO₂ over Europe using Jungfraujoch observations as background. *Science of the Total Environment* **391**: 211–6.
- Lichtfouse, E., M. Lichtfouse, M. Kashgarian y R. Bol. 2005. ¹⁴C of grasses as an indicator of fossil fuel CO₂ pollution. *Environmental Chemistry Letters* **3**: 78-81.
- Markert, B. 1993. *Plants as biomonitors: Indicators for heavy metals in the terrestrial environment*. Verlagsgesellschaft. Weinheim. Baden-Württemberg, pp. 3-20.
- McNeely, R. 1994. Long-term environmental monitoring of ¹⁴C levels in the Ottawa region. *Environment International* **20**: 675-679.

- Meijer, H.A.J., H.M. Smid, E. Perez y M.G. Keizer. 1996. Isotopic characterization of anthropogenic CO₂ emissions using isotopic and radiocarbon analysis. *Physics Chemical Earth* **21**: 483-487.
- Mook, W.G. 2000. *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Principles and Applications*. IAEA. Viena. Austria. Vol. 1, Capítulo 3, pp. 31-34.
- Muraki, Y., K. Masuda, K. Arslanov, H. Toyozumi, M. Kato, Y. Naruse, T. Murata y T. Nishiyama. 2001. Measurement of radiocarbon content in leaves from some Japanese sites. *Radiocarbon* **43**: 695-702.
- Nydal, R. y K. Lövsæth. 1983. Tracing Bomb ¹⁴C in the Atmosphere 1962-1980. *Journal of Geophysical Research* **88**: 3621-3642.
- Nydal, R. y K. Lövsæth. 1996. Carbon-14 measurement in atmospheric CO₂ from Northern and Southern Hemisphere sites, 1962–1993. Oak Ridge, Tennessee, USA: Carbon Dioxide Information Analysis Center–World Data Center-A for Atmospheric Trace Gases. (<http://cdiac.ornl.gov/epubs/ndp/ndp057/ndp057.htm>).
- Olsson, I.U. 2009. Radiocarbon dating history: early days, questions, and problems met. *Radiocarbon* 51 (1):1-43.
- Pataki, D. E., D.R. Browling y J.R. Ehleringer. 2003. Seasonal cycle of carbon dioxide and its isotopic composition in an urban atmosphere: Anthropogenic and biogenic effects. *Journal of Geophysical Research* **108**: 1-8.
- Pawelczyk, S. y A. Pazdur. 2004. Carbon isotopic composition of tree rings as a tool for biomonitoring CO₂ level. *Radiocarbon* **46**: 701-719.

- Pazdur, A., T. Nadamura, S. Pawelczyk, J. Pawlyta, N. Piotrowska, A. Rakowski, B. Sensula y M. Szczepanek. 2007. Carbon isotopes in tree rings: Climate and the Suess effect inferences in the last 400 years. *Radiocarbon* **49**: 775-788.
- Povinec, P., M. Chudy y A. Šivo. 1986. Anthropogenic radiocarbon: past, present, and future. *Radiocarbon* 28: 668-672.
- Quarta, G., G.A. Rizzo, M. D'Elia y L. Calcagnile. 2007. Spatial and temporal reconstruction of the dispersion of anthropogenic fossil CO₂ by ¹⁴C AMS measurements of plant material. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **259**: 421-425.
- Rakowski, A., S. Pawelczyk y A. Pazdur. 2001. Changes of ¹⁴C concentration in modern trees from Upper Silesia region, Poland. *Radiocarbon* **43**: 679-689.
- Rakowski, A., T. Kuc, T. Nakamura y A. Pazdur. 2004. Radiocarbon concentration in the atmosphere and modern tree rings in the Krakow area, southern Poland. *Radiocarbon* **46**: 911-916.
- Rakowski, A., T. Kuc, T. Nakamura y A. Pazdur. 2005. Radiocarbon concentration in urban area. *Geochronometria* **24**: 63-68.
- Rakowski, A., T. Nakamura y A. Pazdur. 2008. Variations of anthropogenic CO₂ in urban area deduced by radiocarbon concentration in modern tree rings. *Journal of Environmental Radioactivity* **99**: 1558–1565.
- Stuiver, M. y H.A. Polach. 1977. Discussion reporting of ¹⁴C data. *Radiocarbon* **19**: 355-363.
- Tauber, H. 1967. Copenhagen radiocarbon measurements VIII geographic variations in atmospheric C¹⁴ activity. *Radiocarbon* **9**: 246-256.

- Tollefson, J. 2010. Greenhouse-gas numbers up in the air. *Nature* **465**: 18-19.
- Torres, J.A. y D. Martínez. 1993. Descripción de gramíneas en plantaciones cítricas de Martínez de la Torre, Veracruz. Colección: Cuadernos Universitarios. Serie: Agronomía, No. 25. Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo.
- Turnbull J.C., J.B. Miller, S.J. Lehman, P.P. Tans, R.J. Sparks y J. Southon. 2006. Comparison of $^{14}\text{CO}_2$, CO, and SF_6 as tracers for recently added fossil fuel CO_2 in the atmosphere and implications for biological CO_2 exchange. *Geophysical Research Letters* **33**: 1-5.
- Turnbull, J.C., S.J. Lehman, J.B. Miller, R.J. Sparks, J.R. Southon y P.P. Tans. 2007. A new high precision $^{14}\text{CO}_2$ time series for North American continental air. *Journal Geophysical Research* **112**: 1-10.
- Turnbull, J.C., S.J. Lehman, J.B. Miller y P.P. Tans. 2008. University of Colorado, Institute of Alpine and Arctic Research (INSTAAR), Radiocarbon Composition of Atmospheric Carbon Dioxide ($^{14}\text{CO}_2$) from the NOAA ESRL Carbon Cycle Cooperative Global Air Sampling Network, 2003-2007, Version: 2008-10-24, Path: <ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2c14/flask/event/>.
- Vay, S.A., S.C. Tyler, Y. Choi, D.R. Blake, N.J. Blake, G.W. Sachse, G.S. Diskin y H.B. Singh. 2009. Sources and transport of $\Delta^{14}\text{C}$ in CO_2 within the Mexico City Basin and vicinity. *Atmospheric Chemistry and Physics* **9**: 4973-4985.
- Velasco, E., S. Pressley, E. Allwine, H. Westberg y B. Lamb. 2005. Measurements of CO_2 fluxes from the Mexico City urban landscape. *Atmospheric Environment* **39**: 7433-7446.

X. Referencias electrónicas

Historia y ciencia [en línea]. *El Radiocarbono o ^{14}C* [Madrid, España]: Ediciones Digitales SLU, 2008 [Consulta 10 septiembre 2009] <<http://blogs.hoy.es/historiayciencia/2008/9/17/el-radiocarbono-o-c14>>.

Instituto de Geología [en línea]. “*Determinación de edades por carbono 14*” [UNAM, México] Laboratorio Universitario de Radiocarbono-LUR, 2008, [Consulta 03 noviembre 2009] <www.geologia.unam.mx/igl/deptos/geoq/lur/>.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). [en línea]. “Fourth Assessment Report on Climate Change 2007: Synthesis Report” Organización de las Naciones Unidas, 2007, Valencia, [Consulta octubre 2009] <<http://www.ipcc.ch/meetings/ar4-workshops-express-meetings/uncertainty-guidance-note.pdf>>.

NOAA Earth System Research Laboratory [en línea] [Consulta 16 marzo 2011] <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/iadv/>>.

Servicio Meteorológico Nacional [en línea] [Consulta 24 noviembre 2010] <smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&128&Itemid=77>.