



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE LA FERTIRRIGACIÓN CARBÓNICA
EN CÍTRICOS**

TESIS DOCTORAL

Autor: José Vicente Tarazona Díez

Director de Tesis: Francisco Rovira Más

Valencia, Noviembre de 2015

ÍNDICE

RESUMEN.....	4
RESUM	5
ABSTRAT	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	8
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. Objetivos.....	10
1.2. Justificación.....	10
1.3. Marco normativo.....	12
1.3.1. Antecedentes.....	12
1.3.2. Protocolo de Kioto.....	14
1.3.3. La Directiva 20 20 20.....	15
1.4. El papel de la agricultura en la mitigación del cambio climático.....	19
1.4.1. La agricultura como sumidero de dióxido de carbono.....	19
1.4.2. La fertirrigación carbónica.....	20
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
2.1. Parcelas de ensayos.....	29
2.2. Sistema de riego y cabezal de inyección de CO₂.....	31
2.3. Diseño de Experimentos.....	33
2.4. Estimación de la concentración de dióxido de carbono ambiental.....	37
2.5. Medición de área foliar.....	41
2.6. Medición del pH.....	46
2.7. Análisis y control de floración.....	51
2.8. Mediciones en frutos.....	52
2.9. Métodos Analíticos empleados en el análisis de suelos.....	54
2.10. Métodos Analíticos empleados en el análisis de hojas.....	55
CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
3.1. Planteamiento Estadístico.....	56
3.2. Análisis e Interferencia de CO₂ ambiental.....	58
3.3. Medición de área foliar.....	60
3.4. Estudio de Alteración de floración.....	65
3.4.1. Campaña 2011.....	65
3.4.2. Campaña 2012.....	66
3.4.3. Campaña 2013.....	67
3.5. Análisis de frutos.....	72
3.6. Análisis de los efectos del CO₂ sobre el suelo.....	82

3.6.1. Evolución del pH en el suelo.....	82
3.6.2. Conductividad Eléctrica.....	84
3.6.3. Cationes: Ca ⁺² y Mg ⁺²	86
3.6.4. Nitrógeno y Fósforo.....	89
3.6.5. Potasio.....	93
3.6.6. Cloruros.....	95
3.6.7. Materia Orgánica Oxidable y Carbono Orgánico.....	97
3.7. Análisis del efecto sobre las hojas.....	108
3.7.1. Nitrógeno.....	108
3.7.2. Fósforo.....	110
3.7.3. Potasio.....	112
3.7.4. Calcio.....	114
3.7.5. Magnesio.....	116
3.7.6. Sodio.....	118
3.7.7. Manganeso.....	120
3.7.8. Cinc.....	122
3.7.9. Cobre.....	124
3.7.10. Boro.....	126
3.7.11. Molibdeno.....	128
3.7.12. Aluminio.....	130
3.7.13. Hierro.....	132
3.8. Análisis del agua de Riego.....	139
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	140
BIBLIOGRAFÍA.....	144

RESUMEN

Este trabajo de investigación constituye una primera aproximación al estudio de viabilidad de la fertirrigación carbónica en cítricos como potencial sumidero de CO₂. A tal efecto, se llevaron a cabo experimentos de fertirrigación carbónica con cítricos de la variedad Nadarcott desde el año 2010 hasta el año 2015. El estudio requirió la monitorización de parámetros relacionados con la superficie foliar, los estados fenológicos de los árboles, el suelo, las hojas y los frutos de los árboles ensayados.

El análisis de los resultados obtenidos mostró que no había diferencias significativas en el tamaño y calidad de los frutos regados con CO₂. Tampoco se observaron diferencias en el desarrollo vegetativo de los árboles ni en el avance o retraso de la floración y formación de los frutos. Los análisis de los suelos revelaron que el contenido en materia orgánica de los suelos regados con CO₂ era más alto que los suelos tomados como referencia en al menos dos décimas porcentuales.

De la misma manera, se observó que el contenido en hierro en las hojas de los árboles regados con CO₂ era significativamente más alto que en los árboles tomados como referencia. Los análisis estadísticos realizados confirmaron estas conclusiones, observándose un incremento del 24% sobre el valor promedio en el caso de la materia orgánica del suelo y del 16% en el caso del contenido en hierro de las hojas. Ambos factores indican que la fertirrigación carbónica sí que tiene repercusiones agronómicas relevantes, especialmente sobre la fracción orgánica del suelo y sobre la fracción soluble de hierro.

Diversos autores confirman la movilización del hierro producido por la disminución del pH del agua de riego; este estudio confirma este hecho y refuerza la utilización del dióxido de carbono como potencial sustituto de los ácidos fuertes normalmente utilizados para este cometido. El aumento en el contenido de materia orgánica del suelo es un resultado especialmente interesante, pues no era esperado pese a que algunos autores han relacionado la disminución de la respiración edáfica con diferentes prácticas culturales que mejoran la textura del suelo. La interacción entre el CO₂ del agua de riego y el contenido en materia orgánica del suelo y, por tanto, la respiración edáfica deben de ser estudiados con más detalle, en un futuro con experiencias especialmente dirigidas a valorar las repercusiones de esta práctica sobre ambos parámetros.

Palabras Clave: Fertirrigación; riego con CO₂; fertilización en cítricos; reducción del CO₂; calentamiento global; cambio climático; agricultura sostenible; disolución de carbono inorgánico; agua carbonatada.

RESUM

Aquest treball d'investigació constitueix una primera aproximació a l'estudi de la viabilitat de la fertirrigació carbònica en cítrics com a potencial embornal de carboni. Amb aquesta finalitat es dugueren a terme experiments de fertirrigació carbònica amb cítrics de la varietat Nadorcott des de l'any 2010 fins l'any 2015. L'estudi va requerir la monitoratge de paràmetres relacionats amb la superfície foliar, els estat fenològics del arbres, el sòl, les fulles i el fruits dels arbres assatjats.

L'anàlisi dels resultats obtinguts mostrà que no hi havia diferències significatives en el tamany i qualitat del fruits regats amb CO₂. Tampoc es varen observar diferències en el desenvolupament vegetatiu dels arbres ni en l'avanç o retard de la floració i formació dels fruits. Les anàlisis dels sòls revelaren que el contingut de matèria orgànica dels sòls regats amb CO₂ era més alt que els sòls considerats com a referència en, almenys, dues dècimes percentuals.

De la mateixa manera, s'observà que el contingut de ferro en les fulles dels arbres regats amb CO₂ era significativament més alt que en els arbres referència. Les anàlisis estadístiques realitzades confirmaren aquestes conclusions, observant-se un increment del 24% sobre el valor mitjà en el cas de la matèria orgànica del sòl i del 16% en el cas del contingut en ferro de les fulles. Tots dos factors indiquen que la fertirrigació carbònica sí que té repercussions agronòmiques rellevants, especialment, sobre la fracció orgànica del sòl i la fracció soluble de ferro.

Diferents autors confirmen la mobilització del ferro produït per la disminució del pH de l'aigua de reg; aquest estudi confirma aquest fet i reforça l'ús del diòxid de carboni com a potencial substitut dels àcids forts normalment gastats per a aquesta tasca. L'augment en el contingut de matèria orgànica del sòl és un resultat especialment interessant, ja que no era esperat, malgrat que alguns autors han relacionat la disminució de la respiració edàfica amb diferents pràctiques culturals que milloren la textura del sòl. La interacció entre el CO₂ de l'aigua de reg i el contingut en matèria orgànica del sòl i, per tant, la respiració edàfica han de ser estudiats amb més detall en un futur amb experiències especialment dirigides a valorar les repercussions d'aquesta pràctica sobre tots dos paràmetres.

Paraules Clau: Fertirrigació; reg amb CO₂; Fertilització en cítrics; reducció del CO₂; escalfament global; canvi climàtic; agricultura sostenible; dissolució de carbó inorgànic; aigua carbonatada.

ABSTRAT

This research work constitutes a first approximation to the study of the viability of carbonic fertirrigation in citrus fruits as a CO₂ drain potential. To that effect, carbonic fertirrigation experiments were carried out with citrus fruits of the Nadarcott variety from the year 2010 to the year 2015. The study required the monitoring of parameters related to the leaf surface, the phenological state of the trees, the ground, the leaves and the fruits of the tested trees.

The analysis of the results obtained showed there were no significant differences in the size and quality of the fruits irrigated with CO₂. Differences were neither observed in the trees' vegetative development nor in the advance or delay of the blooming and formation of fruits. The analysis of the grounds revealed that the content in organic matter of the grounds irrigated with CO₂ was higher than in the grounds used as reference in at least two tenths of a percentage.

Similarly, it was noted that the content in iron in the leaves of the trees irrigated with CO₂ was significantly higher than in the trees used as reference. The statistical analysis carried out confirmed these conclusions, noting a 24% increase over the average value in the case of the organic matter in the ground and of a 16% in the case of the iron content in the leaves. Both factors indicate that carbonic fertirrigation does have relevant agronomic repercussions, especially on the organic fraction of the ground and on the iron soluble fraction.

Various authors confirm the mobilization of the iron produced by the decrease in the pH of the irrigation water; this study confirms this fact and strengthens the usage of carbon dioxide as a potential substitute of strong acids normally used for this purpose. The increase in the content of the ground's organic matter is an especially interesting result, as it was not expected, even though some authors have related the decrease of soil respiration to different cultural practices that improve the ground's texture. The interaction between the CO₂ of the irrigation water and the content in organic matter in the ground and, therefore, soil respiration must be studied in further detail in a future, with experiences specially aimed at valuing the repercussions of this practice on both parameters.

Key Words: Fertigation; carbonic irrigation; citrus fertilization; CO₂ reduction; global warming; climate change; sustainable farming; dissolved inorganic carbon; carbonated water.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de estudios sobre fertilización carbónica ambiental realizados en diversos cultivos, concentraciones utilizadas y efectos observados.....	25
Tabla 2. Calendario de análisis y medidas realizadas a lo largo de la experiencia.....	34
Tabla 3. Parámetros estimados en los análisis de agua de riego.	35
Tabla 4. Propiedades medidas en los análisis de suelos.	35
Tabla 5. Elementos extraídos en análisis foliares.	36
Tabla 6. Medidas efectuadas sobre los frutos.....	36
Tabla 7. Especificaciones técnicas del sensor de medida de CO ₂	37
Tabla 8. Especificaciones técnicas del medidor de área foliar Li-Cor LI 3100.	41
Tabla 9. Especificaciones técnicas del peachímetro PCE – PH 22.	47
Tabla 10. Cálculo de la concentración de CO ₂ en el agua de riego.....	49
Tabla 11. Medición de CO ₂ al aire libre.	58
Tabla 12. Medidas de área foliar.	61
Tabla 13. Resumen del estudio de la alteración de la floración.....	71
Tabla 14. Medias de Contenido en azúcares durante el ensayo (°Brix).....	79
Tabla 15. Medias del pH del zumo durante la experiencia.....	79
Tabla 16. Medias del Índice de Madurez durante la experiencia (IM).....	79
Tabla 17. Medias del Calibre durante la experiencia (mm)	80
Tabla 18. Medias del Peso durante la experiencia (g).....	80
Tabla 19. Valores variable MODIF.....	105
Tabla 20. Pruebas de Normalidad para variable MODIF.....	105
Tabla 21. Valores Fe DIF.	135
Tabla 22: Pruebas de Normalidad para FeDIF.	136
Tabla 23. Valores de los Análisis de Agua efectuados.....	139

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Correlación entre las emisiones de CO ₂ y el aumento de la temperatura. (IPCC, 2013).....	13
Figura 2. Tendencia Mundial de los Principales Gases de Efecto Invernadero. (IPCC, 2013)	14
Figura 3. Formas carbono inorgánico a diferentes pH.....	21
Figura 4. Estimación del Contenido de Carbono Orgánico en la capa arable en el sur de Europa. (Zdruli et al., 2004)	27
Figura 5. Parcela donde se han efectuado los ensayos.	29
Figura 6. Cabezal de riego en la parcela de ensayos.....	31
Figura 7. Dosificadores de dióxido de carbono.	32
Figura 8. Incorporación del sistema de fertilización carbónica en el cabezal de riego.	32
Figura 9. Sensor de medida de CO ₂ Wöhler CDL 210.....	38
Figura 10. Cámara para la medida de CO ₂ en ambiente controlado.....	39
Figura 11. Esquema de la medición ambiental en cámara.	40
Figura 12. Medidor de área foliar LiCor LI 3100.	42
Figura 13. Hojas típicas.	43
Figura 14. Medición de una hoja con el Medidor LiCor LI 3100.	44
Figura 15. Resultados de medición de superficies.	45
Figura 16. Peachímetro PCE – PH 22.....	46
Figura 17. Solubilidad de dióxido de carbono en agua (Perry y Green, 2001).....	48
Figura 18. Refractómetro digital utilizado para medir el contenido en azúcares.	52
Figura 19. Valorador ácido-base para estimar el índice de madurez en cítricos.	53
Figura 20. Medición de CO ₂ en campana.	59
Figura 21. Evolución de la Superficie Foliar desde 2010 a 2015.....	63
Figura 22. Estadio Fenológico 30: 50% de brotes no abiertos.	68
Figura 23. Estadio Fenológico 55: las flores se hacen visibles: están todavía cerradas – botón verde- y se distribuyen aisladas o con racimos en inflorescencias con o sin hojas.	68
Figura 24. Estadio Fenológico 59: la mayoría de las flores con los pétalos cerrados adquieren la forma de una bola hueca y alargada.	69
Figura 25. Estadio Fenológico 61: comienza la floración, alrededor del 10% de las flores están abiertas.	69
Figura 26. Estadio Fenológico 65: plena floración, alrededor del 50% de las flores están abiertas y empiezan a caer los primeros pétalos.....	70
Figura 27. Estadio Fenológico 69: fin de la floración, han caído todos los pétalos.....	70

Figura 28. Evolución del Contenido en azúcares durante el estudio.....	73
Figura 29. Evolución del pH del zumo durante el estudio.....	74
Figura 30. Evolución del Índice de Madurez durante el estudio.....	75
Figura 31. Evolución del Calibre del fruto durante el estudio.....	76
Figura 32. Evolución del Peso del fruto durante el estudio.....	77
Figura 33. Evolución del pH del suelo a lo largo de toda la experiencia.....	83
Figura 34. Evolución de la conductividad del suelo a lo largo de toda la experiencia.	85
Figura 35. Evolución del Catión Ca^{+2} en el suelo a lo largo de la experiencia.....	87
Figura 36. Evolución del Catión Mg^{+2} en el suelo a lo largo de la experiencia.	88
Figura 37. Evolución del Nitrógeno en el suelo a lo largo de la experiencia.	90
Figura 38. Evolución del Fósforo en el suelo a lo largo de la experiencia.....	92
Figura 39. Evolución del Potasio en el suelo a lo largo de la experiencia.	94
Figura 40. Evolución del Contenido en Cloruros en el suelo a lo largo de la experiencia.	96
Figura 41. Evolución del Carbono Orgánico en el suelo a lo largo de la experiencia. ..	98
Figura 42. Evolución de la Materia Orgánica Oxidable en el suelo lo largo de la experiencia.	100
Figura 43. Tendencia de Evolución del Carbono Orgánico a lo largo de la experiencia.	102
Figura 44. Tendencia de Evolución de la Materia Orgánica Oxidable lo largo de la experiencia.	103
Figura 45. Evolución del contenido de Nitrógeno en hojas lo largo de la experiencia.	109
Figura 46. Evolución del Contenido de Fósforo en hojas lo largo de la experiencia. ...	111
Figura 47. Evolución del Contenido de Potasio en hojas lo largo de la experiencia. ...	113
Figura 48. Evolución del Contenido de Calcio en hojas lo largo de la experiencia.	115
Figura 49. Evolución del contenido de Magnesio en hojas lo largo de la experiencia.	117
Figura 50. Evolución del contenido de Sodio en hojas lo largo de la experiencia.....	119
Figura 51. Evolución del contenido de Manganeso en hojas durante la experiencia.	121
Figura 52. Evolución del Contenido de Cinc en hojas lo largo de la experiencia.....	123
Figura 53. Evolución del contenido de Cobre en hojas lo largo de la experiencia.	125
Figura 54. Evolución del contenido de Boro en hojas lo largo de la experiencia.....	127
Figura 55. Evolución del contenido de Molibdeno en hojas a lo largo de la experiencia.	129
Figura 56. Evolución del contenido de Aluminio en hojas a lo largo de la experiencia.	131
Figura 57. Evolución del contenido de Hierro en hojas lo largo de la experiencia.....	133
Figura 58. Tendencia del Contenido de Hierro en hojas lo largo de la experiencia.	134

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Objetivos.

El **objetivo principal** de esta investigación es el estudio de la captación y utilización del CO₂ en el cultivo de los cítricos; para ello se han realizado inyecciones controladas de dióxido de carbono purificado en una red de riego de una explotación de cítricos. Se pretende, de esta manera analizar la utilización de nuevas prácticas agrícolas como sumidero de CO₂ resultante del efecto invernadero y otras prácticas contaminantes de origen antropomórfico, así como estudiar los beneficios que esta práctica pueda tener para los cítricos.

Para alcanzar este objetivo principal se han de alcanzar los siguientes objetivos concretos:

- Estudio e Influencia sobre la fertilidad del suelo de la aportación de CO₂ en el agua de riego.
- Estudio e influencia de la fertirrigación carbónica sobre los factores que afectan al desarrollo vegetativo de los cítricos.
- Estudio e influencia de la fertirrigación carbónica sobre la calidad, productividad y periodo de recolección de los cítricos.
- Valoración de la problemática inherente a la práctica estudiada.
- Valoración del potencial de la fertirrigación carbónica para mejorar plantaciones de cítricos en producción.

La dosis de CO₂ disuelto en el agua de riego fue uniforme y única a lo largo de toda la experiencia. La valoración de las repercusiones del uso de diferentes dosis de dióxido de carbono (y sobre todo de su repercusión económica) sería una más de las variables a considerar en un diseño tipo 2^k. Se plantea éste como un futuro desarrollo experimental de esta práctica, habida cuenta de los resultados de esta experiencia y de la necesidad de encontrar sumideros de CO₂ que puedan servir como vía de disminuir las emisiones antropogénicas de este gas. De igual manera, el plantear una dosis diferente a la saturación está fuera de los planteamientos del proyecto, ya que, si con la dosis máxima los efectos bibliográficos relatados no son demasiado elevados, con una dosis inferior las consecuencias esperadas serían poco apreciables.

1.2. Justificación.

Estos estudios van a constituir la base científica para el proyecto LIFE FERTILIFE, (LIFE14 CCM/ES/311) financiado por la Unión Europea y que tiene como fecha de inicio el 1

de octubre de 2015. Con objeto de poner en valor el estudio científico desarrollado en este trabajo, se reflejan los principales aspectos del proyecto:

“El proyecto pretende desarrollar un proceso para capturar el CO₂ emitido por una industria cerámica y utilizarlo para el riego de plantaciones agrícolas, logrando un beneficio medioambiental doble:

- *Disminuir las emisiones de CO₂ del sector cerámico en particular y del sector industrial en general.*
- *Reducir el consumo de productos químicos en el cultivo de cítricos y de frutales en general.*

El impacto socio-económico del proyecto se espera que sea elevado y se plasma:

- *A nivel económico, con la generación de empleo directa que el proyecto ocasionara, una inyección económica para el sector agrícola y una disminución del coste de los derechos de emisión para el sector industrial.*
- *A nivel social, a largo plazo una mejora en la calidad de vida de las personas, debido a la disminución de emisiones de CO₂ por la industria y a la reducción en el uso de productos químicos por parte de los agricultores.*

*Con una aplicación basada en esta tecnología se pretende crear un sistema de **economía circular** industrial-agrícola en la que los subproductos, residuos o emisiones de una actividad productiva industrial como la cerámica, fuertemente arraigada en la Comunidad Valenciana sea aprovechada por otra actividad productiva también de fuerte presencia en el ámbito considerado como es la agricultura y, más concretamente, la citricultura. Se pretende además que el sector cerámico reduzca el pago de derechos de emisión de CO₂ y, consecuentemente, que la agricultura sea considerada como un **sumidero activo** de dióxido de carbono y que, por tanto, reciba ingresos por disminución de cuotas de emisión.”*

La relevancia y las conclusiones de las experiencias realizadas en este trabajo de investigación se contextualizan dentro del marco que proporciona el proyecto LIFE. El uso de la agricultura en general y de la citricultura en particular como **sumidero activo** de CO₂ es una vieja aspiración de la comunidad agrícola. El trabajo aquí presentado supone la primera piedra para que la agricultura pueda empezar a beneficiarse del comercio de emisiones de CO₂. En este momento se trata de un tema muy novedoso, y por tanto se cuenta con escasos precedentes, pero la concienciación medioambiental de la población y la responsabilidad civil de los países generadores

de CO₂ le confiere una importancia y vigencia que va a ir en aumento con el tiempo, especialmente en Europa, Estados Unidos y Japón.

Todos los análisis efectuados a lo largo de 5 campañas agrícolas han ido orientados a la valoración del potencial agrícola de la fertirrigación carbónica, obviando aspectos económicos. Actualmente, el dióxido de carbono como acidificante es caro y el coste que supone para el agricultor, no compensa los beneficios que ocasiona (básicamente, la mejora en la absorción de hierro). Sin embargo, si se cumplen los objetivos del proyecto IRRILIFE, a corto-medio plazo el agricultor no sólo no tendrá que pagar por el dióxido de carbono, sino que cobrará por reciclarlo.

1.3. Marco normativo.

1.3.1. Antecedentes.

Contrariamente a lo que se pueda pensar, la influencia del dióxido de carbono en el aumento de la temperatura del planeta ya fue documentado por Arrhenius en 1896. (Arrhenius Svante 1896 "On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. "Philosophical Magazine and Journal of Science Series 5, Volume 41, April, pages 237-276). Debieron de pasar más de 100 años para que los estamentos políticos internacionales tomaran cartas en el asunto. Así, el 11 de diciembre de 1997 los países industrializados se comprometieron, en la ciudad de Kioto, a ejecutar un conjunto de medidas para reducir los gases de efecto invernadero. Los gobiernos signatarios pactaron reducir en un 5,2% de media las emisiones contaminantes entre 2008 y 2012, tomando como referencia los niveles de 1990. El acuerdo entró en vigor el 16 de febrero de 2005, después de la ratificación por parte de Rusia el 18 de noviembre de 2004. El objetivo principal del protocolo es disminuir el cambio climático de origen antropogénico cuya base es el efecto invernadero. Según las cifras de la ONU, si las emisiones de efecto invernadero continúan aumentando, la temperatura media de las capas inferiores de la atmósfera terrestre podría incrementarse en más de 2°C (Smith et al., 2015) Esto se conoce como Calentamiento Global, y según señala la Comisión Europea sobre Kioto, "estos cambios repercutirán gravemente en el ecosistema y en nuestras economías".

El calentamiento global es un término utilizado habitualmente en dos sentidos:

1. Es el fenómeno observado en las medidas de la temperatura que muestra en promedio un aumento en la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos en las últimas décadas.

2. Es una *teoría* que predice, a partir de proyecciones basadas en simulaciones computacionales, un crecimiento futuro de las temperaturas.

La denominación "calentamiento global" suele llevar implícita las consideraciones de la influencia de las actividades humanas. Esta variante antropogénica de la teoría predice que esto sucederá si continúan las emisiones de gases de efecto invernadero. La opinión científica mayoritaria sobre el cambio del clima dice que "la mayor parte del calentamiento observado en los últimos 50 años, es atribuible a la actividad humana". Las simulaciones parecen indicar que la principal causa del componente de calor inducido por los humanos se debería al aumento de dióxido de carbono. La temperatura del planeta ha venido elevándose desde finales del siglo XIX, cuando se puso fin a la etapa conocida como la pequeña edad de hielo. En el gráfico de la Figura 1 se puede observar el porcentaje de CO₂ en la atmósfera en ppm a lo largo del último milenio (en azul) y la temperatura media de la tierra (en rojo). Como se muestra, además, las predicciones prevén un aumento aún más acusado a lo largo de estos años.

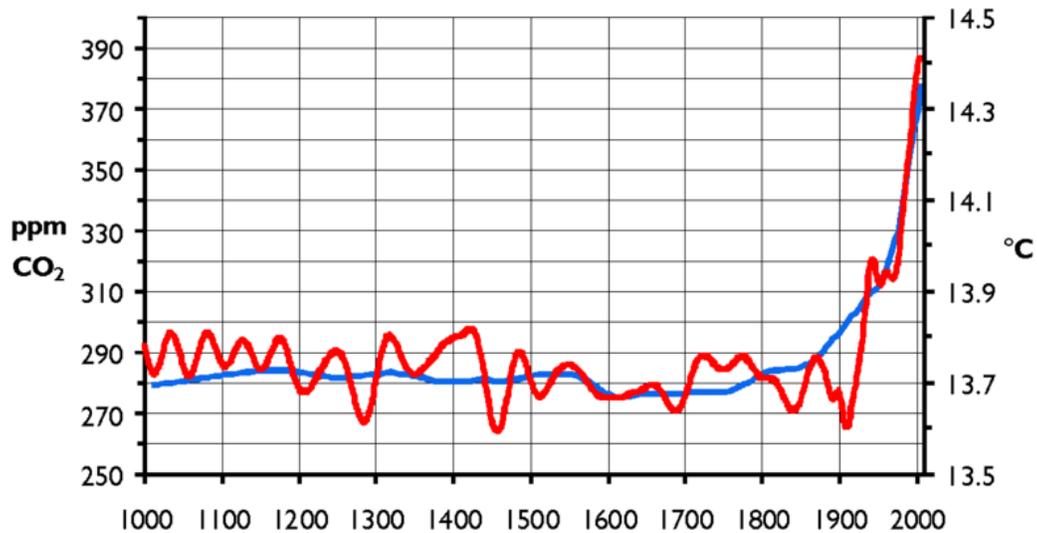


Figura 1. Correlación entre las emisiones de CO₂ y el aumento de la temperatura.
(IPCC, 2013)

1.3.2. Protocolo de Kioto.

El Protocolo de Kioto sobre el cambio climático es un instrumento internacional que tiene por objeto reducir las emisiones de seis gases provocadores del calentamiento global (dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), además de tres gases industriales fluorados: hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6)), en un porcentaje aproximado de un 5%, dentro del período que va desde el año 2008 al 2012, en comparación a las emisiones del año 1990. Por ejemplo, si la contaminación de estos gases en el año 1990 alcanzaba el 100%, al término del año 2012 debería ser del 95%. Es preciso señalar que esto no significa que cada país deba reducir sus emisiones de gases regulados en un 5%, sino que este es un porcentaje a nivel global y, por el contrario, cada país obligado por el Protocolo de Kioto tiene sus propios porcentajes de emisión que debe disminuir. En el gráfico de la Figura 2 se muestran diferentes predicciones de la evolución de los principales gases de efecto invernadero.

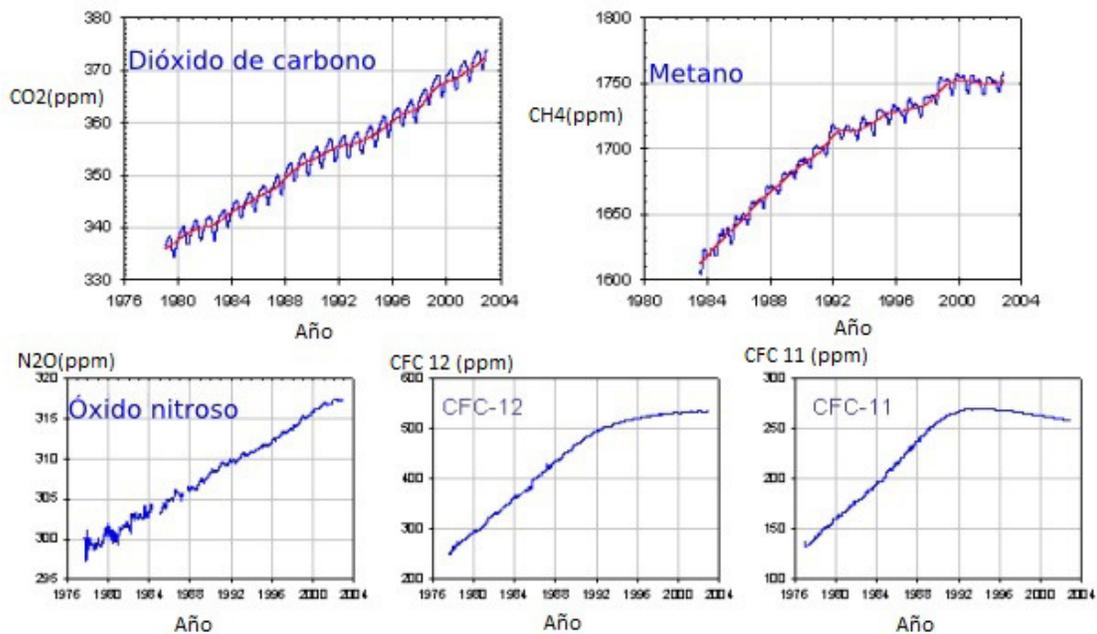


Figura 2. Tendencia Mundial de los Principales Gases de Efecto Invernadero. (IPCC, 2013)

El Protocolo es un instrumento que se encuentra dentro del marco de la *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)*, suscrita en 1992

dentro de lo que se conoció como la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro. El Protocolo vino a dar fuerza vinculante a lo que en ese entonces no pudo hacer la CMNUCC. Se estableció que el compromiso sería de obligatorio cumplimiento cuando lo ratificasen los países industrializados responsables de, al menos, un 55% de las emisiones de CO₂. Con la ratificación de Rusia en noviembre de 2004, el protocolo entró en vigor. Además del cumplimiento que estos países hicieron en cuanto a la emisión de gases de efecto invernadero, se promovió también la generación de un desarrollo sostenible, de tal forma que se pudieran utilizar también energías no convencionales y así disminuir el calentamiento global. El gobierno de Estados Unidos firmó el acuerdo pero no lo ratificó (ni Bill Clinton, ni George W. Bush), por lo que su adhesión sólo fue simbólica hasta el año 2001, en el cual el gobierno de Bush se retiró del protocolo, no porque no compartiese su idea de fondo de reducir las emisiones, sino porque consideró que la aplicación del Protocolo era ineficiente e injusta al involucrar solo a los países industrializados y excluir de las restricciones a algunos de los mayores emisores de gases en vías de desarrollo (China e India en particular), lo cual se consideró que perjudicaría gravemente a la economía estadounidense.

1.3.3. La Directiva 20 20 20.

Desde el principio, la Unión Europea (UE) ha liderado el compromiso para la adopción internacional de Kioto. La ratificación de Kioto por parte de la UE obligaba a sus estados miembros a reducir el 8% de sus emisiones entre el 2008 y 2012, frente a los niveles de 1990.

Son numerosas las políticas que la Unión ha ido adoptando para limitar las emisiones de CO₂. Entre ellas la Directiva de la UE sobre Comercio de Emisiones. La Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, aprobada el 13 de octubre de 2003, es la que establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) en la Comunidad Europea, a fin de fomentar reducciones de emisiones de estos gases, para garantizar el cumplimiento del Protocolo. Según esta Directiva, cada Estado miembro ha debido elaborar un Plan Nacional de Asignaciones que determina la cantidad total de derechos de emisión que se otorgan a cada centro emisor. No obstante, a cada país se le otorgó un margen distinto en función de diversas variables económicas y medioambientales según el principio de *reparto de la carga*.

Por su parte, España, que se comprometió a aumentar sus emisiones como máximo un 15% en relación al año base, se ha convertido en el país miembro que menos posibilidades tiene de cumplir lo pactado. En concreto, el incremento de sus emisiones en relación a 1990 durante los últimos años ha sido como sigue: 1996: 7%; 1997: 15%;

1998: 18%; 1999: 28%; 2000: 33%; 2001: 33%; 2002: 39%; 2003: 41%; 2004: 47%; 2005: 52%; 2006: 49%; 2007: 52%; 2008: 42,7%. Esta información puede consultarse en el Inventario Español de Gases de Efecto Invernadero que incluye el envío oficial a la Comisión Europea y a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

El problema que supone para España esta distribución de compromisos de umbrales de emisiones es que implica techos económicos diferentes para cada país de la Unión Europea. España, desde 1990, obtuvo un crecimiento económico considerable, traduciéndose éste último en un aumento del transporte y el consumo energético de las familias y la industria. Esta explicación de los techos económicos diferentes se complementa con el hecho de que el consumo energético es directamente proporcional al desarrollo económico y el nivel de emisiones de CO₂ es proporcional al consumo energético. Por ello, dentro de un mercado libre y competitivo en la Unión Europea, España está en desigualdad de condiciones con respecto al resto de países. Además, España, bastante alejada de sus compromisos, es el segundo país mundial en producción de energía eólica y un país referencia en cantidad de energía renovable sobre la total consumida. El objetivo de España debe ser el de seguir este camino de aumento de energías renovables, aumentar la eficiencia y racionalidad de los consumos y exigir la igualdad en límites de cantidades de CO₂ por habitante y año con los demás países de la Unión Europea. La Directiva permite a España superar los registros de 1990 en un 15 % durante ese quinquenio, por lo que el desfase con lo pactado sería del 9 %.(Del Álamo Jiménez, 2007).

Para contrarrestar este déficit se deben tomar dos medidas:

- Por un lado **promover e impulsar los llamados sumideros de carbono**, principalmente reforestación de terreno, con lo que se obtendrán derechos de emisión equivalentes a dos puntos porcentuales adicionales al 15 % pactado.
- Los otros 7 puntos, aproximadamente 100 millones de toneladas de CO₂ en el período establecido, se obtendrán gracias a los llamados *Mecanismos de Flexibilidad*.

Asumiendo el compromiso de transformar Europa en una economía de alta eficiencia energética y baja emisión de carbono, durante los primeros meses de 2007 la Comisión Europea presentó un paquete integrado de propuestas sobre energía y clima que incluía acciones concretas para la consecución de tres objetivos ambiciosos con el horizonte temporal de 2020:

- Reducir las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) al menos en un 20% respecto de los niveles de 1990.
- Alcanzar el objetivo del 20% de consumo de energías renovables.

- Mejorar la eficiencia energética en un 20%

Los denominados objetivos 20-20-20 incluían también aumentar el objetivo de reducción de las emisiones totales de GEI hasta el 30% si otros países desarrollados se comprometen a reducciones de emisiones equivalentes.

Tras haber realizado completos análisis económicos y una amplia consulta con los estados miembros, en enero de 2008 la Comisión presentó un paquete de propuestas legislativas orientadas al desarrollo de los objetivos 20-20-20, que abrió un debate intenso de negociaciones hasta que el pleno del Parlamento europeo votó y aprobó mayoritariamente el paquete **energía y clima** el 17 de diciembre de 2008.

El paquete energía y clima consta de cuatro textos legislativos:

- *La Directiva 2009/29/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, por la que se modifica la Directiva 2003/87/CE para perfeccionar y ampliar el régimen comunitario de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero. En ella se establece la distribución de los esfuerzos realizados por los distintos estados miembros en relación con la consecución del objetivo global de la UE de cara al 2020 de reducir en un 20% las emisiones de gases de efecto invernadero.*
- *La Decisión N° 406/2009/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, sobre el esfuerzo de los Estados miembros para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero a fin de cumplir los compromisos adquiridos por la Comunidad hasta 2020, en la que se establecen objetivos nacionales vinculantes acerca de las emisiones de los sectores no regulados por el régimen de comercio de derechos de emisión de la UE, como los transportes, los edificios, los servicios, la agricultura o los residuos.*
- *La Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE. En ella se establece dos objetivos vinculantes; por una parte, un porcentaje global a escala europea del 20% de energías renovables en el consumo comunitario total de aquí al 2020, para el que a España le corresponde una contribución del 20%, y por otra parte, un porcentaje mínimo del 10% para los biocarburantes utilizados en el sector del transporte, porcentaje común a todos los estados miembros.*
- *La Directiva 2009/31/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 relativa al almacenamiento geológico de dióxido de carbono y por la que*

se modifican la Directiva 85/337/CEE del Consejo, las Directivas 2000/60/CE, 2001/80/CE, 2004/35/CE, 2006/12/CE, 2008/1/CE y el Reglamento (CE) N° 1013/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo. Tiene como objetivos principales el establecimiento de un marco legislativo para la captura y el almacenamiento del CO₂, eliminar los obstáculos de regulación, gestionar los riesgos medioambientales, y fomentar la claridad, la coherencia y la estabilidad para las inversiones en la UE en este ámbito.

Las medidas anteriores se complementan con dos actos legislativos que se acordaron al mismo tiempo:

- El Reglamento (CE) No 443/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, por el que se establecen normas de comportamiento en materia de emisiones de los turismos nuevos como parte del enfoque integrado de la Comunidad para reducir las emisiones de CO₂ de los vehículos ligeros, con arreglo al cual las emisiones de CO₂ de los automóviles nuevos deberán reducirse de manera progresiva entre 2012 y 2015 para situarse en 120 g/km por término medio, y disminuir posteriormente hasta 95 g/km en 2020. Solo con esta medida se logrará reducir en más de un tercio las emisiones de los sectores no regulados por el régimen de comercio de derechos de emisión.
- La Directiva 2009/30/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, por la que se modifica la Directiva 98/70/CE en relación con las especificaciones de la gasolina y el gasóleo, se introduce un mecanismo para controlar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, se modifica la Directiva 1999/32/CE del Consejo en relación con las especificaciones del combustible utilizado por los buques de navegación interior y se deroga la Directiva 93/12/CEE que revisa las normas sobre la calidad de los combustibles de acuerdo con la cual en 2020 los proveedores de combustible deberán reducir un 6 % las emisiones de los gases de efecto invernadero dentro de la cadena de producción de combustibles.

1.4. El papel de la agricultura en la mitigación del cambio climático.

1.4.1. La agricultura como sumidero de dióxido de carbono.

Según el Plan Nacional de Asignaciones, "para el cálculo de la cifra de absorción por los sumideros de carbono en España en el período 2008-2012 se ha contabilizado la absorción producida por actividades de forestación y reforestación (art. 3 párrafo 3 del Protocolo de Kioto) y absorción debida a la gestión de tierras agrícolas y la gestión de bosques (art. 3, párrafo 4 del Protocolo de Kioto: actividades adicionales elegibles por las Partes del Protocolo)". Las absorciones netas de CO₂ correspondientes a las actividades de "Uso de la Tierra y Cambios del Uso de la Tierra y la Silvicultura" a lo largo del período inventariado, 1990-2004, se sitúan en 2004 en un 32,6 % por encima del año base. Este indicador marca un crecimiento sostenido de las absorciones en el período inventariado, excepción hecha de los intervalos entre 1994-1996 y 2002-2004.

El sistema ofrece unos mecanismos llamados de flexibilidad, gracias a los cuales la reducción real y efectiva de emisiones puede llevarse a cabo de manera progresiva y viable en países como España. Se definen por tanto tres *protocolos de flexibilización*: el Comercio de Emisiones, la Acción Conjunta y el Mecanismo para un Desarrollo Limpio. Se permite la creación de unidades de reducción de emisiones (UREs) producidas por proyectos encaminados a reducir las emisiones antropogénicas por las fuentes o incrementar la absorción antropógena por los sumideros de los gases de efecto invernadero. Bajo esta percepción del problema, cobra mayor importancia la posibilidad de utilizar **la agricultura como sumidero de CO₂**, jugando un importante papel en la obtención de los objetivos del protocolo de Kioto.

Se entiende por **sumidero** todo sistema (o proceso) por el que se extrae de la atmósfera un gas o gases y se almacena. El Protocolo de Kioto considera como sumideros de gases de efecto invernadero las actividades de forestación, reforestación, usos de la tierra, cambio de uso de la tierra y la silvicultura (artículo 3.3 y 3.4). Los sumideros podrían absorber entre 30 y 200 millones de toneladas de carbono, lo que supondría una reducción considerable en el esfuerzo por lograr los compromisos adquiridos por el Protocolo de Kioto. El IPCC, en dos documentos generados acerca de este particular: "Tecnologías, políticas y medidas para mitigar el cambio climático", 1996 y "Carbon Dioxide Capture and Storage" considera, entre otros distintos tipos de sumideros:

Sumidero geológico.

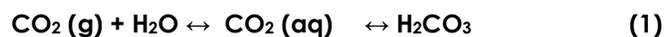
Es una solución que permite inyectar directamente CO₂ en formaciones geológicas subterráneas: cavernas de roca porosa o acuíferos. La cavidad puede ser artificial, como minas abandonadas o bolsas de petróleo vaciadas, o se puede inyectar CO₂ en bolsas de petróleo para forzar que éste surja a la superficie.

Sumideros naturales: bosques, suelos agrícolas, y océanos.

Las formaciones vegetales actúan como sumideros por su función vital principal: la fotosíntesis (proceso por el que los vegetales captan CO₂ de la atmósfera o disuelto en el agua y con la ayuda de luz solar lo utilizan en la elaboración de moléculas sencillas de azúcares). Mediante la fotosíntesis los vegetales absorben CO₂ compensando las pérdidas que sufren de este gas por respiración. **La agricultura es un sector estratégico básico** para la producción de alimentos, pero al mismo tiempo es un sector multifuncional **que**, gracias a sus activos, **puede conseguir** un desarrollo sostenible en el medio rural y **una destacada contribución a paliar los efectos del cambio climático**. Las zonas de cultivo son siempre sumideros de CO₂. Los cultivos evitan la desertificación, son emisores de oxígeno a la atmósfera, ayudan a regular el clima y la hidrología y, sobre todo, actúan como sumidero de CO₂.

1.4.2. La fertirrigación carbónica.

El CO₂ es un gas que en contacto con el agua toma carácter de ácido débil para formar ácido carbónico según la reacción de la Ecuación 1, donde (g) representa CO₂ en estado gaseoso y (aq) indica CO₂ disuelto en agua:



La mayor parte del ácido carbónico disuelto en agua está en forma de CO₂ (aq). En función del pH el CO₂ disuelto en el agua estará presente en alguna de sus formas químicas CO₂ (aq), HCO₃⁻ (bicarbonato) o CO₃²⁻ (carbonato), tal como queda reflejado en la Figura 3.

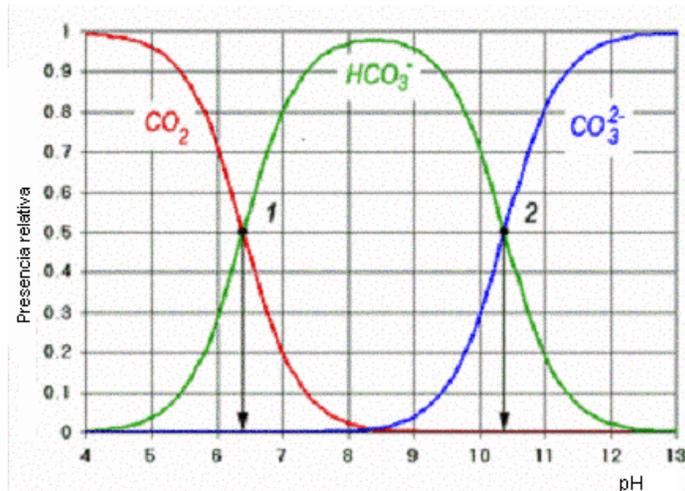


Figura 3. Formas carbono inorgánico a diferentes pH.

Los pHs que fijan el predominio de una u otra especie son los siguientes:

- $[\text{CO}_2](\text{aq}) < 6.3$
- $[\text{HCO}_3^-] 6.3-10.3$
- $[\text{CO}_3^{2-}] > 10.3$

Dependiendo de la temperatura y la presión a la cual se encuentre, el dióxido de carbono puede existir en fase sólida, líquida o gaseosa. A la temperatura de $-56,6\text{ }^\circ\text{C}$ y presión de 417 kPa el dióxido de carbono se encuentra en sus tres fases simultáneamente. Posee una temperatura crítica ($31,1\text{ }^\circ\text{C}$) a la que solo se puede encontrar como gas sin importar la presión a la que se someta. Su solubilidad en agua pura es relativamente baja: a 25°C es de 1,45 g/l. La solubilidad del CO_2 varía con la presión y la temperatura. El dióxido de carbono se utiliza como agente extintor eliminando el oxígeno para el fuego, en bebidas carbonatadas para darles efervescencia, como ácido inocuo o poco contaminante, en refrigeración como una clase de líquido refrigerante en máquinas frigoríficas o congelado como hielo seco. (Housecroft y Sharpe, 2006)

La *fertirrigación carbónica* consiste en el uso de agua carbonatada para el riego. El agua carbonatada se consigue mediante la inyección de CO_2 en la tubería principal de un sistema de riego por goteo de manera que al disolverse el CO_2 en el agua de riego produce ácido carbónico que reduce el pH del agua y origina diversos bicarbonatos al reaccionar con carbonatos y otras sales presentes en el agua. El agua carbonatada recibe a continuación los fertilizantes habituales para el riego cuya solubilidad mejora en un agua ligeramente ácida. Para aportar CO_2 al sistema de riego hay que tener en cuenta la presión de la línea de agua de riego, la distancia del punto

de inyección de CO₂ al primer gotero, la temperatura del agua, el sistema de difusión del CO₂ en el agua y la cantidad de CO₂ por litro de agua. (Arias et al. 2008)

La utilización del agua carbonatada puede ser rentable en el ámbito de la producción horticola (Guri, 2002) como se ha estudiado en el caso del cultivo del tomate (Aguilera y Checa, 2000), de la berenjena (Aguilera et al., 2002), del pepino (Ibrahim, 1992), o del pimiento (Guri et al., 1999) encontrándose la dosis óptima en torno a los 0.20 g de CO₂/l, y produciendo con esta concentración los mayores incrementos de cosecha en éstos cultivos. El mayor tamaño de los frutos de tomate se alcanza con una dosis de 0.35 g de CO₂/l. En todos estos casos, el CO₂ se inyectaba en forma de gas en el agua de riego a partir de un depósito presurizado con manorreductor. El control de la dosificación de dióxido de carbono inyectado en las diferentes experiencias variaba, desde un control electrónico mediante electroválvulas y caudalímetros hasta un control manual vía válvula de esfera y medición de pH.

Otro sector destacado en el estudio del uso del CO₂ en el agua de riego es el de la flor cortada. El proyecto Fertigreen (Arias et al., 2008) es una muestra de ello, bajo el cual se han valorado los efectos de la adición de gases como el CO₂ o el O₂ en el agua de riego en diferentes cultivos de flor cortada, evaluando su acción sobre el cultivo, postcosecha y los nitratos que se pierden en el lixiviado. En concreto, los cultivos sobre los que se realizaron los ensayos fueron: Clavel (*Dianthus caryophyllus*), Liliom (*Lilium Longiflorum*), Cala (*Zantedeschia aetópica*) y Crisantemo (*Chrysantenum spp.*). Tras el análisis estadístico de los datos se concluyó que aunque existían diferencias en la mayoría de los parámetros estudiados a favor del cultivo tratado con el gas, dichas diferencias no llegaban a ser significativas.

Sistemas de enriquecimiento de CO₂ para atmósferas controladas (invernaderos)

Los sistemas de enriquecimiento de dióxido de carbono que se detallan a continuación se utilizan principalmente en sistemas de atmósfera controlada.

GENERADORES DE CO₂

Estos aparatos queman combustibles como propano o gas natural y están diseñados para maximizar la producción de CO₂ y minimizar la de otros productos secundarios de combustión. Cuando el generador se enciende, la combustión comienza al actuar un piloto de ignición constante. Si la llama piloto se apaga, la válvula se cierra, de modo que no puede escapar combustible sin quemar. Estos sistemas se encuentran bastante extendidos en los EEUU. Según el tamaño, la concentración que se desee alcanzar y el tiempo necesario para llevarla a cabo, las dimensiones serán distintas. Los fabricantes de generadores recomiendan que se elijan los modelos de tal modo que no se excedan los 20 minutos para alcanzar el nivel de enriquecimiento deseado. Así mismo,

indican que como mínimo debe recargarse el ambiente a las 1-4 horas, en función de pérdidas por ventilación o consumo por parte de las plantas. El control de la instalación, se suele llevar a cabo con simples temporizadores, o bien con elementos de medida y un procesador central que se programa para actuar según las condiciones. En este caso debe valorarse también el coste que supone la instalación, el combustible, y su rentabilidad en el caso concreto de equipamiento.

INYECCIÓN DE CO₂ ALMACENADO EN BOMBONAS

Este método consiste en instalar un sistema de elementos dosificadores que distribuyen CO₂ procedente de bombonas. Como ventaja principal cuenta con que es el método más sencillo de instalar y regular, ya que no depende de la actividad de otros elementos de la instalación para disponer de la fertilización carbónica, y en consecuencia el aporte es inmediato. El gas que se inyecta, además, es CO₂ sin otras impurezas. En este sistema de enriquecimiento debe valorarse especialmente el coste que supone el suministro continuo de dichas bombonas y su rentabilidad en el caso concreto de cada invernadero y producto que se obtiene.

UTILIZACIÓN DE HIELO SECO

Se llama nieve carbónica o hielo seco al estado sólido del dióxido de carbono. Recibe este nombre porque, pese a parecerse al hielo o a la nieve por su aspecto y temperatura, cuando se evapora (o, más propiamente, cuando se sublima) no deja residuo de humedad.

El hielo seco (dry ice) como fuente de fertilización carbónica es utilizado por pequeños productores en base a su versatilidad y precio, aproximadamente el mismo que el del CO₂ envasado en tanques o bombonas. Este producto se evapora a un ritmo del 7% por día cuando se conserva en un frigorífico a temperaturas bajas (3-7°C); a temperatura ambiente su tasa de descomposición es muy variada, dependiendo de la temperatura y la presión atmosférica, cosa que imposibilita su control y regulación.

OTROS SISTEMAS DE ENRIQUECIMIENTO DE CO₂

Así mismo, otros sistemas alternativos llevan a cabo, o recomiendan, la producción de compost o la fermentación de bebidas dentro de los invernaderos, debido a la emisión de CO₂ que producen con la fermentación. Naturalmente se trata de pequeñas explotaciones y presentan el problema de la regulación, además de otros como pudieran ser problemas fitosanitarios, contaminación ambiental, etc.

En este sentido, se puede enlazar esta metodología con las investigaciones que se llevan a cabo en países europeos con el llamado biogás, que se produciría a partir de la fermentación anaerobia en digestores específicos de residuos de todo tipo, y cuya composición sería CO₂ y metano, casi a partes iguales. (Vivancos, 1993)

De la misma manera puede llegar a generarse dióxido de carbono a partir de tabletas de CO₂ de liberación lenta.

Ventajas y rentabilidad de la fertirrigación carbónica.

Tal y como se ha comentado en el punto 1.4.2. diferentes autores han estudiado la fertirrigación carbónica, principalmente en variedades hortícolas. Pese a todo, las conclusiones de los diferentes estudios no han sido las mismas.

Así, algunos de ellos detectan incrementos en calidad y precocidad (Aguilera et al., 2000; Guri Baiget et al., 1999) rendimiento de cosecha (Moore, 1990; Enoch y Olesen, 1993) mejora de las características del suelo (Ibrahim, 1992; Basile et al., 1993) y mejora en la absorción de nutrientes (Arienzo et al., 1993, De Camargo et al., 2013, Mauney y Hendrix, 1988). Sin embargo otros autores no encuentran mejoras significativas en la utilización de esta práctica (Storlie y Heckman, 1996.)

La Tabla 1 resume los resultados obtenidos por todos estos investigadores entre 1988 y 2013.

Tabla 1. Resultados de estudios sobre fertilización carbónica ambiental realizados en diversos cultivos, concentraciones utilizadas y efectos observados.

Producto	Concentración	Beneficios	Autores/año
TOMATES	0.25 g/l	Precocidad y aumento de producción	Aguilera y Checa, 2000
BERENJENAS	0.25 g/l	Incremento Floración y Aumento de Producción	Aguilera et al., 2002
PEPINOS	0.30 g/l	Precocidad y aumento de producción	Ibrahim, 1992
LECHUGAS	0.25 g/l	Anticipo de la cosecha – productividad	Guri, 2002
PIMIENTOS	0.10-0.30 g/l	Precocidad y aumento de producción	Guri et al., 1999
CLAVELES	0.30-0.40 g/l	Incremento de la producción y mejora de la calidad	Arias et al., 2008
CALA	0.30-0.40 g/l	Incremento de la producción y mejora de la calidad	Arias et al., 2008
LILIUM	0.20-0.30 g/l	Mejora Calidad Comercial	Arias et al., 2008
CRISANTEMOS	0.20-0.30 g/l	Mejora Calidad e Incremento Velocidad Crecimiento	Arias et al., 2008
TOMATE	1.45 g/l	Mejora Características del Suelo	Arienzo et al., 1993
MELÓN	301,8 kg/ha	Mejora Absorción Nutrientes	De Camargo et al., 2013
---	1.45 g/l	Disminución pH suelo	Basile et al., 1993
PEPINO	0.15 g/l	Disminución pH suelo	Ibrahim, 1992
ALGODÓN	1.45 g/l	Incremento de la producción	Moore, 1990
ALGODÓN	1.45 g/l	Mejora en la absorción de nutrientes	Mauney y Hendrix, 1988
DIVERSOS	DISTINTAS	Incremento de la producción	Enoch y Olesen, 1993
TOMATE	1.45 g/l	Mejora en la producción, características del suelo y disminución pH	Novero et al., 1991
PIMIENTO	DISTINTAS	Sin resultados significativos	Storlie y Heckman, 1996

Por otra parte, las aguas mayormente utilizadas en el riego de todo el sudeste peninsular tienen pH entre 7.5 y 8. De igual manera, el pH de los suelos suele estar entre esos valores. Ello es debido a la presencia de suelos calcáreos así como al régimen de precipitaciones, normalmente por debajo de 400 mm anuales. Estos factores tienen dos consecuencias agronómicas principales: se ha de utilizar algún ácido fuerte en las aguas de riego para evitar precipitaciones calcáreas y, todavía más importante, las plantas tienen problemas de absorción de metales pesados (básicamente hierro) y

éstos han de ser suministrados por el agricultor en forma de quelatos (Agustí, 2003). Esta circunstancia (suelos calcáreos y aguas duras) es típica de climas mediterráneos con regímenes de precipitaciones áridos y semi áridos (Gómez Espí, 1997) y está presente en multitud de zonas del arco mediterráneo europeo (sudeste y este de la península ibérica, sur de Italia, Malta, Grecia, Croacia, islas griegas...) (Lanz, 1990).

Dentro de estos términos, las ventajas de la fertirrigación carbónica en cuanto a disminución del PH del agua son (Agustí, 2003):

1. Acidificación en agua de riego optimizando la asimilación de nutrientes por los cultivos y sin aumentos considerables de conductividad eléctrica.
2. Seguridad y estabilidad de pH.
3. Favorece la solubilidad de fertilizantes y el aprovechamiento del agua de riego.
4. Evita incrustaciones en goteros reduciendo costes de mantenimiento y aumenta la durabilidad de los equipos de riego.
5. Facilita esponjamiento de terrenos, lo que favorece un mejor desarrollo radicular.
6. Evita el manejo y manipulación de ácidos fuertes.

En años recientes, se ha prestado mucha atención a la respiración edáfica, que se define como la producción total de CO₂ por unidad de área y de tiempo, en suelos intactos debido a la respiración de organismos edáficos, raíces, hifas micorrícicas, y, en menor extensión, por la oxidación química de los compuestos de carbono.

Este proceso ecológico se reconoce como la principal fuente de flujo de carbono procedente de la superficie del suelo y uno de los componentes cruciales dentro del ciclo del carbono en ecosistemas terrestres. De hecho, pequeños cambios en la respiración del suelo pueden influir enormemente en la concentración del carbono atmosférico. Así, el Documento del Institute of Environment and Sustainability de la Comisión Europea "Organic matter in the soils of Southern Europe" (Zdruli et al., 2004) explica claramente el grave problema que la degradación de la materia orgánica del suelo debida a la respiración edáfica representa para la UE, especialmente para toda la cuenca mediterránea, como indica la Figura 4.

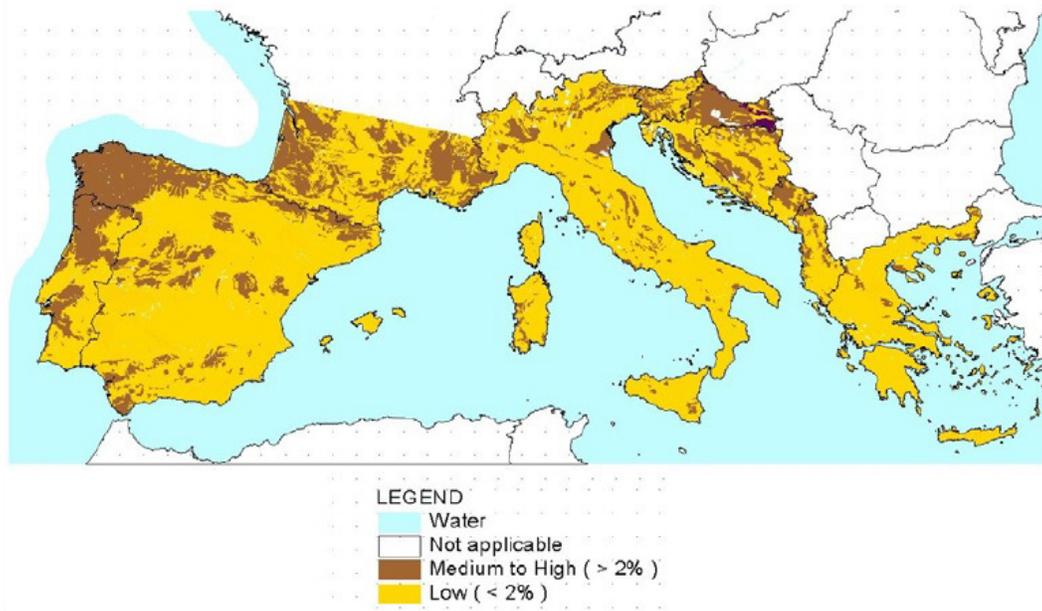


Figura 4. Estimación del Contenido de Carbono Orgánico en la capa arable en el sur de Europa. (Zdruli et al., 2004)

Hay indicios que sugieren que el aumento en el CO_2 disponible en la solución nutritiva y en la microatmósfera del suelo puede frenar la respiración edáfica ya que, se considera que prácticas que mejoren la estructura del suelo, aumenten la profundidad radicular y reduzcan su compactación aumentan las posibilidades de retención de materia orgánica. Según Luo y Zhou (2006), "...la interacción de los múltiples factores que influyen en la respiración del suelo son muy complejos y han sido pobremente estudiados. Entre otros, estos factores son aporte de sustrato, temperatura, humedad, oxígeno, nitrógeno, textura y pH del suelo" De igual manera, la **falta de oxígeno** es un parámetro limitador de la descomposición de la materia orgánica del suelo y, por tanto, de la respiración radicular. Así, los usos del suelo que fomentan **atmósferas bajas en O_2** reducen significativamente la respiración microbiana (Larinova et al., 2003) Y, por otra parte, la descomposición microbiana de la materia orgánica se reduce al limitar la actividad metabólica de los microorganismos, hecho que sucede al producirse una atmósfera anaerobia en la atmósfera del suelo (Hanson et al., 2000).

Diferentes autores han estudiado la relación entre el CO_2 y la espiración edáfica, con resultados en principio positivos. Así, Qui et al. (1994) demostraron que los efectos de la concentración de CO_2 en suelo en la respiración edáfica era estadísticamente significativo, disminuyendo ésta conforme aumentaba la concentración de dióxido de carbono. Van der Westhuizen y Cramer (1998) explican el mecanismo de reducción de la respiración edáfica debido al aumento de carbono inorgánico disuelto en el suelo

(CO₂ y HCO₃⁻) mediante una experiencia en tomate. Por su parte, Vourinen et al. (1992) comprobaron las diferentes vías metabólicas de absorción del carbono orgánica del suelo. Finalmente, Raich y Schlesinger (1992) recalcan la importancia de la respiración edáfica en el ciclo del CO₂, estableciendo una relación directa entre la temperatura y el régimen de precipitaciones con la respiración edáfica. Igualmente, evalúan el impacto potencial de diferentes actividades humanas en los ratios de respiración del suelo, con especial interés en el uso del suelo, la fertilización, el riego y el drenaje (demostrando una relación directa entre ambos factores y la respiración edáfica) y los cambios climáticos.

Los resultados de anteriores trabajos de investigación sirvieron para la determinación de los principales factores a estudiar, que se centraron en la cantidad y la calidad de la cosecha y en el análisis de los principales factores agronómicos asociados al suelo y a la planta.

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS.

2.1. Parcelas de ensayos.

Todos los ensayos y análisis realizados en este proyecto se efectuaron en una parcela de cítricos situada en el término municipal de Bugarra (Valencia), propiedad de la empresa CABESAN SAT N97 CV. Se trata de una parcela (Figura 5) con una superficie aproximada de 40 ha plantada con árboles de mandarina Nadorcott sobre citrange carrizo de 6 años de edad a un marco de plantación de 5.5 x 1.8 m.

Esta variedad, conocida también como Afourer, surgió de una semilla de Tangor Murcott obtenida en el INRA de Marruecos. Su época de maduración se sitúa a mediados de enero y puede conservarse bien en el árbol hasta abril. Es una variedad de entrada rápida en producción (75 kg/árbol al 4º año) y muy productiva (150 kg/árbol en plena producción), de árbol vigoroso. Su fructificación se produce con un elevado número de flores solitarias que, al cuajar fácilmente, da lugar a la formación de racimos. Es auto-incompatible, y no produce semilla si no hay polinización cruzada. La tendencia a la verticalidad de esta variedad obliga a una poda específica, eliminando los brotes verticales y respetando los más horizontales. El fruto posee un color naranja-rojizo brillante, un buen contenido en zumo, y buena facilidad de pelado. La relación sólidos solubles/acidez es agradable.



Figura 5. Parcela donde se han efectuado los ensayos.

Los ensayos experimentales se llevaron a cabo en un sector de la plantación fotografiada en la Figura 5 con 64 árboles de Nadorcott sometidos al mismo programa de riego y abonado que el resto de la plantación pero utilizando agua a la que previamente se le diluyó dióxido de carbono hasta saturación. Se pretendía, de esta manera trabajar a la dosis máxima admisible para valorar las posibles repercusiones de esta práctica. Una vez analizadas éstas, ya se podrá ensayar dosis distintas, cuantificar sus efectos y establecer la dosis óptima.

2.2. Sistema de riego y cabezal de inyección de CO₂.

La parcela de ensayos cuenta con una moderna instalación de riego localizado en superficie con equipo de bombeo, filtros de mallas, válvulas, e indicadores tanto para el funcionamiento de la red de riego como para el sistema de fertirrigación. Tal como muestra la Figura 6, la instalación de riego consta de cuatro depósitos, uno para abanado nitrogenado, otro para abonado potásico otro para abonado fosfórico y el último para ácido.

Los aportes de hierro y magnesio se hacen vía riego, el resto de oligoelementos por vía foliar.



Figura 6. Cabezal de riego en la parcela de ensayos.

La Figura 7 muestra el dosificador de dióxido de carbono utilizado en las pruebas de campo. El dosificador es un regulador de gases con caudalímetro incorporado, lo que permite controlar el caudal de gas en litros por minuto (0 - 32 l/min), a una presión de 4 bar. El CO₂ se suministró mediante botellas de acero de 50 l, como se aprecia en la instalación del sistema completo de la Figura 8.



Figura 7. Dosificadores de dióxido de carbono.



Figura 8. Incorporación del sistema de fertilización carbónica en el cabezal de riego.

2.3. Diseño de Experimentos.

Durante los meses de julio y agosto de 2009 se modificó el cabezal de riego y se instaló el equipo de dosificación y disolución del CO₂ representado en la Figura 7 y la Figura 8. En mayo de 2010, se realizaron tres ensayos fundamentales que habrían de servir de control para el resto de los análisis: *agua, suelo, y hojas*

En septiembre de 2010 empezó la fase experimental de este estudio que se dio por concluida en junio de 2015, abarcando, por tanto, casi cinco años.

Todos estos análisis se realizaron en laboratorios autorizados por la Conselleria de Agricultura, Pesca y Alimentación de la Generalitat Valenciana.

El cuadro de la Tabla 2 especifica todos los ensayos realizados. El diseño de la experiencia planteaba análisis de suelo y hojas cada trimestre, coincidiendo con el final de cada estación. Las mediciones de frutos se realizaron entre los meses de octubre y febrero de cada campaña dependiendo de su estado de desarrollo. Las observaciones de floración se efectuaron en los meses de marzo y abril de cada campaña. Las mediciones de superficie foliar y de dióxido de carbono se realizaron al final de cada estación, coincidiendo con los análisis de suelos y hojas.

Durante los cinco años de este estudio y, de manera periódica, se realizaron los siguientes ensayos:

- Agua, con los parámetros especificados en la Tabla 3.
- Suelo, con los parámetros especificados en la Tabla 4.
- Hojas, con los parámetros especificados en la Tabla 5.
- Estimación de superficie Foliar, mediante medición directa de una muestra aleatoria de hojas. (Figura 12)
- CO₂ ambiental durante el riego, con un sensor de medida (Figura 9)
- Frutos, con los parámetros especificados en la Tabla 6.
- Floración por Conteo directo.

Tabla 2. Calendario de análisis y medidas realizadas a lo largo de la experiencia.

ANÁLISIS	2010				2011				2012				2013				2014				2015
	P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I	P	V	O	I	
Agua																					
Análisis Suelo																					
Análisis Hojas																					
CO2																					
Frutos																					
Superficie Foliar																					
Floración																					
	1ª CAMPAÑA				2ª CAMPAÑA				3ª CAMPAÑA				4ª CAMPAÑA				5ª CAMPAÑA				

Tabla 3. Parámetros estimados en los análisis de agua de riego.

Factores Químicos	Otros Elementos	IONES PERJUDICIALES	CLASIFICACIONES
• pH	• Fósforo (ppm)	• Cloruros (ppm)	• Conductividad (mmho/cm)
• Nitrógeno Amoniacal (ppm)	• Hierro (ppm)	• Sulfatos (ppm)	• Sales Totales (ppm)
• Nitrógeno Nítrico (ppm)	• Manganeso (ppm)	• Carbonatos (ppm)	• Índice de Scott (pulgadas)
• Bicarbonatos (ppm)	• Cinc (ppm)	• Sodio(ppm)	• Dureza (°fH)
• Calcio (ppm)	• Cobre (ppm)		• Clasificación Riverside
• Magnesio (ppm)	• Boro (ppm)		• S.A.R.
• Potasio (ppm)	• Molibdeno (ppm)		• S.A.R. ajustado
	• Aluminio (ppm)		• Relación de Sodio
			• Relación de Calcio

Tabla 4. Propiedades medidas en los análisis de suelos.

Características Físicas	Cationes de Cambio
• Color (Tabla Munsell)	• Calcio +2 (meq/100 g)
• Arena (2-0,02 mm)	• Magnesio +2 (meq/100 g)
• Limo (0,02-0,002)	• Potasio + (meq/100 g)
• Arcilla(<0,002)	Factores Problemáticos
• Textura (USDA)	• Conductividad ex 1/5 (mmohs/cm)
Características Químicas	• Cloruros (Cl-) ex 1/5 (meq/L)
• pH	• Sodio (Na) (meq/100 g)
• Materia Orgánica oxidable (%)	• Carbonato tot.exp.caliza (%)
• Carbono Orgánico (%)	• Caliza activa (%)
• Nitrógeno (N) Total (%)	
• Relación C/N	
• Fósforo (P) sol. Bicarb (ppm)	
• Potasio (K) extr. Acetato (ppm)	

Tabla 5. Elementos extraídos en análisis foliares.

Elementos esenciales	Oligoelementos
• Nitrógeno N (%)	• Hierro Fe (ppm)
• Fósforo P (%)	• Manganeso Mn (ppm)
• Potasio K (%)	• Cinc Zn (ppm)
• Calcio Ca (%)	• Cobre Co (ppm)
• Magnesio Mg (%)	• Boro B (ppm)
• Sodio Na (%)	• Molibdeno Mo (ppm)
	• Aluminio Al (ppm)

Tabla 6. Medidas efectuadas sobre los frutos.

• Azúcares (° Brix)
• pH
• Porcentaje de Ácidos (%)
• Índice de madurez (SST/% ácidos)
• Calibre (mm)
• Peso (g)

Todas las medidas especificadas en las Tablas 3, 4, y 5 fueron realizadas por un laboratorio autorizado. El resto de las mediciones incluidas en la Tabla 2 -dióxido de carbono ambiental, superficie foliar, frutos, y floración- se llevaron a cabo siguiendo la metodología descrita en detalle en los puntos 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10.

2.4. Estimación de la concentración de dióxido de carbono ambiental.

Para medir la concentración aproximada de dióxido de carbono ambiental, se utilizó un controlador ambiental de CO₂ CDL 210 (Wöhler, Bad Wünnenberg, Alemania), capacitado para registrar 5300 series de valores de CO₂ con indicación de temperatura y humedad. Este sensor es de diseño compacto, lo que permite su manejo y transporte. El rango de medición del sensor alcanza las 6000 ppm. Las especificaciones técnicas del medidor Wöhler (Figura 9) se incluyen en la Tabla 7.

Tabla 7. Especificaciones técnicas del sensor de medida de CO₂.

Medidor de CO₂ Wöhler CDL 210	
Rango de medición de CO₂	0 ... 6000 ppm CO ₂
Precisión CO ₂	50 ppm ±5 %
Resolución	1 ppm
Principio de medición	Procedimiento NDIR (analizador no dispersivo por absorción en los infrarrojos)
Temperatura	-10 ... +60 °C
Precisión temperatura	±0,6 °C
Resolución	0,1 °C
Humedad del aire	5 ... 95 %
Precisión	±3 % (10 – 90%) 5 % (otros valores)
Resolución	0,1 %
Pantalla	Indicación simultánea de la concentración de CO ₂ , la temperatura y la humedad relativa
Valoración de las condiciones climáticas	Good (óptimo); Normal (normal) Poor (crítico)
Memoria	5300 series de valores
Datos	hasta 16000
Cuota de medición	3 / 10 / 30 segundos 1 / 3 / 10 / 30 minutos 1 / 3 / 4 horas
Alimentación	Componente de red AC 5 V / 0,5 A Batería Portátil de 4 x 1.2 V
Conexión al PC	Puerto USB
Dimensiones	120 x 100 x 110 mm



Figura 9. Sensor de medida de CO₂ Wöhler CDL 210.

Con objeto de conocer los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera y de apreciar posibles interacciones entre el suelo y la atmósfera, se realizaron mediciones de CO₂ tanto a la intemperie como en atmósfera confinada. Para los ensayos en atmósfera confinada se construyó un túnel de aproximadamente 2 m² de superficie cubierta con plástico no transpirable en la que se tomaron medidas de CO₂ tras regar con agua carbonatada, tal como muestra la Figura 10. El túnel consta de una estructura ligera de aros de acero ubicados a intervalos regulares, cubierta con una lámina de polietileno, y sujeta en los extremos mediante un cordón. Para su construcción se utilizaron varillas de 1,8 mm de diámetro de acero formando un arco de altura 20 cm cuyos extremos se fijaron al suelo. Como cubierta se utilizó lámina de polietileno coextruida (tricapa) de larga duración de 100 micrones, adecuada para el confinamiento del gas. El túnel se selló con tierra por los laterales y los fondos. Se realizaron mediciones exclusivamente de CO₂ atmosférico.



Figura 10. Cámara para la medida de CO₂ en ambiente controlado.

El muestreo del CO₂ se realizó tomando cinco medidas aleatorias en los días señalados en el calendario de la Tabla 2, incluyendo la zona de influencia de la red de riego con CO₂, las filas contiguas, y otras zonas distribuidas aleatoriamente en la parcela. También se han realizado medidas de CO₂ atmosférico en los alrededores de la finca ensayada, donde la vegetación es reducida y es posible verificar si con el tratamiento efectuado se produce un aumento de la concentración de CO₂ atmosférico.

Esta experiencia quería poner de manifiesto la posible pérdida de dióxido de carbono del agua de riego una vez saliera fuera de la red de riego a través de los goteros. Para ello se instaló el túnel de tal manera que al menos uno de los goteros quedara dentro del mismo y, periódicamente (cada estación) el sensor de medida de CO₂ registraba el aumento de la concentración de CO₂ durante todo ese periodo.

La Figura 11 muestra en un esquema todos los elementos: la cámara, la tubería de riego y el medidor de CO₂.

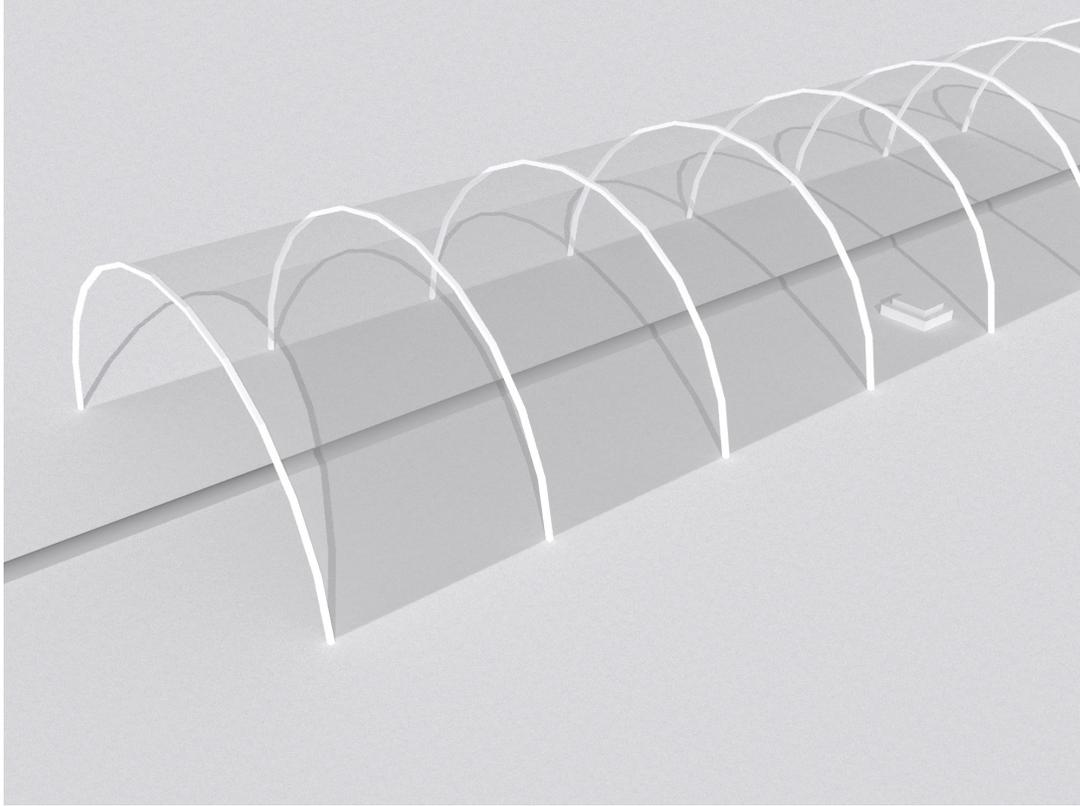


Figura 11. Esquema de la medición ambiental en cámara.

2.5. Medición de área foliar.

La determinación de la superficie foliar se realizó mediante la selección y numeración de cincuenta hojas (siguiendo el protocolo de Legaz et al., 1990) de aproximadamente la misma edad pertenecientes a ramas sin flor, seleccionando específicamente la tercera hoja de brotes ubicados en los cuatro puntos cardinales a diferentes alturas. Este procedimiento se siguió tanto para las muestras ensayadas como para los patrones de control. Todas Las mediciones de área foliar se llevaron a cabo con el medidor Li-Cor LI-3100 de la Figura 12 (LiCor, Lincoln, NE, EEUU), cuyas características técnicas se muestran en la Tabla 8 y que fue facilitado por el IVIA (Moncada, Valencia).

Tabla 8. Especificaciones técnicas del medidor de área foliar Li-Cor LI 3100.

Características Técnicas	
Resolución	Seleccionable de 0.1 ó 1 mm ² .
Precisión	Con resolución de 0.1 mm ² de 0.5% en 10 cm y ±1% en 5 cm ² ; 1,5% en 0.5cm ² y de ±4% en 0.25 cm ² . Con resolución de 1mm ² de 1% en 10 cm ² , 2% en 5 cm ² ; ±5% en 1.0 cm ² y ±7% en 0.5 cm ² .
Capacidad de integración del display	999.999,99 cm ² con resolución de 1 mm ² y de 99.999,999 cm ² con resolución de 0.1 cm ² .
Dimensiones de las muestras admitidas	Con resolución de 1 mm ² admite muestras de 25.4 cm de ancho como máximo y de 1.5 a 3.0 mm como mínimo, con resolución 0.1 mm ² admite muestras de 7.5 cm de ancho máximo y 0.5 a 1.5 mm de ancho mínimo. El espesor admitido es regulable por el usuario hasta 2 cm, expandible por el usuario hasta 2.5 cm.
Largo admitido	Ilimitado hasta completar el área integrada máxima.

Cada una de las hojas se pasa por el medidor de área foliar, efectuando éste una medición de la superficie (mediante comparación entre la luz emitida y la reflejada por la hoja) que se registra directamente en la unidad informática directamente conectada. Una hoja estándar tiene una superficie aproximada de unos 20 cm², tal como se puede ver en la Figura 13.

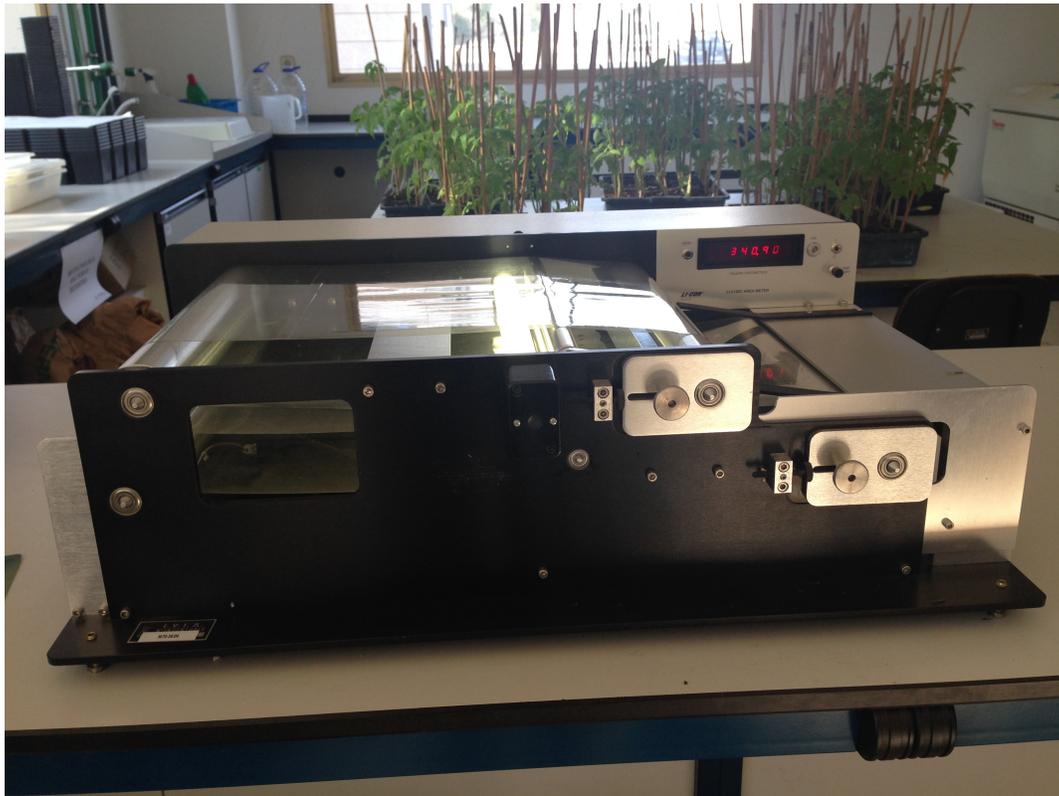


Figura 12. Medidor de área foliar LiCor LI 3100.



Figura 13. Hojas típicas.

Las hojas se pasan una a una por la medidor, tal y como se ve en la Figura 14.

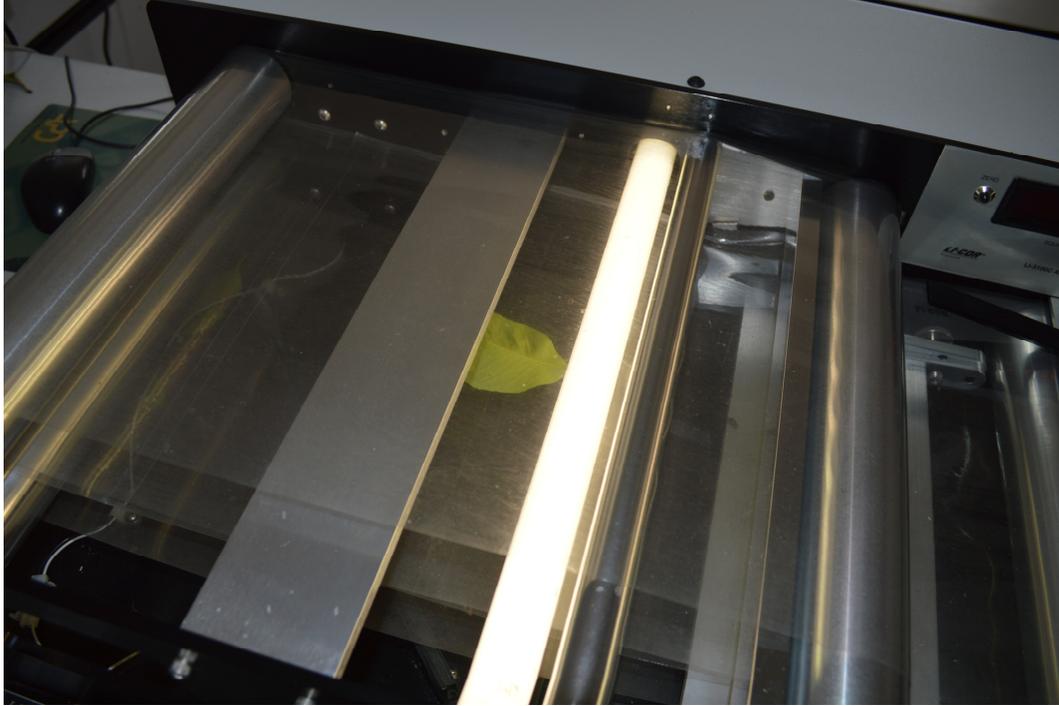


Figura 14. Medición de una hoja con el Medidor LiCor LI 3100.

Las mediciones fluctuaban, normalmente entre 40 y 15 cm², como puede verse en la Figura 15.



Figura 15. Resultados de medición de superficies.

2.6. Medición del pH.

La determinación del pH del agua de riego se realizó manualmente mediante el peachímetro PCE – PH 22 de la Figura 16 (PCE, Durham, Reino Unido), cuyas características principales se muestran en la Tabla 9. El peachímetro PCE – PH 22 es resistente al agua y detecta de forma rápida y precisa valores de pH y temperatura. Gracias a la carcasa robusta y resistente al agua (IP 67), este medidor pH puede ser usado bajo circunstancias adversas. En este peachímetro el electrodo está integrado en la carcasa y los valores de medición se ajustan gracias a la compensación de temperatura automática. Para la obtención de medidas fiables, es necesario calibrar el sensor con frecuencia.



Figura 16. Peachímetro PCE – PH 22.

Tabla 9. Especificaciones técnicas del peachímetro PCE – PH 22.

Especificaciones técnicas del peachímetro PCE-PH 22.	
Rangos de medición	0,0 ... 14,0 pH; -5 ... +80,0 °C
Resolución	0,01 pH; 0,1 °C
Precisión	± 0,02 pH; ± 0,8 °C
Calibración	automática en pH 4,7 ó 10
Compensación de temperatura	-5 ... +80 °C
Pantalla	pantalla LCD de 4 dígitos
Condiciones ambientales	0 ... + 60 °C / <80 % HR
Dimensiones	186 x 40 mm
Alimentación	4 baterías de 1,5 V AAA
Peso	130 gr

Para establecer el pH inicial del agua de riego en la parcela experimental, se realizaron medidas iniciales de agua tanto en laboratorio como en campo. Se tomó finalmente como referencia un valor de pH 7,90 para el agua de riego. Las mediciones del pH del agua de riego carbonatada como consecuencia de la fertirrigación carbónica se realizaron a diferentes horas de la mañana y con diferentes temperaturas, pues la solubilidad del CO₂ en el agua varía con la temperatura, según se indica la Figura 17. El pH del agua saturada con CO₂ fue de 5,40. Se observó que con un valor de pH más bajo no se conseguía una mayor dilución de dióxido de carbono, ya que el agua estaba saturada.

La solubilidad del dióxido de carbono - CO₂ - en el agua

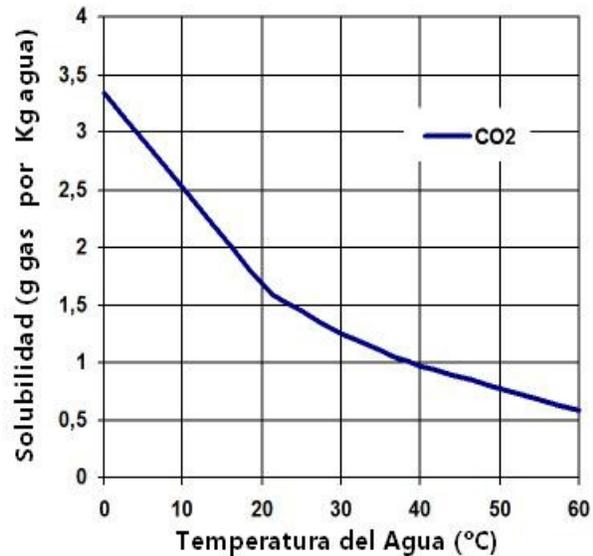


Figura 17. Solubilidad de dióxido de carbono en agua (Perry y Green, 2001).

Cuando se disuelve el dióxido de carbono en el agua de riego, se produce una disminución del pH al hidratarse la molécula de CO₂ para dar la especie H₂CO₃. Puesto que este ácido se encuentra en un medio con un pH ácido, y en presencia de iones bicarbonato, se producirá una disociación del ácido que comenzará a aportar hidrogeniones (H⁺) al medio, variando el pH hasta que se restablezca un nuevo equilibrio. La reacción que tiene lugar es la dada en la Ecuación 1 (Housecroft y Sharpe, 2006). La solubilidad del dióxido de carbono, como la de todos los gases, varía de manera inversamente proporcional con la temperatura. Así, para una temperatura de 20°C, la solubilidad es de aproximadamente 1.550 mg/l. (Perry y Green, 2001)



Teniendo en cuenta estos factores, el procedimiento para disolver el CO₂ en el agua de riego y calcular la dosis aplicada fue el siguiente:

1. Mediante los análisis de agua iniciales se estimó el pH del agua de riego y su contenido en Bicarbonatos. El pH resultó ser de **7.90** y el contenido en HCO₃⁻ de **175** mg/l. Se aplicó una dosis de hasta 7 l/min de CO₂ a una presión de 3.5 bar. Dado que la presión de la red de riego utilizada es de 3 bar, por debajo de este valor no es posible la disolución del CO₂, al no poder entrar en la red de riego debido a las diferencias de presión. Adicionalmente, se comprobó que el

agua de riego no admitía un caudal mayor de CO₂ debido a la cavitación del gas en la tubería a nivel de los goteros.

2. Se midió el pH en estas condiciones, dando un valor medio de **5,70**.
3. Aplicando las ecuaciones de equilibrio del CO₂ – H₂CO₃ (Ec. 1 y 2) se calculó la dosis de dióxido de carbono disuelto en el agua de riego, dando un valor de 1203.51 mg/l de CO₂ para una temperatura de 21°C. Como se observa en la Figura 17 este valor está relativamente próximo al de saturación (aproximadamente 1.45 g/l a 25°C y 1 atm de presión).

La dosis inyectada de dióxido de carbono se mantuvo relativamente estable a lo largo de toda la experiencia, pues se intentó mitigar el efecto de la temperatura realizando la fertirrigación a primeras horas de la mañana, entre las 8 y las 10 h. La Tabla 10 resume todos los cálculos efectuados para estimar la cantidad real de CO₂ añadido al agua de riego.

Tabla 10. Cálculo de la concentración de CO₂ en el agua de riego.

pH inicial del agua	7,90
[HCO ₃ ⁻]	175,00 mg/l
[HCO ₃ ⁻]	2,869 • 10 ⁻³ M
[H ⁺]	1,26E-08
[H ₂ CO ₃]	8,664 • 10 ⁻⁵ M
pH final del agua	5,40
x (grado disociación)	3,96848 • 10 ⁻⁶
[HCO ₃ ⁻]	2,873 • 10 ⁻³ M
[H ⁺]	3,98 • 10 ⁻⁶ M
[H ₂ CO ₃]	2,74 • 10 ⁻² M
[CO ₂ añadido]	2,74 • 10 ⁻² M
CO₂	1.203,51 mg/l

Así, por ejemplo, para el cálculo de la concentración de dióxido de carbono en el agua de riego del día 10 de junio de 2010, se partió del análisis de agua efectuado el 21 de mayo de 2010. En ellos se observa que el pH inicial del agua de riego es 7.90 y que la concentración de bicarbonatos (HCO₃⁻) es de 175 mg/l. Este valor nos lleva al cálculo de la concentración molar de HCO₃⁻, aplicando la ecuación 3.

$$C_M = m \times PM^{-1} \times V^{-1} \quad (3)$$

Donde C_M es la concentración Molar del soluto, m es la masa del soluto en gramos, P_m el peso molecular del soluto y V el volumen del disolvente.

Una vez conocida la concentración molar de bicarbonato, el valor del CO_2 es inmediato a partir de las ecuaciones 3 y 4.

$$K_{a,1} = [\text{H}^+] \times [\text{HCO}_3^-] / [\text{CO}_2] \quad (4)$$

La Tabla 10 resume todo el proceso descrito.

2.7. Análisis y control de floración.

El análisis de floración en los naranjos monitorizados pretende determinar posibles efectos del CO₂ en la floración de los cítricos sometidos a la fertirrigación carbónica, mediante la observación visual y comparación de los cítricos ensayados con los cítricos de control. En cada una de las campañas en estudio se realizaron un total de cuatro ensayos durante los meses de marzo y abril, siguiendo el protocolo establecido por Agustí et al. (1992).

Este protocolo emplea la codificación BBCH para los estadios fenológicos del desarrollo de los cítricos. La escala BBCH se basa en un código decimal que identifica el desarrollo de las plantas mono y dicotiledóneas con estadios principales y secundarios. En la escala BBCH, los estadios principales son 10, iniciándose con la germinación o brotación (estadio 0), según la planta, y finalizando con la muerte o el inicio de la latencia (estadio 9). Al desarrollo vegetativo se le asignan dos macroestadios, correspondientes al desarrollo de las hojas (estadio 1) y de los brotes (estadio 3), éste último compartido con el desarrollo de las flores (estadio 5). La floración (estadio 6) y el desarrollo del fruto (estadio 7) completan el código. Los estadios secundarios también se numeran del 0 al 9, correspondiéndose con valores ordinales o porcentuales del desarrollo. Para el establecimiento del periodo fenológico en que se encontraban los árboles se realizó un conteo a diferentes alturas de cada árbol (0.5, 1 y 1.5 m del suelo) de cuántas flores se encontraban en cada una de las fases, determinándose así como en qué periodo estaba cada árbol. El periodo predominante de los diferentes árboles muestreados estableció el periodo fenológico final de cada una de las parcelas estudiadas.

2.8. Mediciones en frutos.

El objetivo último de la fertilización carbónica es un aumento de producción y mejora de las propiedades de los frutos, por lo tanto las mediciones efectuadas sobre los frutos son fundamentales para evaluar y, en lo posible, validar la tecnología propuesta. A tal efecto, se realizaron diferentes mediciones en los frutos durante su desarrollo a lo largo de toda la experiencia. En particular se estimó el *peso*, el *calibre* y el *índice de madurez*. El *índice de madurez* es el parámetro normalmente utilizado para el seguimiento de la maduración de los cítricos (Rodrigo et al., 2014.) Se expresa por la relación entre el extracto seco y la acidez expresada en gramos de ácido cítrico por 100 cm³ de zumo. Para la determinación del extracto seco se utilizó el refractómetro digital de la Figura 18. Para la determinación del pH se valoraron 5 cm³ de zumo con hidróxido sódico 0,1 normal (NaOH 0,1 N), calculando los gramos de ácido cítrico neutralizados en función de los centímetros cúbicos de sosa consumidos. Así, el índice de madurez se midió a partir del contenido en azúcares del zumo, del pH del zumo, y del volumen de hidróxido sódico gastado al valorar una muestra del zumo. El contenido en azúcares se midió con el refractómetro digital Eclipse modelo DR-103 (Bellingham-Stanley Ltd, Tunbridge Wells, Reino Unido) mostrado en la Figura 18. El refractómetro tienen una precisión de 0.2 °Brix y su rango de medida está comprendido entre 0 y 35 °Brix. La cuantificación del *ácido cítrico* se llevó a cabo en el valorador de la Figura 19, modelo pH Burette 24 (Crison Instruments S.A., Barcelona, España) a la que se le añadió el zumo a valorar junto con una concentración 0.5 N de hidróxido sódico (sosa cáustica). El valorador tiene un rango de medida entre -2 y 16 en la escala pH y una precisión de 0.02 pH. El peso de los frutos se estimó con una balanza de laboratorio y el calibre se midió mediante un pie de rey.



Figura 18. Refractómetro digital utilizado para medir el contenido en azúcares.



Figura 19. Valorador ácido-base para estimar el índice de madurez en cítricos.

2.9. Métodos Analíticos empleados en el análisis de suelos.

Al principio de la fase experimental y al final de cada una de las estaciones (Tabla 2) se tomaron muestras de suelo que fueron analizadas por laboratorios especializados con el objetivo de conocer las variaciones de las características físico-químicas del suelo del ensayo, y así compararlo con la muestra de referencia obtenida al inicio de la fase experimental. Los parámetros controlados se muestran en la Tabla 4, siguiendo las recomendaciones de Primo-Millo et Al. (1995)

Las muestras de suelo se tomaron justo debajo de los goteros, avanzando a lo largo de las calles entre filas de naranjos tomando, al azar, muestras cada 2 metros (la distancia entre goteros es de 0.5 metros) retirando la capa superficial y cogiendo una muestra de 1 kilo de suelo procedente de mezclar varias extracciones, siempre más de diez, libres de palos, piedras, hierba, etc. El laboratorio de análisis G.E. COTA2 S.L. entidad acreditada tanto por la Conselleria de Agricultura, Pesca y Alimentación como por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC), donde se realizaron los análisis de suelos, facilitó los parámetros especificados en la Tabla 4.

2.10. Métodos Analíticos empleados en el análisis de hojas.

Los análisis edafológicos se complementaron con análisis foliares realizados de manera simultánea y en los mismos laboratorios homologados. Los análisis foliares aportaron información cuantitativa sobre los principales nutrientes absorbidos por los árboles. Como en los casos anteriores, se tomaron muestras de los cítricos ensayados y de una muestra que se consideró como control. Esta muestra se compuso a partir de una mezcla de unas 10 hojas por árbol, alcanzando un total de unas 100 hojas por muestra. Las hojas seleccionadas se tomaron de la periferia del árbol, a diferentes alturas y en todas las orientaciones (Primo-Millo et al., 1995). Los elementos analizados se muestran en la Tabla 5.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1. Planteamiento Estadístico.

Pese a ser especialmente interesante, no entraba dentro del planteamiento de esta tesis el valorar las repercusiones de esta práctica dependiendo de la textura del suelo, la variedad de cítricos, el plantón o distintas prácticas culturales. Es por ello que la aplicación del dióxido de carbono se efectuó únicamente en una fila de árboles en la que había 64 ejemplares con características homogéneas de suelo (textura franca), de material vegetal (mandarinos Nadorcott sobre citrange carrizo) y de prácticas culturales (tanto fertilización, como riegos, escardas o aplicación de productos fitosanitarios). Así, como árboles indicadores, tomados como referencia para valorar las repercusiones de la práctica estudiada, se tomaron muestras de las filas adyacentes a la ensayada (con el mismo tipo de suelo y de variedades plantadas). La toma de muestras de otras zonas de la parcela, con diferente textura de suelo, patrón o incluso altura ya habría supuesto el entrar a valorar las repercusiones de la interacción de todos estos parámetros, lo que hubiera requerido de un diseño de experimento tipo 2^k . Dado que el objetivo planteado pretendía únicamente analizar si disolver CO_2 en el agua de riego tenía algún tipo de repercusión agronómica el realizar una experiencia como la mencionada quedaba fuera del alcance del mismo. La dosis de CO_2 disuelto en el agua de riego fue uniforme y única a lo largo de toda la experiencia. La valoración de las repercusiones del uso de diferentes dosis de dióxido de carbono (y sobre todo de su repercusión económica) sería una más de las variables a considerar en un diseño tipo 2^k . Se plantea éste como un futuro desarrollo experimental de esta práctica, habida cuenta de los resultados de esta experiencia y de la necesidad de encontrar sumideros de CO_2 que puedan servir como vía de disminuir las emisiones antropogénicas de este gas. De igual manera, el plantear una dosis diferente a la saturación está fuera de los planteamientos del proyecto, ya que, si con la dosis máxima los efectos bibliográficos relatados no son demasiado elevados, con una dosis inferior las consecuencias esperadas serían poco apreciables.

El diseño de experimento planteado sigue las recomendaciones de Romero y Zúñiga (2005) para ensayos con replicación para el estudio de la repercusión de un solo factor y se analizarán mediante la técnica estadística del Análisis de Varianza (ANOVA). Desarrollado por Fischer, el ANOVA constituye la técnica básica para el estudio de observaciones que dependen de varios factores, siendo la herramienta fundamental en el análisis de los modelos de Regresión Lineal y de Diseño de Experimentos. Permite conocer el efecto de uno o más factores (el CO_2) sobre la media de una variable.

Para el cálculo comparativo del efecto de la inyección de dióxido de carbono en la media de los ensayos se realizó el test t de Student tras la comprobación de la normalidad de los datos mediante el test de Saphiro-Wilks, que constató la ausencia de una autocorrelación significativa que hubiera indicado la falta de independencia de los datos .

3.2. Análisis e Interferencia de CO₂ ambiental.

Los ensayos realizados **no muestran unos niveles anómalos de CO₂ atmosférico** cuando el sistema de riego está en funcionamiento. Sí que se desprende dióxido de carbono, como era previsible (Perry et al., 2001, pero ya a un metro de altura la concentración de dióxido de carbono en la línea de goteros es la misma que en un punto aleatorio de la parcela.

Todos los ensayos realizados, uno cada trimestre, muestran datos análogos. En la Tabla 11 se muestran las medias y las desviaciones estándar de los datos obtenidos en los diferentes ensayos.

Tabla 11. Medición de CO₂ al aire libre.

TOMA DE MUESTRAS	CO ₂ atmosférico (ppm)	Desviación Estándar σ (ppm)
Medición de Referencia (aleatoria)	384	1.414
En línea de goteros (cualquier punto)	395	1.732
Justo al lado de un gotero en riego	431	0,957
En Línea de goteros 1 m altura	394	1,708
En Línea de goteros 2 m altura	391	0,816

Las mediciones dentro de la campana de la Figura 10 muestran unos resultados similares. Se observa cómo, tras el riego, los niveles de dióxido de carbono van disminuyendo hasta los valores de referencia. En la gráfica de la Figura 20 se muestran los valores obtenidos en uno de los ensayos. La inyección de CO₂ (riego) se produjo a las 8:45, por eso se observa un pico de CO₂ a las 9 h. El resto de muestras efectuadas dieron resultados similares, aunque, como se puede observar, los valores de CO₂ ambiental fluctúan de manera considerable a lo largo de un día. Tal y como puede comprobarse, existe una pérdida relativa del CO₂ disuelto en el agua una vez ésta sale a través de los goteros, lo que explica el pico observado a las 9h.

Medición CO₂ en Campana

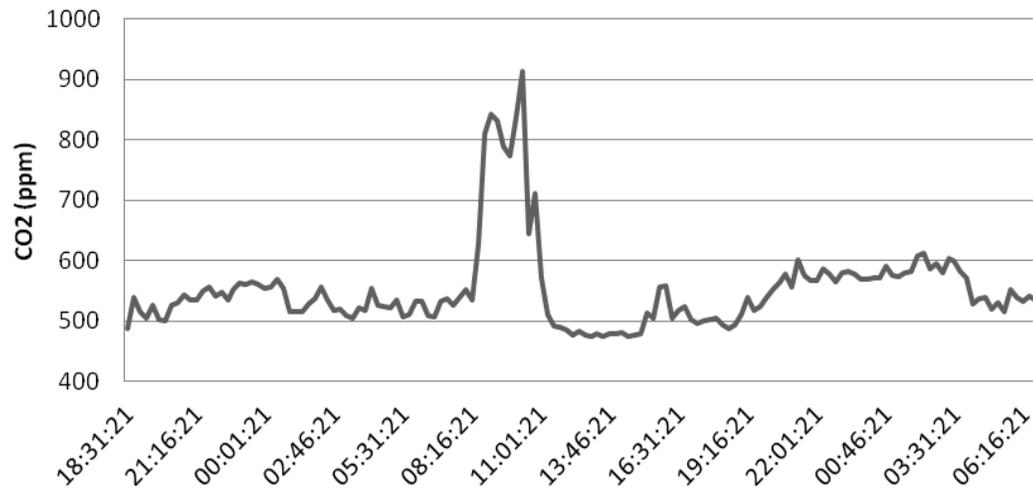


Figura 20. Medición de CO₂ en campana.

El enriquecimiento del CO₂ atmosférico es una práctica común en invernaderos y cultivos forzados y tiene por objeto incrementar el rendimiento de la cosecha (Nilsen et Al. 1983). La realización de la medida del CO₂ desprendido en el momento del riego pretendía valorar si los niveles de este gas en la atmósfera eran suficientemente elevados como para tener una repercusión agronómica relevante **vía aérea**. Es decir, se pretendía comprobar que los resultados obtenidos en toda la experiencia fueran debidos exclusivamente al CO₂ suministrado vía riego y no al incremento del CO₂ atmosférico proveniente del agua. Los datos indicaron que era así, es decir, el incremento del CO₂ atmosférico era muy bajo y localizado exclusivamente en las proximidades de los goteros. A cotas relativamente bajas (1 metro) los niveles de dióxido de carbono eran normales, como se puede ver en la Tabla 11. **Así pues, cualquier posible repercusión del CO₂ ha sido causada vía raíces y no vía atmosférica.**

3.3. Medición de área foliar.

Con este análisis se pretende valorar cualquier diferencia en el desarrollo vegetativo de los árboles sometidos a fertirrigación carbónica con respecto a los tomados como control. Se realizaron análisis trimestralmente, tal y como se muestra en la Tabla 2. Se llevaron a cabo dos estudios:

Primer Estudio: La comparativa entre control y ensayo realizada trimestre a trimestre. Para cada una de las series se realizó un test ANOVA, estableciéndose para cada comparativa el valor F. El valor de la distribución F es conocido y está tabulado, si este valor F calculado supera el valor F tabulado, diremos que las diferencias son estadísticamente significativas (Romero y Zúnica, 2005)

De las 17 medidas realizadas, sólo 2 mostraron unos valores de F superiores a los tabulados, es decir, sólo en dos casos hubo diferencias significativas entre la media de la superficie foliar de las hojas tomadas al azar de los árboles ensayados (en un número nunca inferior a 50) y la media de los arboles tomados como control. Los dos resultados discordantes ocurrieron en los trimestres de septiembre de 2011 y junio de 2014, separados en estación (otoño y verano) y año, por tanto deben de atribuirse a la propia variabilidad de los datos, como se muestra en la Tabla 12 o bien a errores de medida, que, en cualquier caso, no alteran los resultados del estudio.

Tabla 12. Medidas de área foliar.

	nov-10	abr-11	jun-11	sep-11	dic-11	mar-12	jun-12	sep-12	dic-12	jun-13	oct-13	mar-14	jun-14	sep-14	dic-14
Testigo (mm²)	24979,9	19593,2	20626,0	21062,9	22040,5	23585,7	22334,0	21087,3	18827,8	23026,7	23734,4	21681,9	20477,7	24036,9	20311,6
CO2 (mm²)	26923,9	19952,1	20779,5	24656,8	22160,8	25343,1	24003,4	20604,8	20455,9	26507,2	22225,0	24411,1	35051,3	23609,3	18689,7
F ca	1,5611	0,0533	0,0113	4,9748	0,0061	1,2129	0,6768	0,1062	1,2007	0,0925	1,3639	3,8734	113,206	0,0580	1,1503
F ref	3,9381	3,9402	3,9371	3,9251	3,9129	3,9258	3,9361	3,9222	3,9195	3,9307	3,9097	3,9195	3,9046	3,9201	3,9002

Segundo Estudio. La evolución de la media obtenida a lo largo de toda la experiencia de casi cinco años, tanto para control como para el ensayo. La Figura 21 muestra la evolución de este valor:

Evolución de la Superficie Foliar (mm²)

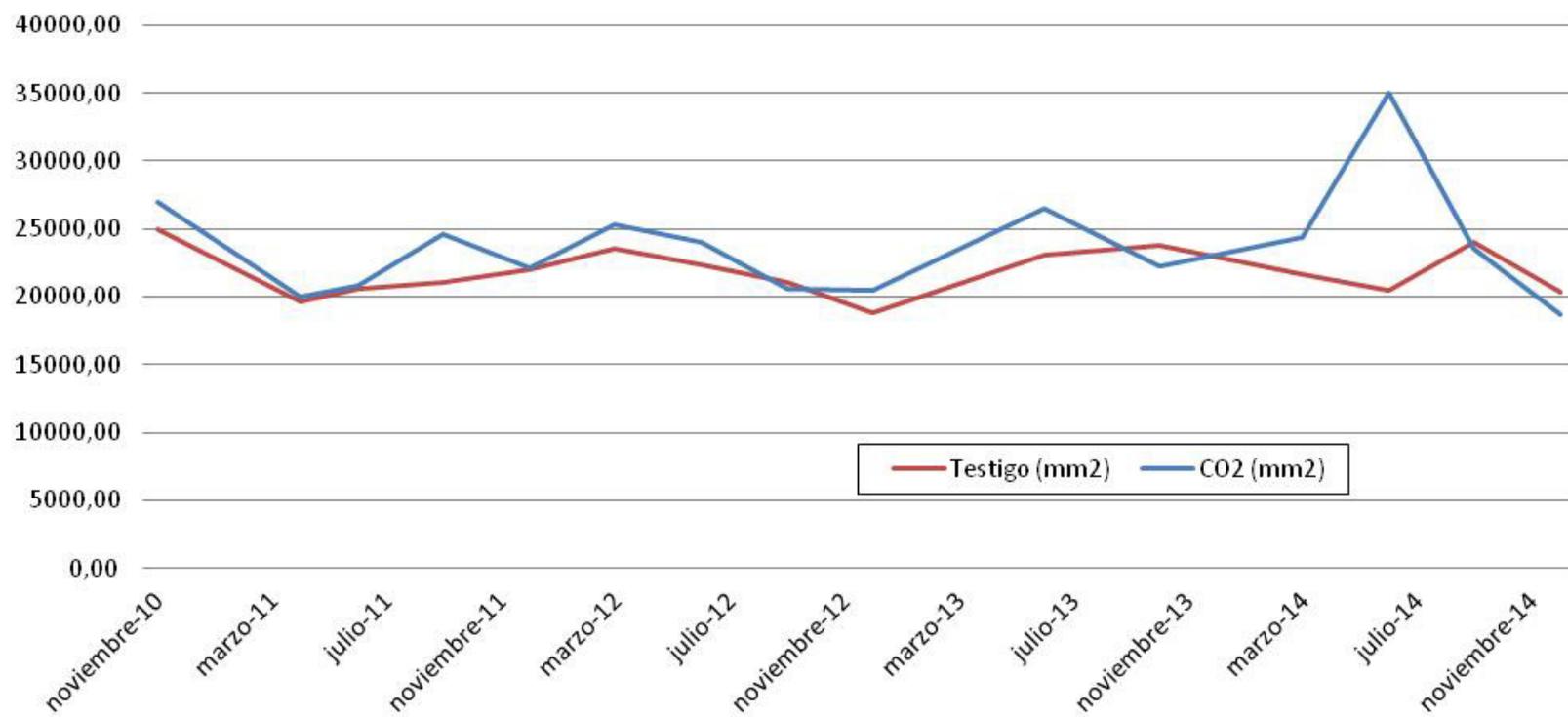


Figura 21. Evolución de la Superficie Foliar desde 2010 a 2015

Como indica la gráfica. La evolución de las dos muestras no presenta ningún tipo de evolución o crecimiento diferente, por tanto podemos concluir que la **fertirrigación carbónica no ha estimulado el crecimiento vegetativo de los árboles.**

3.4. Estudio de Alteración de floración.

El seguimiento de los estados fenológicos en cítricos, como ya se ha comentado, se efectúa mediante la realización de observaciones subjetivas de las plantas. Para ello, se siguió la codificación BBCH establecida por Agustí et al. (1992).

La dificultad de una observación objetiva y rigurosa debido a la complejidad en la valoración de los diferentes estadios y el hecho de que no se apreciara ningún tipo de diferencia entre las plantas ensayadas y las plantas control hicieron que sólo se realizaran ensayos durante los años 2011, 2012 y 2013.

Los resultados obtenidos para cada control se detallan a continuación.

3.4.1. Campaña 2011.

Control 1: 16 de marzo de 2011.

No se observaron diferencias en el estado de floración de las diferentes zonas. Prácticamente toda la plantación se encontraba en el estadio principal de desarrollo **5: desarrollo de las flores**. Más concretamente en el estadio **55**: las flores se hacen visibles, están todavía cerradas (botón verde) y se distribuyen aisladas o en racimos en inflorescencias con o sin hojas.

Control 2: 31 de marzo de 2011.

En la línea de árboles objeto del estudio, las fases fenológicas del arbolado variaron. Aproximadamente un 50% del arbolado tenía las flores en el estadio principal de desarrollo **6: floración**. Concretamente en el estadio **60**: primeras flores abiertas. El 50% del arbolado restante presentaba las yemas entre los estadios **60** y **59**: la mayoría de las flores con los pétalos cerrados adquieren la forma de una bola hueca y alargada. En las líneas contiguas a la ensayada, el estadio era claramente **60**. En el resto de la plantación se observaron estadios diferentes. Así, en filas con diferente orientación (hacia el norte) y distinta altura (más bajas) se llegó incluso a apreciar estadios anteriores: **56** (los pétalos crecen, los sépalos envuelven la mitad de la corona -botón blanco) e incluso **55** (las flores se hacen visibles: están todavía cerradas -botón verde- y se distribuyen aisladas o con racimos en inflorescencias con o sin hojas).

Control 3: 8 de abril de 2011.

Tanto en la línea ensayada como en las contiguas el índice de floración fue **65: plena floración**, alrededor del 50% de las flores están abiertas y empiezan a caer los primeros pétalos. Sin embargo, el porcentaje de flores abiertas en la línea objeto de estudio

resultó ser ligeramente menor del 50%, mientras que en las líneas contiguas el porcentaje fue algo superior al 50%.

Control 4: 15 de abril de 2011.

El Índice fenológico del área objeto de estudio fue del **67**: *las flores se marchitan*, la mayoría de los pétalos están cayendo.

Control 5: 26 de abril de 2011.

La línea objeto del estudio continuaba en el estadio **67**. Sin embargo, los árboles situados a mayor altura mostraron un mayor número de hojas marchitas que aquellos plantados a menor cota. En las filas contiguas la casuística fue la misma. El estadio mayoritario fue el **67**, sin embargo conforme se ganaba altura se incrementó el número de flores marchitas, así en las zonas más altas de la plantación el estadio de los árboles llegó al **69**: *fin de la floración*, han caído todos los pétalos.

3.4.2. Campaña 2012.

Control 1: 30 de marzo de 2012.

Aproximadamente un 50% de la línea en estudio tienen brotes que todavía no se han abierto, estadio **30**. Del resto la mitad (25% del total) están en fase de **51 a 55** (apertura hasta botón verde) y la otra mitad (el restante 25%) tienen el botón floral ya blanco (**56**). Las filas contiguas parecen ligeramente retrasadas respecto de la ensayada. Así, mientras que en la fila contigua superior se encuentra la misma casuística que la fila ensayada (50% **30**, 25% de **51 a 55** y 25% **56**), en la fila inferior parece haber una pequeña discordancia (60% en estadio **30**, 20% en estadio **51 a 55** y 20% en estadio **56**). **No se aprecian, por tanto, diferencias relevantes.**

Control 2: 8 de abril de 2012.

Toda el área objeto de estudio se encontraba en el estadio fenológico **61**: *comienza la floración*, alrededor del 10% de las flores están abiertas.

Control 3: 17 de abril de 2012.

El Índice fenológico del área objeto de estudio fue del **65**: *plena floración*, *alrededor del 50% de las flores están abiertas*. Sin embargo, la fila contigua inferior (en altura) a la ensayada muestra un retraso respecto de la primera, estadio **64**.

Control 4: 26 de abril de 2012.

Prácticamente toda el área objeto de estudio (la fila ensayada y las dos contiguas) estaban en el estadio fenológico **67**: *Las flores se marchitan: la mayoría de los pétalos está cayendo.*

3.4.3. Campaña 2013.

Control 1: 14 de marzo de 2013.

Sin diferencias relevantes en las filas observadas: tanto la fila objeto del ensayo como las dos contiguas se encontraban en el estadio **55**: *las flores se hacen visibles, están todavía cerradas (botón verde) y se distribuyen aisladas o en racimos en inflorescencias con o sin hojas.*

Control 2: 30 de marzo de 2013.

No existen diferencias en la zona estudiada, prácticamente todos las flores se encuentran en el estadio **60**.

Control 3: 17 de abril de 2013.

El Índice fenológico del área objeto de estudio fue del **65**: *plena floración, alrededor del 50% de las flores están abiertas.* Se aprecia, de todas maneras un retraso en las filas contiguas, especialmente en la inferior, que estaría en el estadio **64**.

Control 4: 29 de abril de 2013.

Prácticamente toda el área objeto de estudio se encontraba en la fase **67**: *Las flores se marchitan: la mayoría de los pétalos está cayendo.*

El análisis y control de la floración, tal y como se describe es demasiado subjetivo, al estar totalmente sujeto a las observaciones de la persona que efectúa los exámenes.

No obstante, no se observaron diferencias entre la fila ensayada y las tomadas como referencias, dentro de la subjetividad de las comprobaciones. Por tanto las observaciones de floración **también indican una falta de respuesta a la fertilización carbónica en términos de floración.**

En la Figura 22, Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26 y Figura 27 se muestran diferentes estadios fenológicos de los árboles estudiados y la Tabla 13 resume el análisis de la floración.



Figura 22. Estadio Fenológico 30: 50% de brotes no abiertos.



Figura 23. Estadio Fenológico 55: las flores se hacen visibles: están todavía cerradas – botón verde- y se distribuyen aisladas o con racimos en inflorescencias con o sin hojas.



Figura 24. Estadio Fenológico 59: la mayoría de las flores con los pétalos cerrados adquieren la forma de una bola hueca y alargada.



Figura 25. Estadio Fenológico 61: comienza la floración, alrededor del 10% de las flores están abiertas.



Figura 26. Estadio Fenológico 65: plena floración, alrededor del 50% de las flores están abiertas y empiezan a caer los primeros pétalos.



Figura 27. Estadio Fenológico 69: fin de la floración, han caído todos los pétalos.

Tabla 13. Resumen del estudio de la alteración de la floración.

	CAMPAÑA 2011					CAMPAÑA 2012				CAMPAÑA 2013			
CONTROL	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4
Fecha	16-mar	31-mar	08-abr	15-abr	26-abr	30-mar	08-abr	17-abr	26-abr	14-mar	30-mar	17-abr	29-abr
FF Control	55	60	65	67	67/69	30/55-56	61	65	67	55	60	65	67
FF Test	55	60/60-59	65	67	67	30/55-56	61	64	67	55	60	64	67
Dif Significativa	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO

3.5. Análisis de frutos.

Durante cuatro campañas consecutivas (2011 a 2014) se realizó un seguimiento exhaustivo de la evolución de varios parámetros clave con al menos la realización de tres controles por campaña, con un número de aproximadamente 30 naranjas por factor (riego+CO₂ y control).

Los cinco parámetros particulares que se midieron en este estudio fueron:

1. Porcentaje de azúcares, medidos como grados Brix.
2. pH del zumo.
3. Índice de Madurez, calculado a partir de los sólidos solubles totales (TSS) y del grado de acidez.
4. Calibre.
5. Peso.

Se han considerado éstos los parámetros más representativos e importantes para valorar los posibles efectos de las experiencias realizadas. No se han realizado ensayos de densidad de zumo ni de espesor de corteza ni de número de semillas al valorarse que su contribución a la experiencia no sería relevante.

Los resultados obtenidos se analizaron de dos maneras:

1. Mediante la evolución de cada parámetro a lo largo de cada campaña comprobando las posibles diferencias entre la muestra regada con dióxido de carbono y la tomada como referencia.
2. La realización de análisis de varianza entre la fila ensayada y la tomada como referencia para cada toma de datos (mínimo tres por campaña) entre cada uno de los parámetros estudiados.

Los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros estudiados se muestran en las siguientes gráficas. La Figura 28 muestra la evolución del porcentaje de azúcar medido en grados Brix para todo el periodo estudiado, tanto para las muestras fertilizadas como las testigos. La Figura 29 realiza la misma comparación pero para el pH del zumo. En la Figura 30 podemos observar la evolución del Índice de madurez, El calibre de las naranjas se ha representado en la Figura 31 y, finalmente la evolución del peso viene indicada en la Figura 32.

En todas las gráficas se muestra mediante el empleo de barras de error los valores de desviación estándar de cada serie de datos.

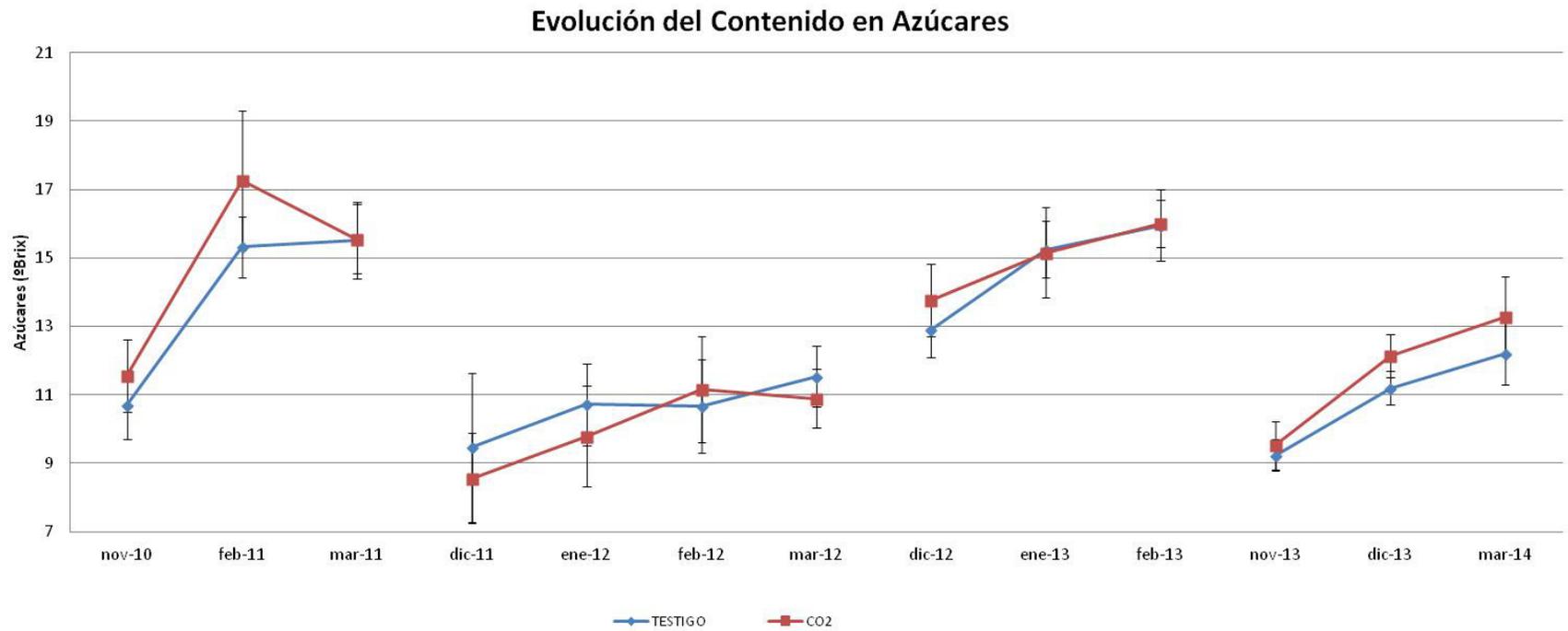


Figura 28. Evolución del Contenido en azúcares durante el estudio.

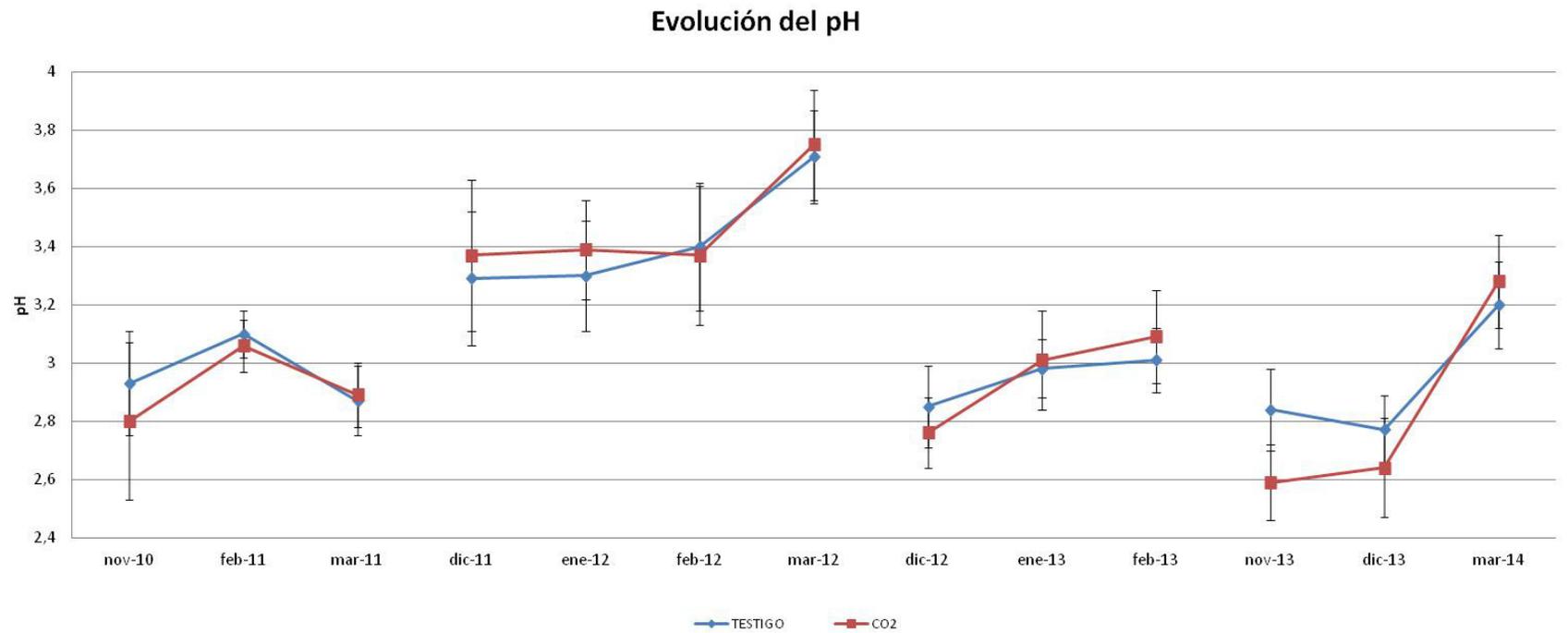


Figura 29. Evolución del pH del zumo durante el estudio.

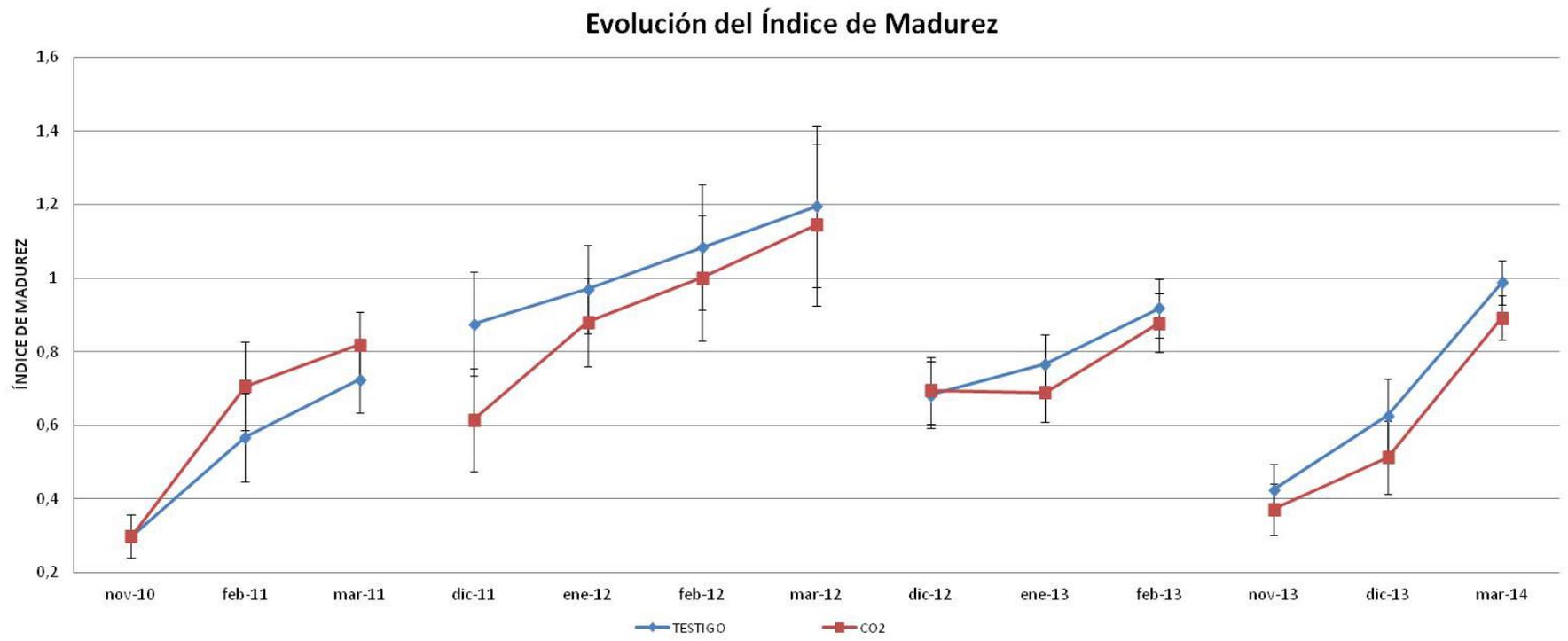


Figura 30. Evolución del Índice de Madurez durante el estudio.

DIÁMETRO (mm)

Evolución del Calibre

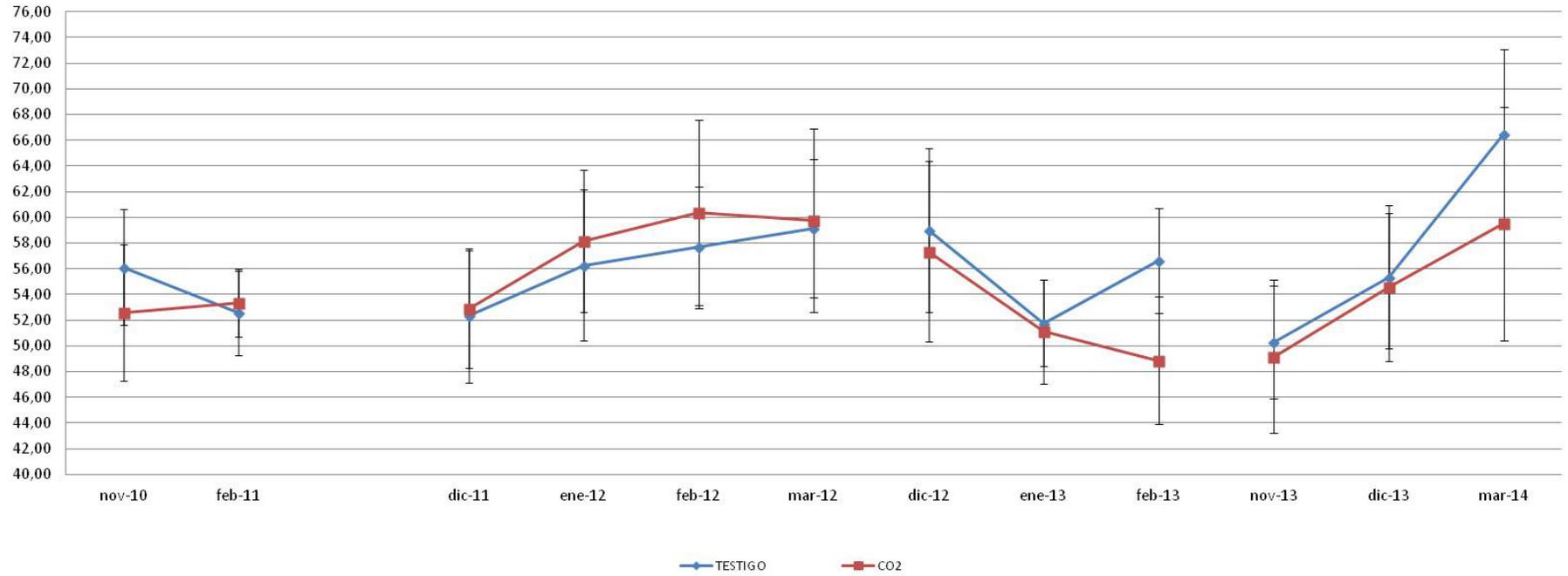


Figura 31. Evolución del Calibre del fruto durante el estudio.

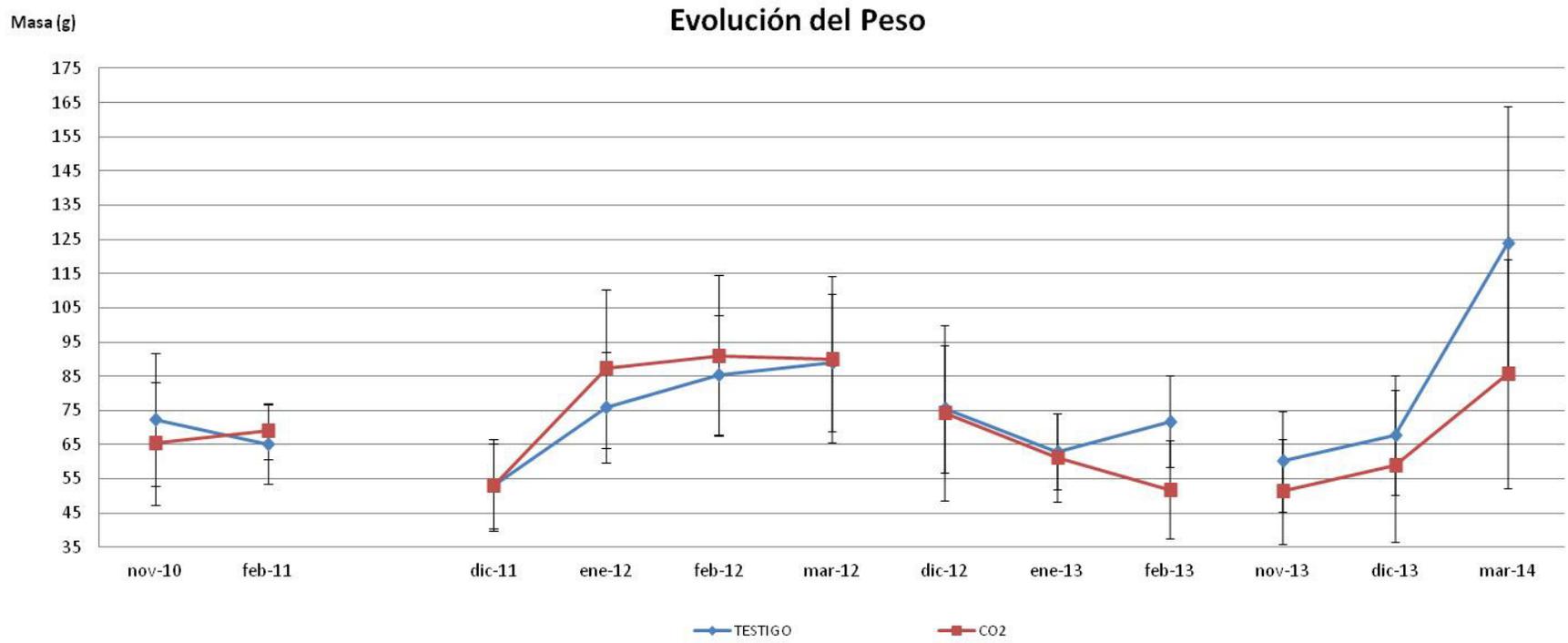


Figura 32. Evolución del Peso del fruto durante el estudio.

Como muestran las gráficas, **los resultados no son nada concluyentes**. En algunas campañas los valores de las filas ensayadas están por encima de los valores testigo, sin embargo en otras las tendencias cambian y en otras, directamente, los valores son prácticamente iguales.

Las tablas siguientes (Tabla 14, Tabla 15, Tabla 16, Tabla 17, Tabla 18) muestran los valores medios de todas las muestras efectuadas. En rojo se han marcado el valor superior en aquellos datos en los que el test ANOVA indicaba una diferencia significativa entre las medias comparadas. Se ha indicado esto último en la última fila, marcándose como **SÍ** cuando ha habido una diferencia significativa entre las medias y como **NO** cuando no la ha habido. En los casos en que la diferencia era significativa, se ha marcado en rojo el valor más alto.

Tabla 14. Medias de Contenido en azúcares durante el ensayo (°Brix)

°brix	nov-10	feb-11	mar-11	dic-11	ene-12	feb-12	mar-12	dic-12	ene-13	feb-13	nov-13	dic-13	mar-14
TESTIGO	10,69	15,33	15,53	9,46	10,72	10,67	11,54	12,92	15,25	15,96	9,24	11,20	12,20
CO2	11,56	17,27	15,56	8,56	9,79	11,17	10,89	13,77	15,16	16,01	9,52	12,14	13,29
Dif Sig?	SI	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI	NO	NO	NO	SI	SI

Tabla 15. Medias del pH del zumo durante la experiencia

pH	nov-10	feb-11	mar-11	dic-11	ene-12	feb-12	mar-12	dic-12	ene-13	feb-13	nov-13	dic-13	mar-14
TESTIGO	2,93	3,10	2,87	3,29	3,30	3,40	3,71	2,85	2,98	3,01	2,84	2,77	3,20
CO2	2,80	3,06	2,89	3,37	3,39	3,37	3,75	2,76	3,01	3,09	2,59	2,64	3,28
Dif Sig?	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	SI	SI	SI	NO

Tabla 16. Medias del Índice de Madurez durante la experiencia (IM)

IM	nov-10	feb-11	mar-11	dic-11	ene-12	feb-12	mar-12	dic-12	ene-13	feb-13	nov-13	dic-13	mar-14
TESTIGO	0,299	0,568	0,724	0,876	0,970	1,084	1,195	0,683	0,766	0,919	0,425	0,626	0,989
CO2	0,299	0,706	0,819	0,615	0,881	1,001	1,145	0,695	0,690	0,878	0,372	0,513	0,892
Dif Sig?	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO	NO	SI	NO	SI	SI	NO

Tabla 17. Medias del Calibre durante la experiencia (mm)

Calibre	nov-10	feb-11	dic-11	ene-12	feb-12	mar-12	dic-12	ene-13	feb-13	nov-13	dic-13	mar-14
TESTIGO	56,11	52,55	52,33	56,28	57,66	59,16	59,01	51,76	56,64	50,26	55,34	66,45
CO2	52,59	53,36	52,85	58,16	60,38	59,73	57,35	51,10	48,88	49,18	54,54	59,49
Dif Sig?	SI	NO	SI	NO	NO	SI						

Tabla 18. Medias del Peso durante la experiencia (g)

Peso	nov-10	feb-11	dic-11	ene-12	feb-12	mar-12	dic-12	ene-13	feb-13	nov-13	dic-13	mar-14
TESTIGO	72,32	65,17	53,20	75,92	85,50	89,08	75,46	62,97	71,73	60,08	67,70	123,98
CO2	65,39	68,92	52,92	87,22	91,03	89,93	74,20	61,32	51,89	51,28	58,80	85,84
Dif Sig?	NO	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO	SI	SI	NO	SI

Como se puede apreciar, los resultados son muy variables y no conducen a conclusiones relevantes. Existen muestras en las que la media no presenta diferencias significativas y otras en las que sí. En éstas últimas, no siempre los valores más altos corresponden a la misma muestra. Así, por ejemplo, el Índice de Madurez presenta distintos valores en los que la diferencia, estadísticamente, es significativa, sin embargo, en algunos de ellos la media es más alta en la fila ensayada y en otros lo es en la fila testigo. La variabilidad de los análisis de los datos obtenidos es demasiado elevada como para obtener resultados concluyentes a favor de la fertirrigación.

Por tanto, si englobamos los tres estudios relativos a estados fenológicos (Hojas-Flores-Frutos) no se puede concluir que **la inyección de CO₂ afecte al desarrollo del árbol ni a sus frutos**, siempre dentro del alcance de la experiencia realizada.

3.6. Análisis de los efectos del CO₂ sobre el suelo.

Siguiendo la misma mecánica que para los análisis anteriores, se realizaron de tres a cuatro analíticas de muestras de suelo a lo largo cada una de las cinco campañas que duró el experimento. La toma de muestra inicial se realizó el 21 de mayo de 2010, antes de empezar los tratamientos con CO₂. La siguiente muestra se realizó el 4 de noviembre de 2010, tres meses después de la puesta en marcha de la experiencia. En general, se realizó una muestra tras la finalización de cada estación, es decir, cuatro por campaña. Los factores analizados fueron los indicados en la Tabla 4 y en la mayoría de ellos no se apreció ningún tipo de diferencia ni en los valores ni en la evolución de los mismos.

Es conocida la variabilidad estacional de los componentes del suelo en plantaciones agrícolas (Agustí, 2003). Dependiendo del estado vegetativo de la planta, la absorción de elementos esenciales y oligoelementos del suelo sigue ritmos diferentes, de ahí que la estacionalidad de los contenidos estudiados resulte lógica. Todos los análisis de suelo mostraron siempre el mismo tipo de textura para las muestras analizadas: franco-arenosa. Esto es importante **para eliminar cualquier posible interacción entre la textura del suelo y el riego con dióxido de carbono.**

Las gráficas que reflejan la variación de los parámetros considerados relevantes a lo largo de la experiencia tanto para las muestras testigo como para las muestras ensayadas se muestran en la Figura 33 a Figura 42.

3.6.1. Evolución del pH en el suelo.

El desarrollo de los árboles se ve reducido en condiciones de acidez o alcalinidad marcada. El pH influye en la asimilabilidad de los nutrientes por la planta. Con un pH inferior a 5 pueden presentarse deficiencias de nitrógeno (N), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y con valores superiores a 6,5 se disminuye la asimilabilidad de hierro (Fe), fósforo (P), manganeso (Mn), boro (B), zinc (Zn), y cobre (Cu) (Aguilar y Baixauli, 2002)

La evolución del pH en el suelo durante la experiencia viene representada en la Figura 33.

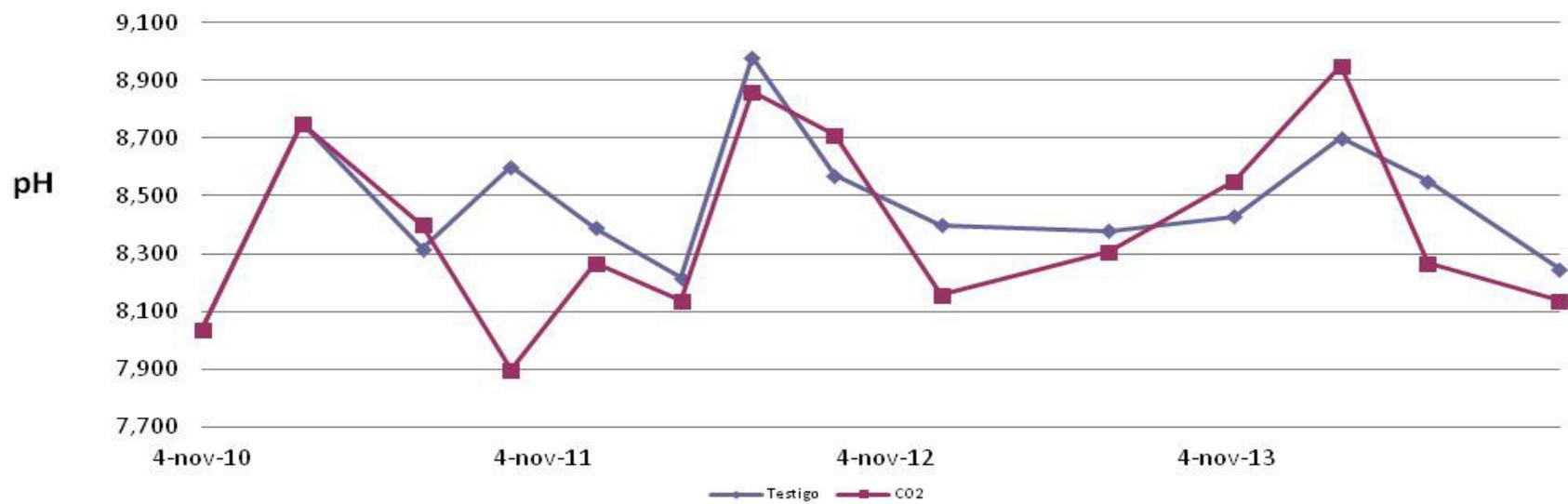


Figura 33. Evolución del pH del suelo a lo largo de toda la experiencia.

Se aprecian unos valores de pH altos en ambas muestras, lo que indica que el riego con CO₂ *per se*, no es capaz de variar la reacción del suelo, **por lo que no parece viable su uso como enmienda.**

3.6.2. Conductividad Eléctrica.

La CE estima la concentración de sales existente en el suelo. Se considera que valores de conductividad eléctrica superior a 3,5 mS/cm son excesivamente altos para la mayor parte de cultivos. El principal efecto de la salinidad es de tipo osmótico. La alta concentración de sales en la solución del suelo hace que el cultivo tenga que hacer un consumo extra de energía para poder absorber el agua del suelo. Este efecto es similar al producido por estrés hídrico, en el que el cultivo sufre la falta de agua en el suelo respecto a lo que demanda para su normal desarrollo. Como consecuencia de este *estrés salino* el cultivo reduce su desarrollo vegetativo ya que se reduce el crecimiento y la división celular y, por consiguiente también se reduce la producción. Este estrés salino reduce la actividad fotosintética y aumenta la respiración de la planta con la que produce la energía que facilita la absorción del agua. Debido a este consumo extra de energía los cultivos reducen su normal desarrollo, la germinación y la brotación se hace más débil, lo que hace que el potencial productivo disminuya. Otro efecto que puede considerarse importante es el retraso en la germinación y la emergencia de la planta. Este retraso puede llegar a ser fatal si la emergencia de las plántulas coincide con un estrés hídrico o un encostramiento añadido al estrés salino.

Identificar los problemas de salinidad en el cultivo es difícil ya que, cuando se observan síntomas evidentes del problema, la producción ya suele estar afectada con una reducción de un 30% o más. Además, los cultivos responden de forma diferente a la salinidad. (Aguilera y Bauxauli, 2002). Por todo esto, la conductividad eléctrica del suelo era también un parámetro a controlar:

Conductividad Eléctrica del Suelo

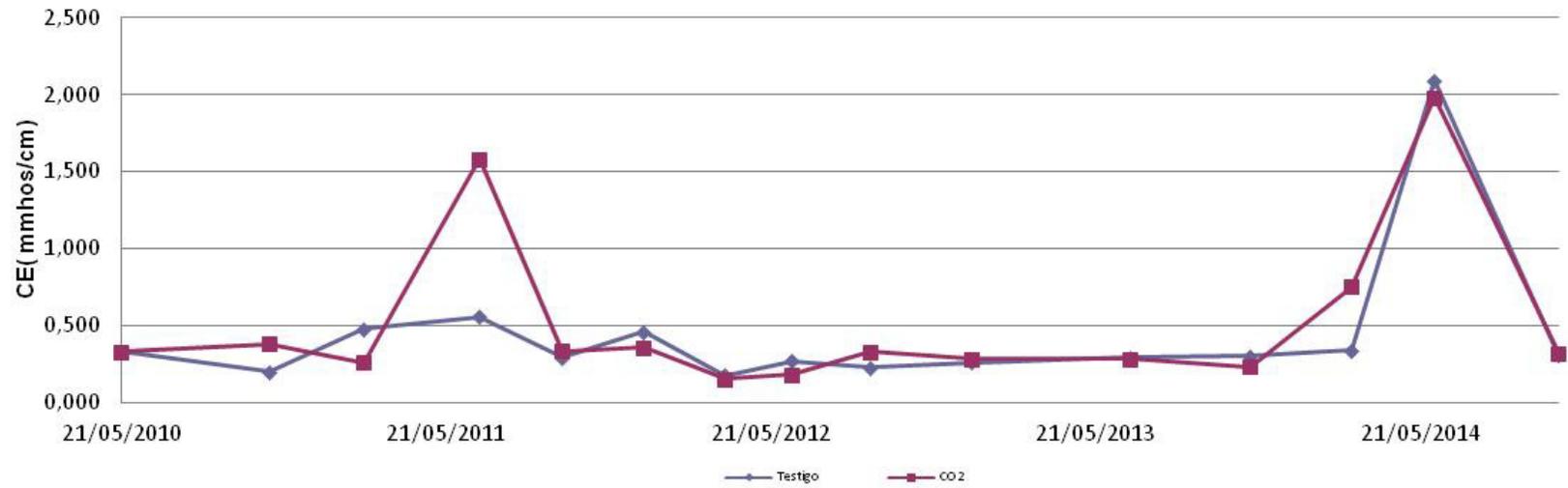


Figura 34. Evolución de la conductividad del suelo a lo largo de toda la experiencia.

Como se puede apreciar en la Figura 34 excepto un dato discordante en junio de 2011, los valores de los análisis son prácticamente los mismos, por lo que se puede concluir que **no existen efectos apreciables en los valores de conductividad.**

3.6.3. Cationes: Ca^{+2} y Mg^{+2} .

Las deficiencias de macroelementos, implican una insuficiente absorción de un determinado elemento por la planta. Esto provoca importantes alteraciones en su metabolismo y desarrollo, que conducen a una reducción significativa de la cosecha, disminución de la calidad de la fruta y alteraciones en el crecimiento. Asimismo los distintos estados carenciales producen síntomas característicos en diversos órganos de la planta (hoja, frutos, etc.) (Legaz y Primo-Millo, 1985)

Según la Figura 35 y la Figura 36 **ninguno de estos macroelementos muestra diferencias significativas.** De hecho, especialmente en el caso de los cationes Ca^{+2} los valores obtenidos son prácticamente iguales a lo largo de toda la experiencia.

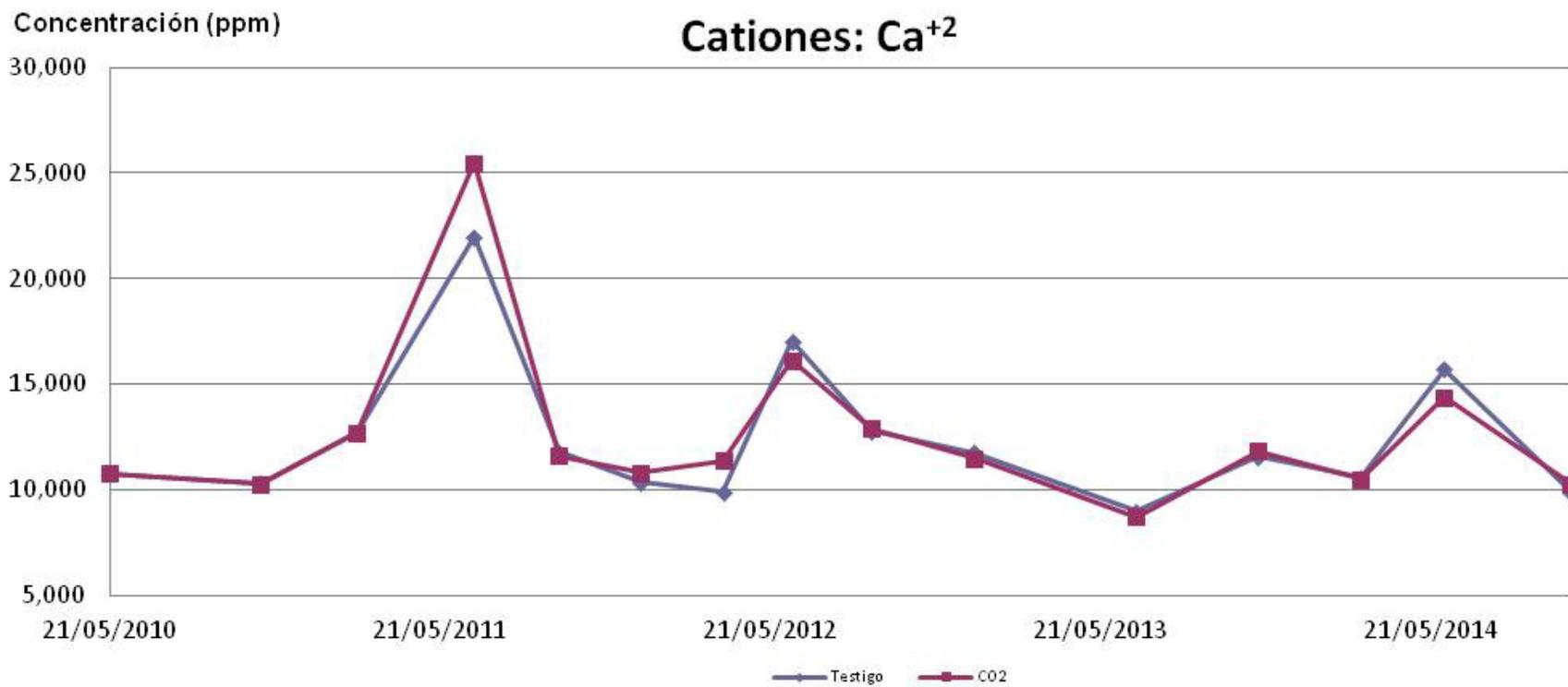


Figura 35. Evolución del Catión Ca²⁺ en el suelo a lo largo de la experiencia.

Concentración (ppm)

Cationes: Mg²⁺

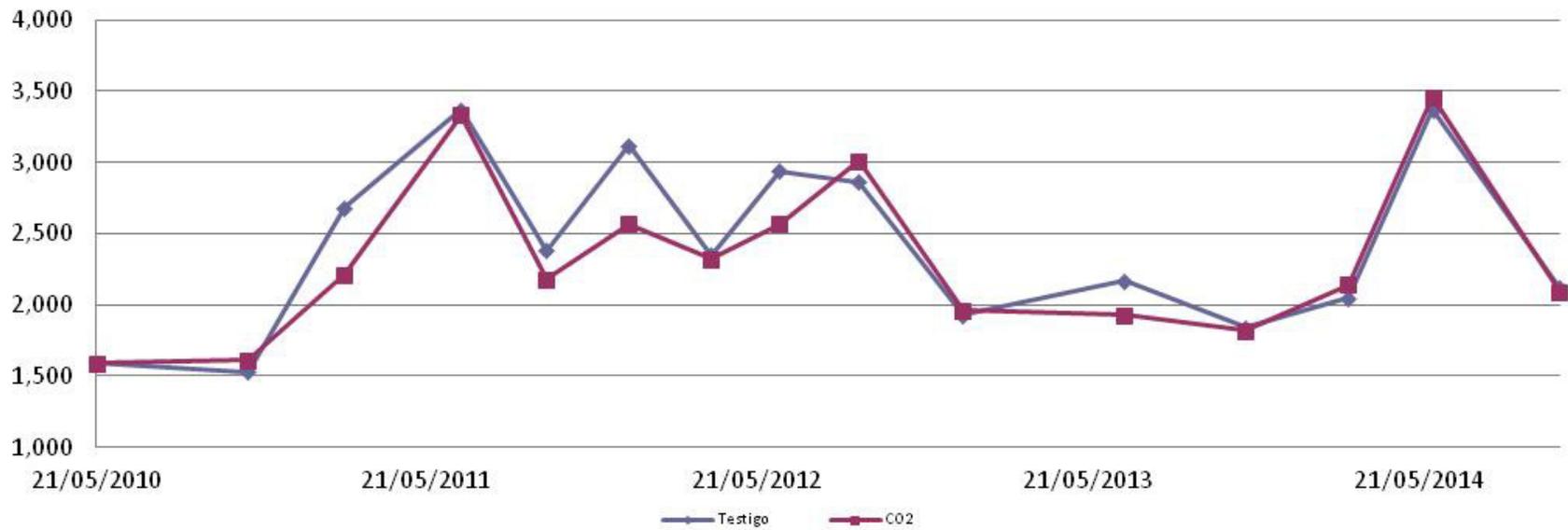


Figura 36. Evolución del Cation Mg²⁺ en el suelo a lo largo de la experiencia.

3.6.4. Nitrógeno y Fósforo.

La **deficiencia de nitrógeno** produce una sintomatología en el árbol que se manifiesta en amarilleamiento del follaje y falta de vigor, con brotaciones cortas de distribución irregular. Los síntomas foliares más característicos son disminución de tamaño de las hojas y amarilleamiento acusado en las nerviaciones. Las hojas entran precozmente en senescencia y caen prematuramente en gran cantidad. En general, cuando hay deficiencia de nitrógeno, la floración tiene tendencia a ser copiosa y el cuajado del fruto muy escaso, por lo que la cosecha es pobre. Los frutos que alcanzan la madurez suelen ser de menor tamaño, con la corteza muy fina y buena calidad en general.

El **exceso de nitrógeno** produce una típica sintomatología, que se manifiesta en los árboles por un abundante desarrollo vegetativo, con hojas grandes y gruesas de color verde oscuro. Los frutos tienen la corteza gruesa y rugosa, mucha pulpa, escaso contenido en zumo y su entrada en color suele ser más tardía. En general su calidad es escasa. Sin embargo el exceso de nitrógeno no tiene ningún efecto sobre el contenido en sólidos solubles, en la relación azúcares/acidez, ni en el contenido en vitamina C. (Legaz y Primo-Millo, 1985)

En ningún caso, en los ensayos realizados se ha llegado a valores de nitrógeno que pudieran causar daños en los árboles.

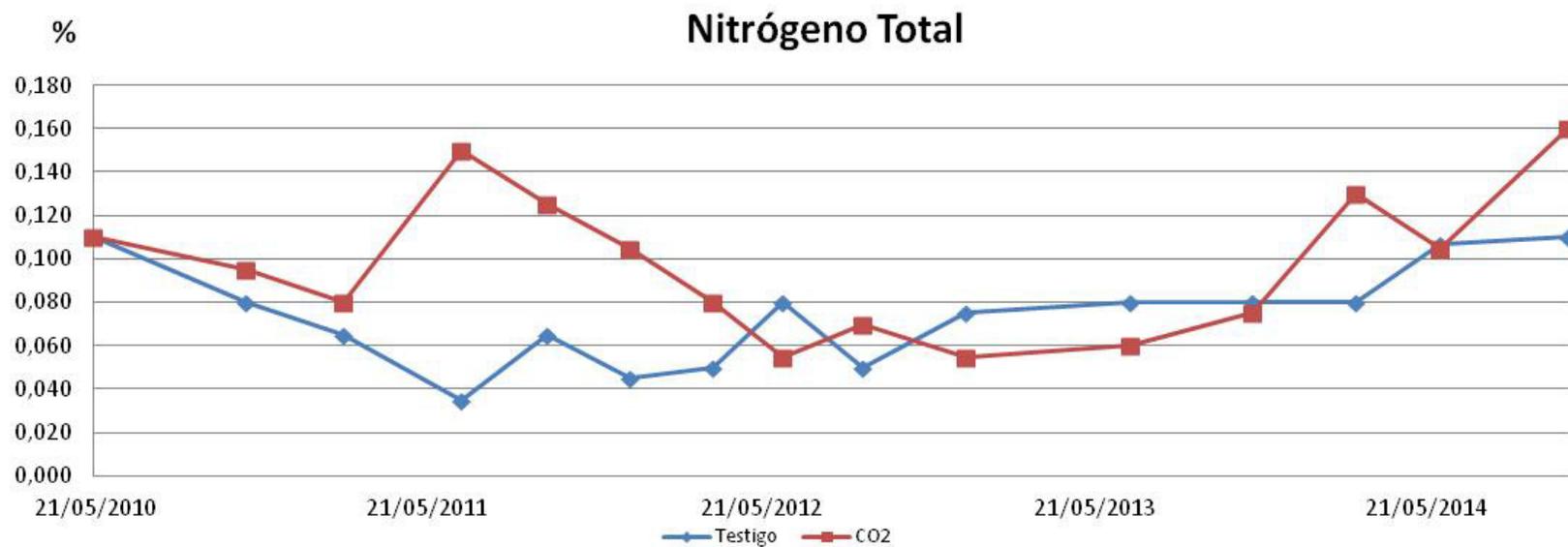


Figura 37. Evolución del Nitrógeno en el suelo a lo largo de la experiencia.

La sintomatología de la **deficiencia de fósforo** no está bien definida y es difícil de encontrar en el campo. En ensayos experimentales, se ha manifestado que las hojas toman inicialmente un color bronceado mate y posteriormente aparecen necrosis en las puntas y márgenes de éstas, cayendo prematuramente. Cuando la deficiencia es acusada, se produce una reducción marcada de la floración. Las brotaciones son débiles, apreciándose una tendencia a la desecación de las puntas de los brotes.

En los frutos, esta carencia se manifiesta por una disminución de la firmeza de los mismos. Los gajos se separan por la zona central, que queda hueca. Los frutos tienden a alcanzar un tamaño mayor, con una corteza gruesa y basta, a veces de color más intenso que el normal. La pulpa es estropajosa, con menor contenido en zumo que es muy ácido y con un alto contenido en vitamina C. La deficiencia de fósforo solo produce efectos significativos sobre la cosecha cuando es muy pronunciada, produciendo una intensa caída de frutos pequeños durante el cuajado.

El **exceso de fósforo** no provoca aparentemente ninguna sintomatología de intoxicación. Sin embargo, las cantidades excesivas de este elemento pueden dificultar la absorción de otros, tales con el cinc, cobre y también, en algunos casos, del calcio, cuando éste se encuentra con un bajo contenido en el suelo. (Legaz y Primo-Millo, 1985)

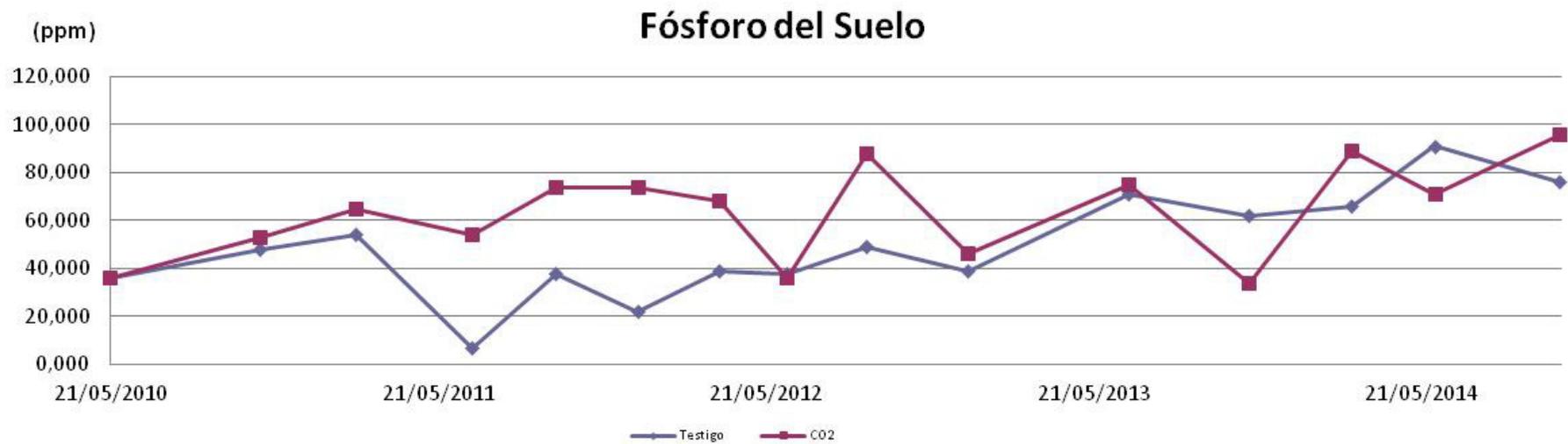


Figura 38. Evolución del Fósforo en el suelo a lo largo de la experiencia.

En los dos primeros años los valores de las muestras regadas con dióxido de carbono, presentan tanto para el nitrógeno (Figura 37) como para el fósforo (Figura 38) valores más altos que las tomadas como referencia. Sin embargo, dada la variabilidad propia del mismo testigo y el hecho de que la tendencia no se repitió en años sucesivos, **no se puede atribuir a la inyección de CO₂ consecuencias positivas en los valores de estos dos parámetros**. Puesto que el tratamiento fue constante, el efecto acumulado los últimos años debería de ser mayor.

3.6.5. Potasio.

La sintomatología de la **deficiencia de potasio** se manifiesta por una reducción del vigor vegetativo y porque las hojas se enrollan y arrugan, apareciendo unas zonas amarillas difusas en el limbo en bandas transversales, sin que se aprecien quemaduras en las mismas, aunque si pueden formarse manchas de goma. La aparición de nuevas brotaciones hace que esta sintomatología sea más acusada en las hojas viejas, ya que el potasio emigra de ellas hacia los nuevos órganos. Las brotaciones son débiles, con hojas de tamaño inferior al normal, que caen con facilidad. En casos agudos, los brotes pueden llegar a secarse. Las raíces fibrosas aparecen cortas y gruesas. Los frutos son pequeños y con la corteza delgada y suave, que tiende a colorear prematuramente. La cantidad de zumo suele ser alta, y éste es escasamente ácido. Cuando la deficiencia en potasio es muy acentuada, suele producirse un incremento de la caída de frutos en desarrollo al final de la primavera (junio).

El **exceso de potasio** influye fundamentalmente sobre la calidad del fruto, que empeora considerablemente. En este aspecto, aunque los frutos suelen ser grandes, su corteza es gruesa, la pulpa basta, con escaso zumo, normalmente muy ácido, y con una marcada tendencia a pudrirse fácilmente. Las concentraciones excesivas de este elemento pueden dificultar la absorción de otros, tales como el magnesio o el calcio, cuando éste se encuentra con un bajo contenido en el suelo. (Legaz y Primo-Millo, 1985)

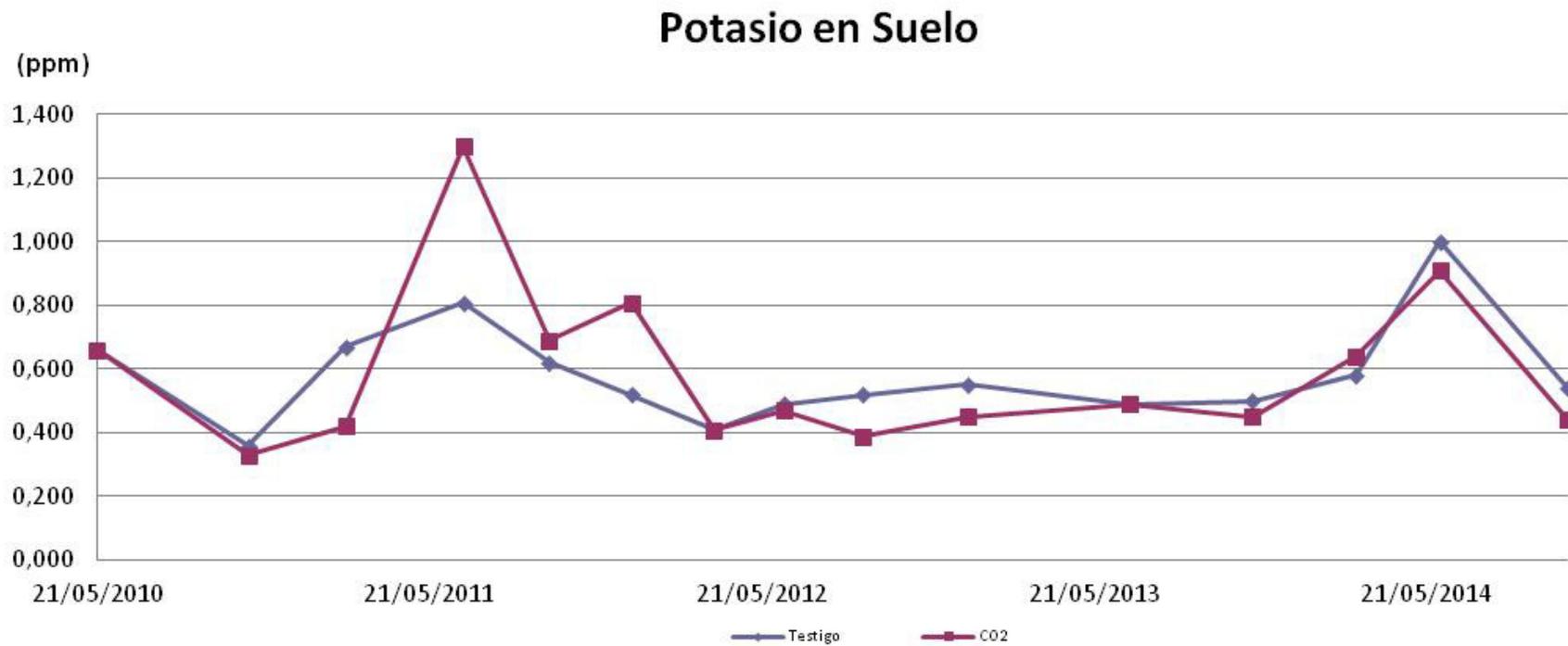


Figura 39. Evolución del Potasio en el suelo a lo largo de la experiencia.

En la Figura 39 se observa la evolución del potasio. Como puede comprobarse las **tendencias** de la muestra ensayadas y la tomada como referencia son prácticamente **iguales**.

3.6.6. Cloruros.

El cloruro es muy móvil en el suelo y se lava fácilmente hacia capas profundas del suelo lejos de las raíces. Cultivos sensibles como los cítricos o el caqui pueden mostrar síntomas de toxicidad en forma de necrosis en los bordes del limbo de las hojas, aún con niveles moderados de cloruro en suelo. (Legaz y Primo-Millo, 1985)

La evolución de este parámetro no muestra diferencias apreciables en su evolución a lo largo de las diferentes campañas:

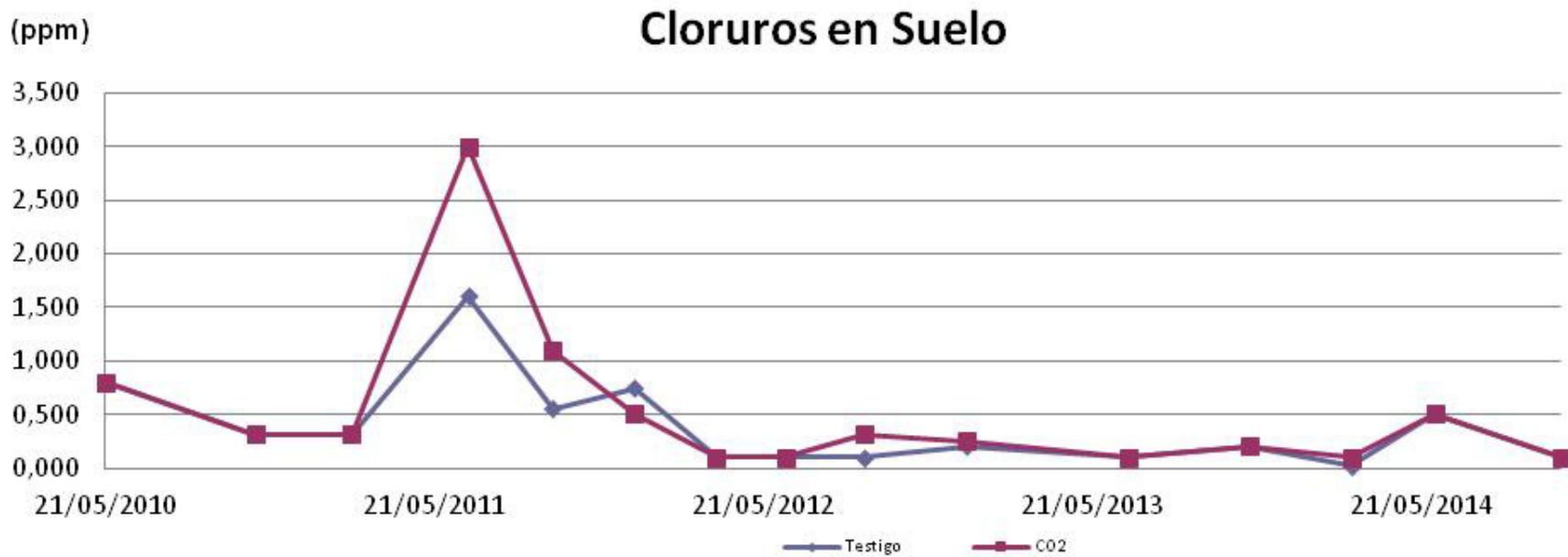


Figura 40. Evolución del Contenido en Cloruros en el suelo a lo largo de la experiencia.

Como se aprecia, en la Figura 40, excepto un dato discordante en junio de 2011, los valores obtenidos para las muestras testigo y las muestras objeto del estudio son prácticamente los mismos. De la misma manera que para el caso del nitrógeno y el fósforo, de tratarse de un efecto debido a la inyección de CO₂ se mostraría especialmente al final del ensayo.

3.6.7. Materia Orgánica Oxidable y Carbono Orgánico.

El carbono orgánico del suelo (COS) se relaciona con la sustentabilidad de los sistemas agrícolas afectando las propiedades del suelo relacionadas con el rendimiento sostenido de los cultivos. El COS se vincula con la cantidad y disponibilidad de nutrientes del suelo, al aportar elementos como el N cuyo aporte mineral es normalmente deficitario. Además, al modificar la acidez y la alcalinidad hacia valores cercanos a la neutralidad, el COS aumenta la solubilidad de varios nutrientes. El COS asociado a la materia orgánica del suelo proporciona coloides de alta capacidad de intercambio catiónico. Su efecto en las propiedades físicas se manifiesta mediante la modificación de la estructura y la distribución del espacio poroso del suelo. La cantidad de COS no solo depende de las condiciones ambientales locales, sino que es afectada fuertemente por el manejo del suelo. La evolución del contenido en carbono orgánico de los suelos estudiados se ha reflejado en la Figura 41.

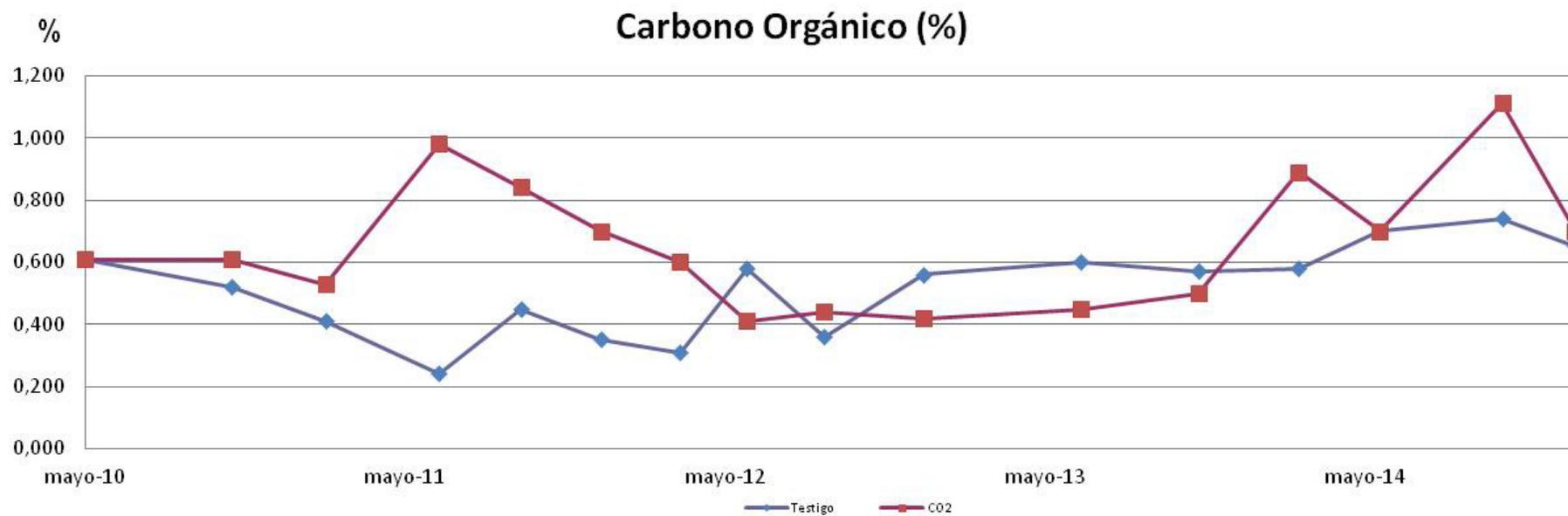


Figura 41. Evolución del Carbono Orgánico en el suelo a lo largo de la experiencia.

Se conoce como materia orgánica oxidable a un conjunto de residuos orgánicos de origen animal y vegetal, que están en diferentes etapas de descomposición, y que se acumulan tanto en la superficie como dentro del perfil del suelo. Además, incluye una fracción viva que participa en la descomposición y transformación de los residuos orgánicos. El COS es el principal elemento que forma parte de la Materia Orgánica Oxidable, por esto es común que ambos términos se confundan o se hable indistintamente de uno u otro. Al respecto cabe señalar que los métodos analíticos determinan COS, (calcinación húmeda o seca) y que la Materia Orgánica Oxidable se estima a partir del COS multiplicado por factores empíricos (Martínez et al., 2008)

La evolución del contenido en materia orgánica a lo largo de la experiencia se basó en los análisis de carbono orgánico (Figura 41) a partir de los cuales se obtuvieron los contenidos en materia orgánica oxidable multiplicando por un factor empírico fijo de 1,724 (Jackson, 1964).

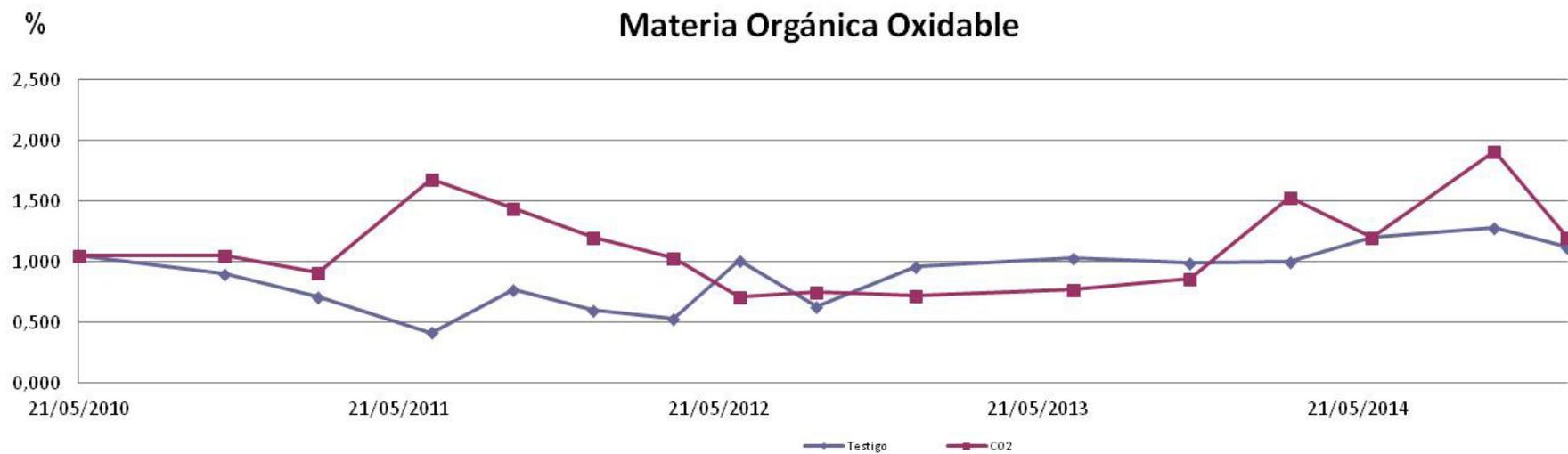


Figura 42. Evolución de la Materia Orgánica Oxidable en el suelo lo largo de la experiencia.

La Figura 41 y la Figura 42 muestran la evolución, prácticamente calcada tanto de la materia orgánica oxidable como del carbono orgánico. Esto es lógico pues, como se ha comentado la materia orgánica oxidable se calcula a partir del carbono orgánico del suelo. Son parámetros intercambiables.

Si se grafían las líneas de tendencia, los resultados son más visibles. La Figura 43 y la Figura 44 muestran las líneas de tendencia de ambos parámetros.

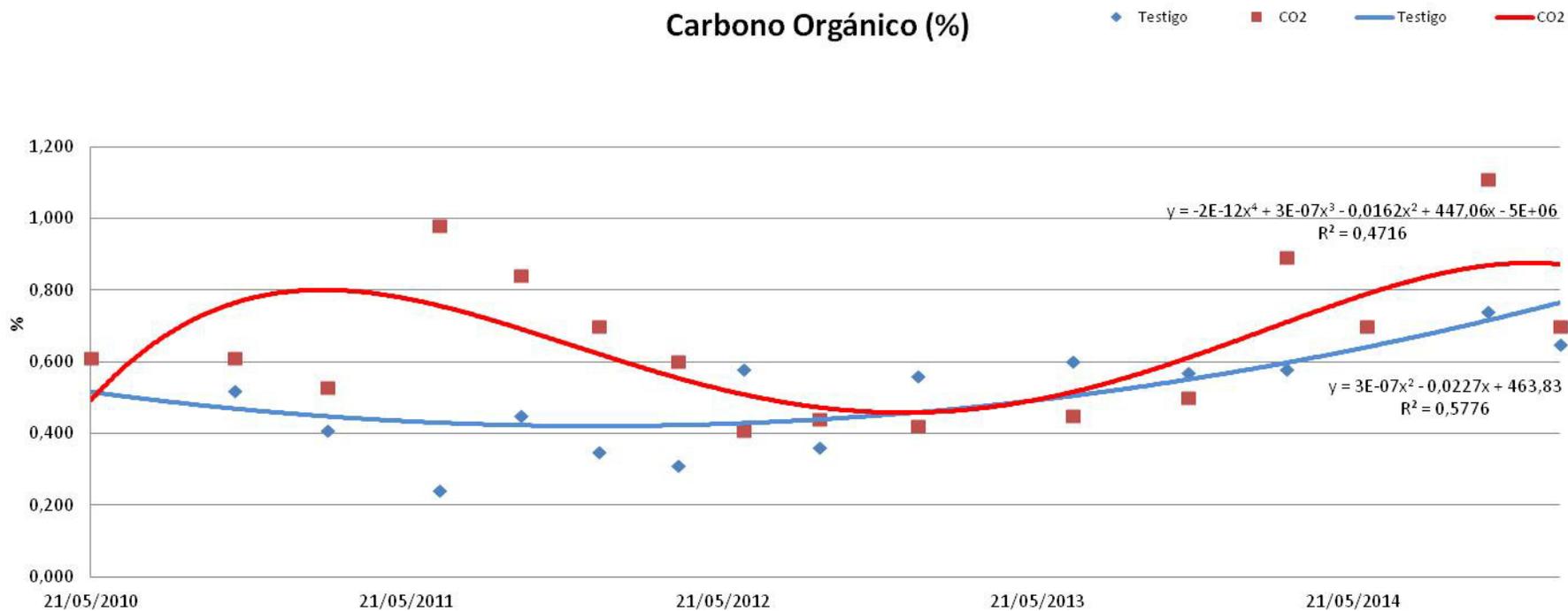


Figura 43. Tendencia de Evolución del Carbono Orgánico a lo largo de la experiencia.

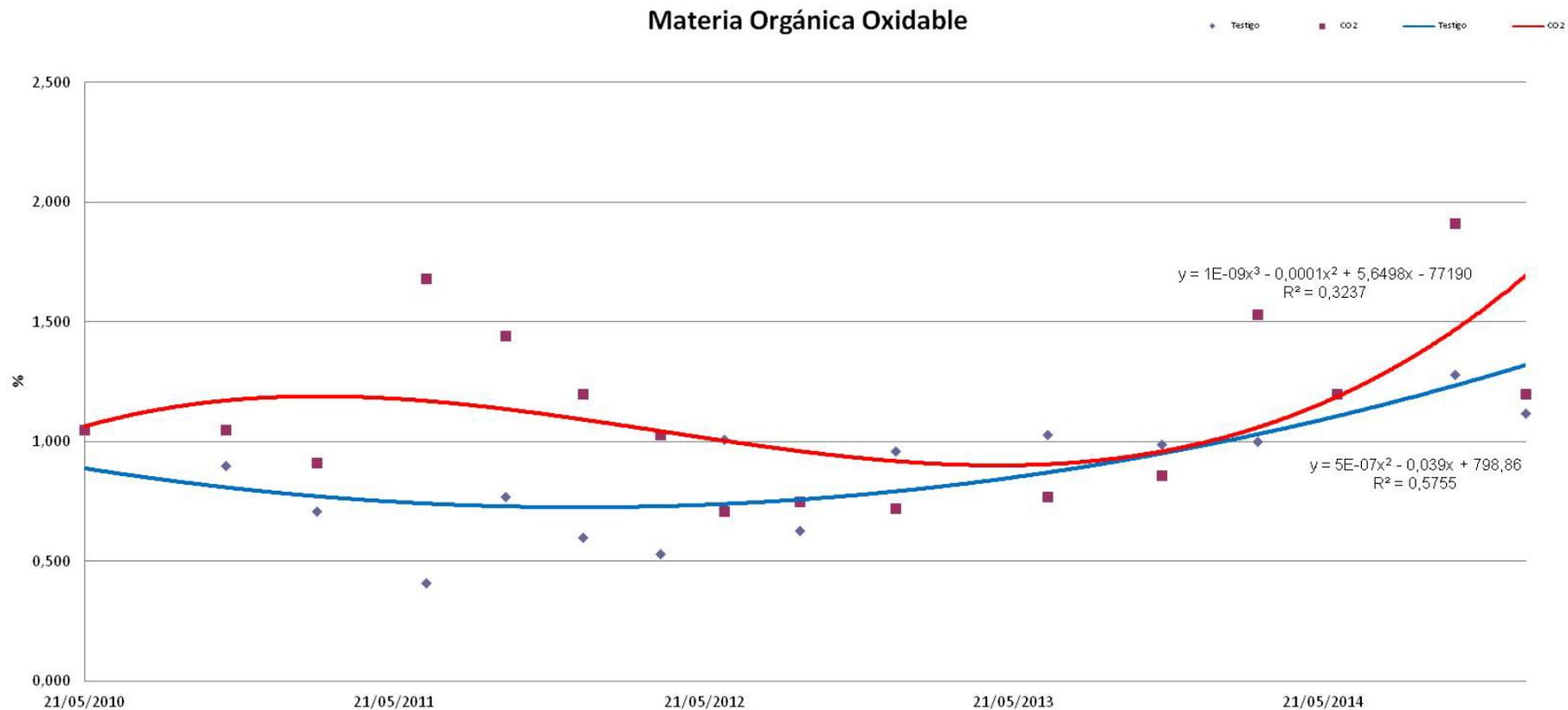


Figura 44. Tendencia de Evolución de la Materia Orgánica Oxidable lo largo de la experiencia.

Se ha ajustado cada serie de datos a una línea polinómica, mostrándose en cada figura el valor R^2 . Una vez ajustada la línea de regresión a la nube de observaciones es importante disponer de una medida que mida la bondad del ajuste realizado y que permita decidir si el ajuste lineal es suficiente o se deben buscar modelos alternativos. Como medida de bondad del ajuste se utiliza el coeficiente de determinación R^2 . Un valor de R^2 próximo a 1 indica una alta capacidad explicativa de la recta. (Peña, 2002).

Los valores de las líneas de regresión calculados para cada factor fueron:

CARBONO ORGÁNICO:

CO₂:

$$y = -2E-12x^4 + 3E-07x^3 - 0,0162x^2 + 447,06x - 5E+06$$

$$R^2 = 0,4716$$

Testigo:

$$y = 3E-07x^2 - 0,0227x + 463,83$$

$$R^2 = 0,5776$$

MATERIA ORGÁNICA OXIDABLE:

CO₂

$$y = 1E-09x^3 - 0,0001x^2 + 5,6498x - 77190$$

$$R^2 = 0,3237$$

Testigo

$$y = 5E-07x^2 - 0,039x + 798,86$$

$$R^2 = 0,5755$$

Los datos muestran una tendencia ascendente del contenido en materia orgánica (expresada como materia orgánica oxidable y como carbono orgánico) en las muestras que recibieron el riego con dióxido de carbono. En este caso **sí que se pueden apreciar valores mayores al final de la experiencia en ambas gráficas.**

La relevancia de estos resultados llevó a realizar un análisis estadístico más exhaustivo de los datos obtenidos, con objeto de ratificar estas primeras conclusiones.

Descontando la observación inicial, antes de empezar la experiencia, se dispone de 15 valores en cada uno de los dos campos. Se trata de investigar si puede afirmarse que el campo con CO₂ tiene, en promedio, valores más elevados de MO que el testigo.

Dado que los valores se han tomado en las mismas fechas en los dos campos el análisis a realizar es una comparación de medias con datos apareados. En este análisis se

opera con la diferencia de los valores constatados en ambos campos en cada fecha y se estudia si la media de esta nueva variable MODIF difiere significativamente de cero.

Para que el análisis sea estadísticamente correcto hay que constatar si las hipótesis de normalidad de MODIF es aceptable. Por otra parte, dado que los datos están obtenidos secuencialmente en el tiempo, hay que constatar la ausencia de una autocorrelación significativa que indicaría que los datos no pueden considerarse independientes.

Los valores de MODIF se recogen en la Tabla 19:

Tabla 19. Valores variable MODIF.

	MOX Testigo (%)	MOX CO2 (%)	MODIF
04/11/2010	0.90	1.05	0.15
19/02/2011	0.71	0.91	0.20
28/06/2011	1.00	1.68	0.68
30/09/2011	0.77	1.44	0.67
30/12/2011	0.60	1.20	0.60
30/03/2012	0.53	1.03	0.50
14/06/2012	1.01	0.71	-0.30
10/09/2012	0.63	0.75	0.12
02/01/2013	0.96	0.72	-0.24
30/06/2013	1.03	0.77	-0.26
11/11/2013	0.99	0.86	-0.13
05/03/2014	1.00	1.53	0.53
06/06/2014	1.20	1.20	0.00
24/10/2014	1.28	1.91	0.63
15/01/2015	1.12	1.20	0.08

Normalidad de MODIF

La normalidad de MODIF se ha analizado mediante el test de Saphiro-Wilks, reflejado en la Tabla 20.

Tabla 20. Pruebas de Normalidad para variable MODIF.

<i>Prueba</i>	<i>Estadístico</i>	<i>Valor-P</i>
Estadístico W de Shapiro-Wilks	0.901845	0.102434

Como Valor-P = 0.102 es mayor que 0.05, se concluye que la hipótesis de normalidad de MODIF es admisible.

Independencia de los valores de MODIF

El coeficiente de autocorrelación de orden 1 de la serie MODIF resulta igual a 0.273, con un Valor-P = 0.345 que indica que es aceptable la hipótesis de que el coeficiente poblacional es nulo y que, por tanto, los datos pueden considerarse independientes.

Comparación de las media de los dos campos

Realizando el correspondiente test **t de Student** para datos apareados se obtiene:

Prueba de Hipótesis para MOX CO₂ - MOX Testigo

Media Muestral = 0.215333

Desviación Estándar de la Muestra = 0.360453

Prueba t

Hipótesis Nula: media = 0

Alternativa: no igual

Estadístico t = 2.3137

Valor-P = **0.0363916**

Por lo tanto, como Valor-P = 0.036 resulta menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula de que ambas medias son iguales y se concluye que **la media de MO en el campo tratado es significativamente más alta que en el campo testigo.**

La diferencia de medias 0.215 supone un incremento del **24%** sobre el valor medio constatado en el campo testigo.

Este parámetro (materia orgánica) evolucionó desde valores cercanos al 1% de materia orgánica oxidable hasta valores de casi el 2%. En cuanto al carbono orgánico, se paso de valores cercanos al 0,6% a valores rondando el 1,2%. Al final de la experiencia, las muestras testigo tuvieron valores cercanos al 1,1% para materia orgánica oxidable y de 0,7% aproximadamente para el contenido en carbono orgánico. El programa de abonado seguido en toda la parcela incluía la dosificación de aproximadamente 40 l/ha año de materia orgánica líquida de origen vegetal. Esto explica el aumento del contenido de materia orgánica en ambas muestras. **El incremento extra debemos atribuirlo a la inyección de CO₂.**

Tal y como se ha comentado, hay indicios que sugieren que el aumento en el CO₂ disponible en la solución nutritiva y en el microatmósfera del suelo puede frenar la respiración edáfica ya que se considera que prácticas que mejoren la estructura del suelo, aumenten la profundidad radicular y reduzcan su compactación aumentan las

posibilidades de retención de materia orgánica. Según Luo y Zhou (2006), "...la interacción de los múltiples factores que influyen en la respiración del suelo son muy complejos y han sido pobremente estudiados. Entre otros, estos factores son aporte de sustrato, temperatura, humedad, oxígeno, nitrógeno, textura y pH del suelo" De igual manera, la **falta de oxígeno** es un parámetro limitador de la descomposición de la materia orgánica del suelo y, por tanto, de la respiración radicular. Así, los usos del suelo que fomentan **atmósferas bajas en O₂** reducen significativamente la respiración microbiana (Larinova et al. 2003)

Por otra parte, la descomposición microbiana de la materia orgánica se reduce al limitar la actividad metabólica de los microorganismos, hecho que sucede al producir una atmósfera anaerobia en la atmósfera del suelo (Hanson et al. 2000).

Diferentes autores han estudiado la relación entre el CO₂ y la respiración edáfica, con resultados en principio positivos. Así, Qui et al. (1994) demostraron que los efectos de la concentración de CO₂ en suelo en la respiración edáfica era estadísticamente significativo, disminuyendo ésta conforme aumentaba la concentración de dióxido de carbono. Van der Westhuizen y Cramer (1998) explican el mecanismo de reducción de la respiración edáfica debido al aumento de carbono inorgánico disuelto en el suelo (CO₂ y HCO₃⁻), mediante una experiencia en tomate. Por su parte, Vourinen et al. (1992) comprobaron las diferentes vías metabólicas de absorción del carbono orgánica del suelo. Finalmente, Raich y Schlesinger (1992) recalcan la importancia de la respiración edáfica en el ciclo del CO₂, estableciendo una relación directa entre la temperatura y el régimen de precipitaciones con la respiración edáfica. Igualmente, evalúan el impacto potencial de diferentes actividades humanas en los ratios de respiración del suelo, con especial interés en el uso del suelo, la fertilización, el riego y el drenaje (demostrando una relación directa entre ambos factores y la respiración edáfica) y los cambios climáticos.

Así pues, pese a no ser en principio un resultado esperado, **el análisis de los datos obtenidos ha confirmado la relación inversa entre el nivel de dióxido de carbono de la solución nutritiva del suelo y la respiración edáfica.**

3.7. Análisis del efecto sobre las hojas.

Los análisis foliares se realizaron al mismo tiempo que los análisis de suelo. Así, se realizó una toma de muestra inicial el 21 de mayo de 2010, antes de empezar el tratamiento y posteriormente se realizaron análisis cada tres meses, coincidiendo con el final de las estaciones.

3.7.1. Nitrógeno.

El nitrógeno es un elemento esencial para las plantas, ya que forma parte de un gran número de compuestos orgánicos, como aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, clorofila, etc. Constituye el elemento más importante en la programación anual del abonado. Su influencia sobre el crecimiento, la floración y la productividad es notable, así como, en ciertas condiciones, sobre la calidad del fruto. La cantidad total de N requerida por un agrío en un ciclo anual depende de un gran número de factores, como edad, tamaño, vigor, producción, etc. (Agustí, 2003)

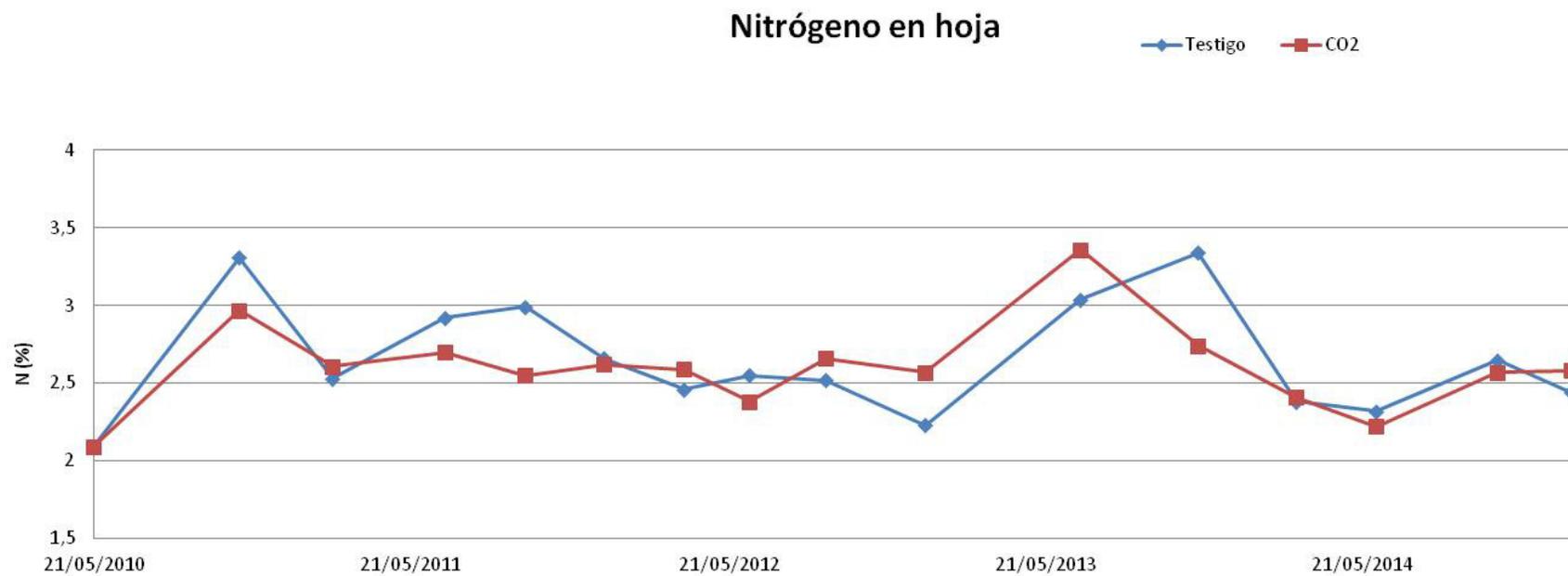


Figura 45. Evolución del contenido de Nitrógeno en hojas lo largo de la experiencia.

Excepto la propia variabilidad de los datos, **no se aprecian tendencias diferentes** en la evolución de las muestras analizadas, tal y como se aprecia en la Figura 45.

3.7.2. Fósforo.

El **fósforo** es un elemento absolutamente esencial para los agrios, ya que se encuentra formando parte de importantes metabolitos. Este elemento participa en el metabolismo de los azúcares, de los ácidos nucleicos y en los procesos energéticos de la planta. Por otra parte, el fósforo es un nutriente muy móvil en la planta, y su concentración es mayor en las células con un metabolismo más activo, como es el caso de las meristemáticas. Es por ello que, en condiciones de deficiencia, el fósforo se desplaza desde las células de los órganos más viejos a las de los órganos jóvenes, metabólicamente más activas. (Agustí, 2003).

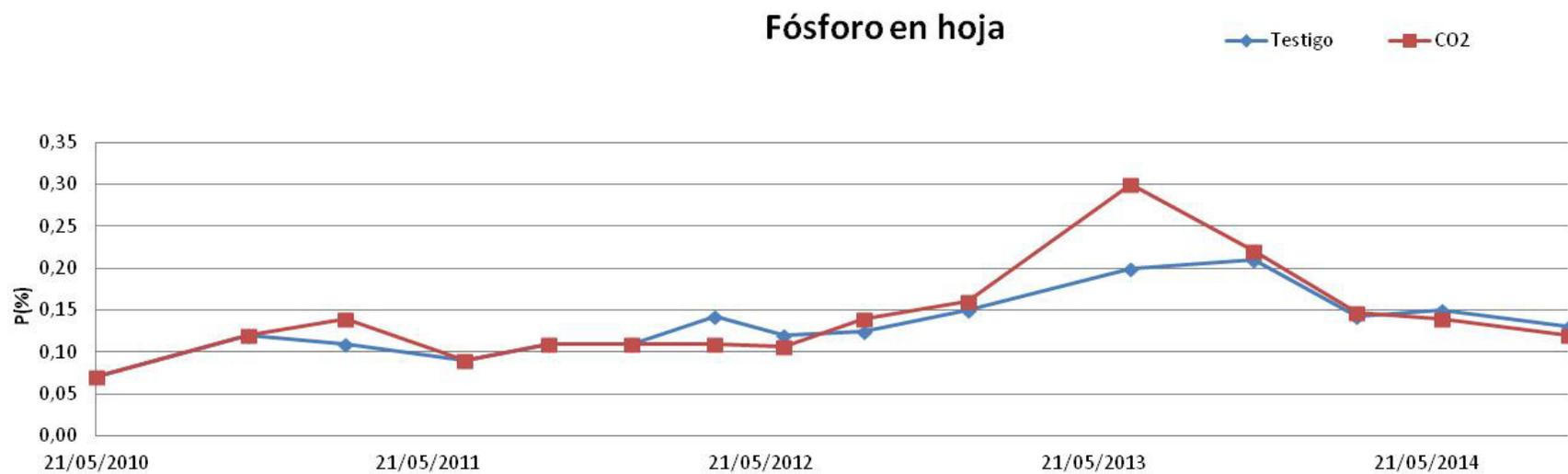


Figura 46. Evolución del Contenido de Fósforo en hojas lo largo de la experiencia.

Se aprecia en la Figura 46 que excepto algún valor anómalo **los valores de ambas series son prácticamente idénticos.**

3.7.3. Potasio.

Este elemento no forma parte estructural estable de ninguna molécula orgánica. A pesar de ello, son indispensables grandes cantidades de este nutriente para el crecimiento y el desarrollo. Los tejidos meristemáticos son particularmente ricos en potasio, el cual acumulan a expensas de los tejidos más viejos. Una característica importante del potasio a este respecto es su extraordinaria movilidad en la planta. (Agustí, 2003).

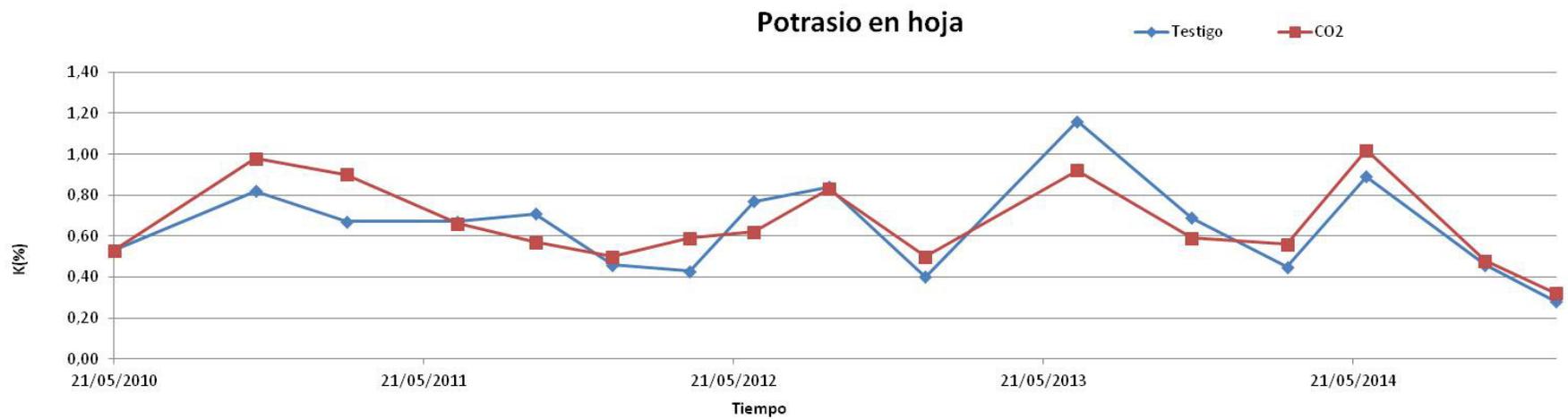


Figura 47. Evolución del Contenido de Potasio en hojas lo largo de la experiencia.

En la Figura 47 se aprecia perfectamente la variabilidad estacional de todos los parámetros en estudio y como los valores de ambas series fluctúan tanto con valores superiores como inferiores, por tanto **no se aprecia ningún efecto a causa de la inyección de CO₂**.

3.7.4. Calcio.

El **calcio** es un macronutriente esencial de las plantas. Su incorporación al citoplasma celular se halla severamente restringido y su papel en el metabolismo es escasísimo y es el único elemento mineral junto con el boro cuya función tiene lugar fuera del citoplasma. Los síntomas más característicos de la deficiencia de calcio son la reducción del desarrollo, pérdida de vigor, desecación de las puntas de las ramas y defoliaciones. El rendimiento de la cosecha y el tamaño del fruto pueden verse ligeramente reducidos en condiciones de deficiencia. (Agustí, 2003).

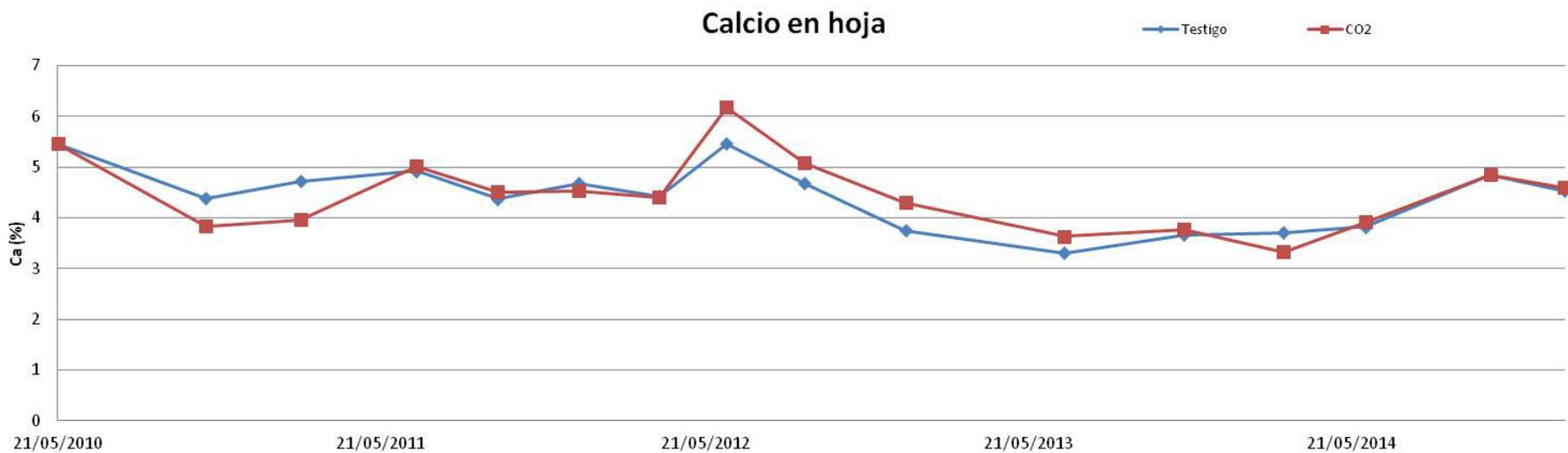


Figura 48. Evolución del Contenido de Calcio en hojas lo largo de la experiencia.

De nuevo no **se aprecian diferencias dignas de tener en cuenta en este parámetro**, tal y como se comprueba en la Figura 48.

3.7.5. Magnesio.

La función más importante del magnesio en las plantas es su papel como átomo central de la molécula de clorofila. La carencia de este elemento mineral se manifiesta por un amarilleamiento de la hoja que no alcanza toda la superficie. Dada la movilidad de este elemento en la planta, las hojas afectadas son las más viejas. (Agustí, 2003). La Figura 49 muestra la variación de magnesio durante el periodo de estudio. **No se aprecia ninguna diferencia entre los árboles tratados y los tomados como testigo.**

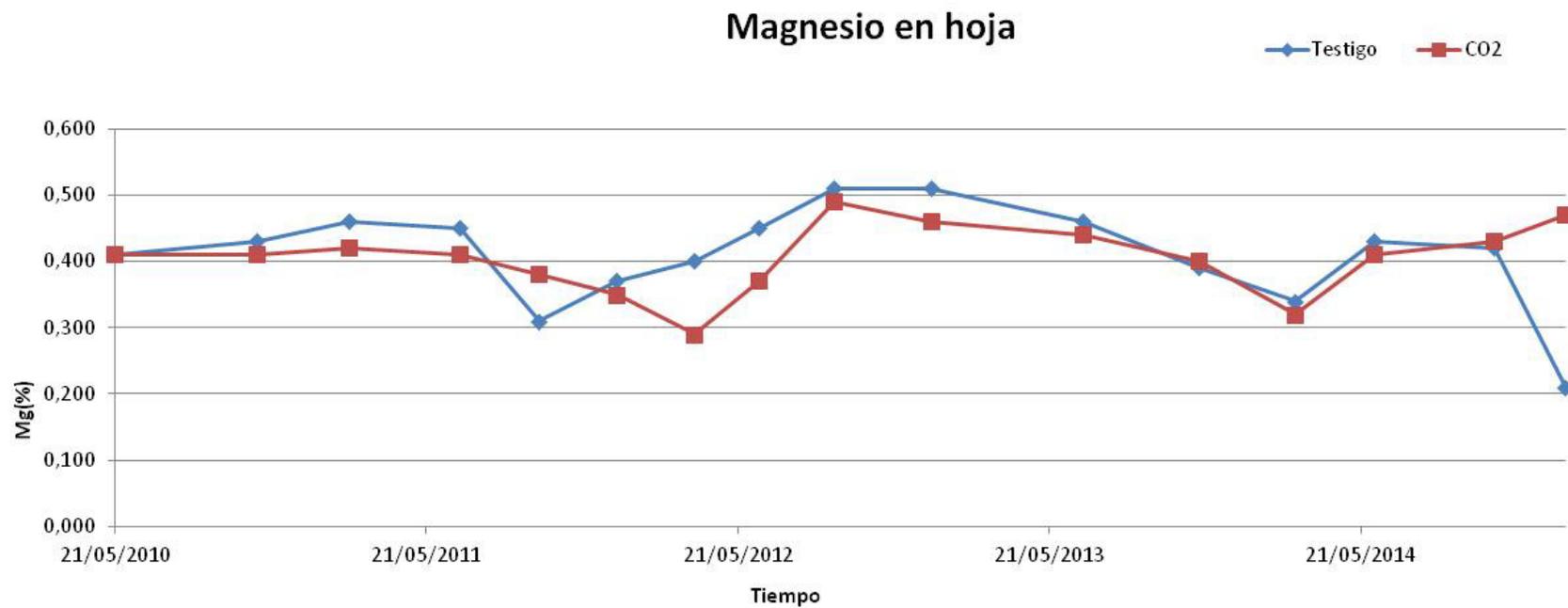


Figura 49. Evolución del contenido de Magnesio en hojas lo largo de la experiencia.

3.7.6. Sodio.

Elevados contenidos en sodio pueden afectar a las plantas y también producir problemas de permeabilidad en los suelos. El efecto perjudicial del sodio se puede contrarrestar con elevados contenidos en calcio. Los cítricos son muy sensibles a valores altos de sodio, así, contenidos foliares de sodio elevados (superiores a 0.3-0.5 % sobre peso seco) suelen indicar problemas de toxicidad en la mayoría de frutales, cítricos incluidos. (Ramos, 1996).



Figura 50. Evolución del contenido de Sodio en hojas lo largo de la experiencia.

La dispersión del valor del contenido en sodio en hojas ha sido bastante alta, como se aprecia en la Figura 50. En principio y dado que el resto de elementos considerados presentan resultados bastante congruentes se asume que es debido a la propia variabilidad de las muestras.

3.7.7. Manganeso.

El manganeso es un micronutriente esencial involucrado en la activación de numerosos enzimas, pero su papel específico como nutriente mineral deriva de su estrecha relación con las metalproteínas, de las que es parte estructural, y actúa como enlace y como sistema redox. El Manganeso también se ha relacionado con el crecimiento, especialmente de las raíces. Su deficiencia en cítricos se caracteriza por la aparición de lagunas amarillas sobre las hojas jóvenes. Su influencia sobre el rendimiento y la calidad de la cosecha parece menos importante que en otros casos de deficiencia (Agustí, 2003).

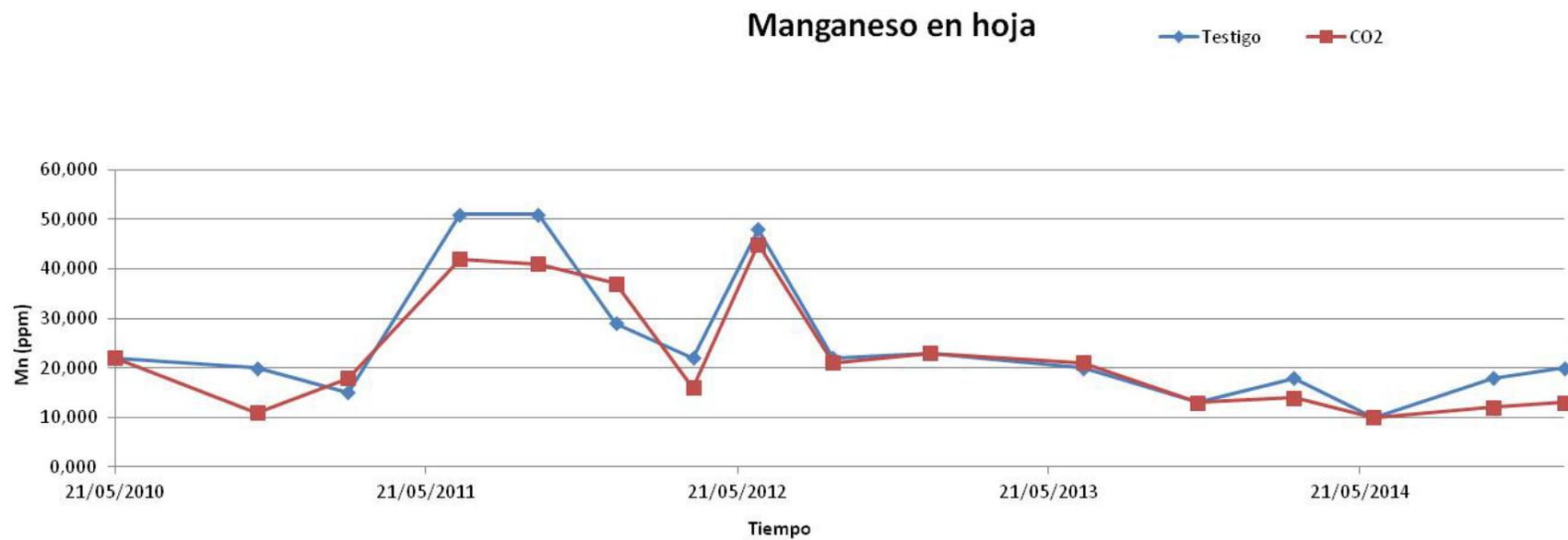


Figura 51. Evolución del contenido de Manganeso en hojas durante la experiencia.

Como puede comprobarse en la Figura 51 los valores, así como la evolución a lo largo de las diferentes estaciones son prácticamente iguales y **la influencia de la fertirrigación carbónica en el contenido en manganeso en hoja es despreciable.**

3.7.8. Cinc.

El cinc es un micronutriente esencial de las plantas y de gran importancia en el cultivo de los cítricos. Al menos cuatro enzimas precisan el cinc como cofactor y es necesario para la síntesis del triptófano. Interviene también en el control del desarrollo a través de su acción indirecta sobre el metabolismo de las auxinas. La deficiencia de cinc se caracteriza por la formación de hojas amarillentas alrededor de los nervios secundarios de las hojas. Estos síntomas se presentan en las hojas jóvenes, dada la escasa traslocación del cinc (Agustí, 2003).

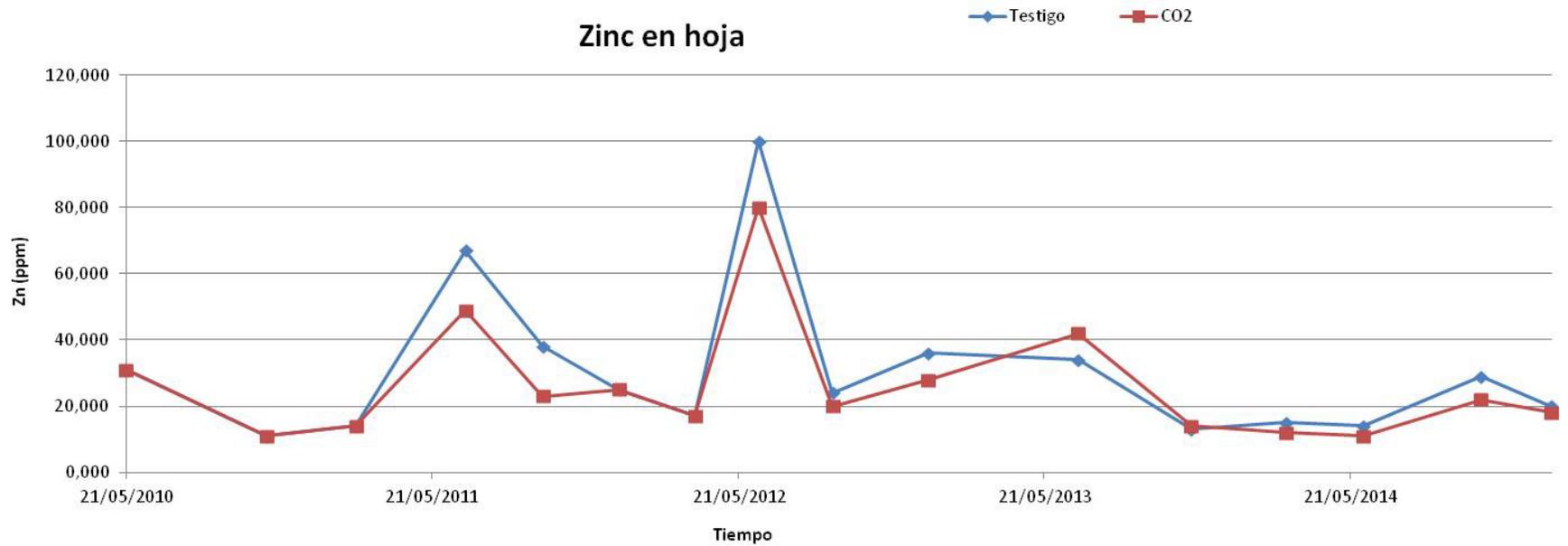


Figura 52. Evolución del Contenido de Cinc en hojas lo largo de la experiencia.

Como puede verse en la Figura 52, de nuevo se repiten tendencias y valores. La estacionalidad de los parámetros es muy acusada pero tanto en la fila ensayada como en los árboles testigo, **la evolución es prácticamente la misma.**

3.7.9. Cobre.

La esencialidad del cobre radica en su participación a través de uniones enzimáticas en las reacciones redox, forma además parte de al menos tres tipos de proteínas y también ha sido relacionado con el mecanismo de los carbohidratos. Su carencia en los cítricos es muy difícil de encontrar, ya que los tratamientos fungicidas son suficientes para cubrir las necesidades de este microelemento (Agustí, 2003).

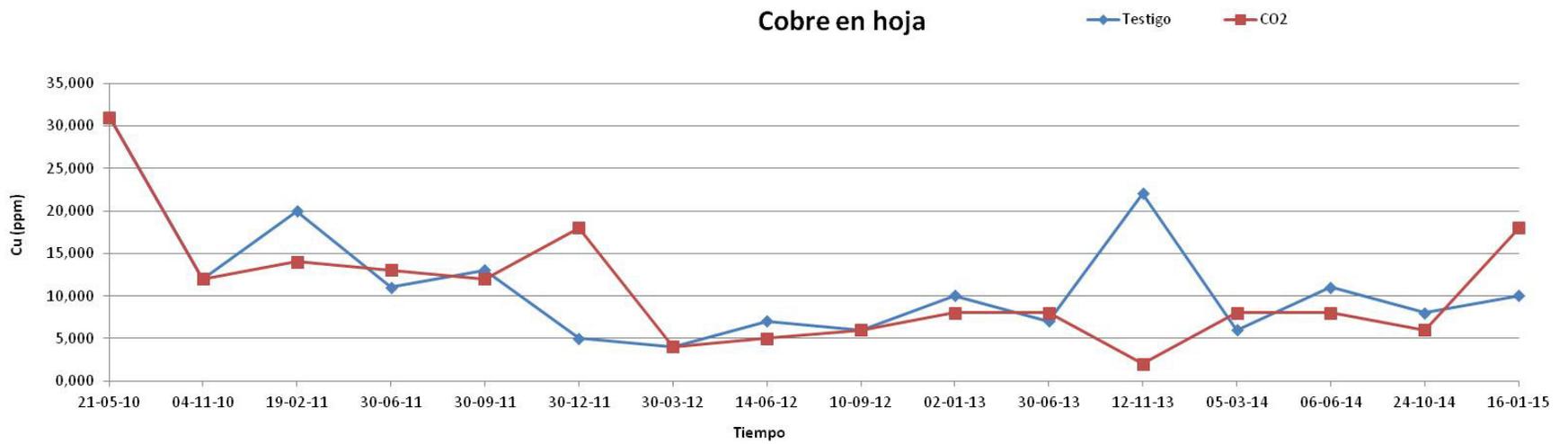


Figura 53. Evolución del contenido de Cobre en hojas lo largo de la experiencia.

Los valores de cobre en hojas mostrados en la Figura 53 presentan una mayor variabilidad que otros parámetros estudiados. Sin embargo la **evolución pareja** de prácticamente todos los valores excepto de dos datos discordantes (en 2011 y en 2013) permite afirmar que **no hay diferencias apreciables** entre las muestras analizadas.

3.7.10. Boro.

El papel del boro en las plantas es poco conocido todavía, su esencialidad, sin embargo, está fuera de toda duda; las funciones del boro son extracelulares y se han relacionado con la lignificación y diferenciación xilemática. Concentraciones foliares entre 50 y 100 ppm, referidas a materia seca, se consideran adecuadas. (Agustí, 2003)

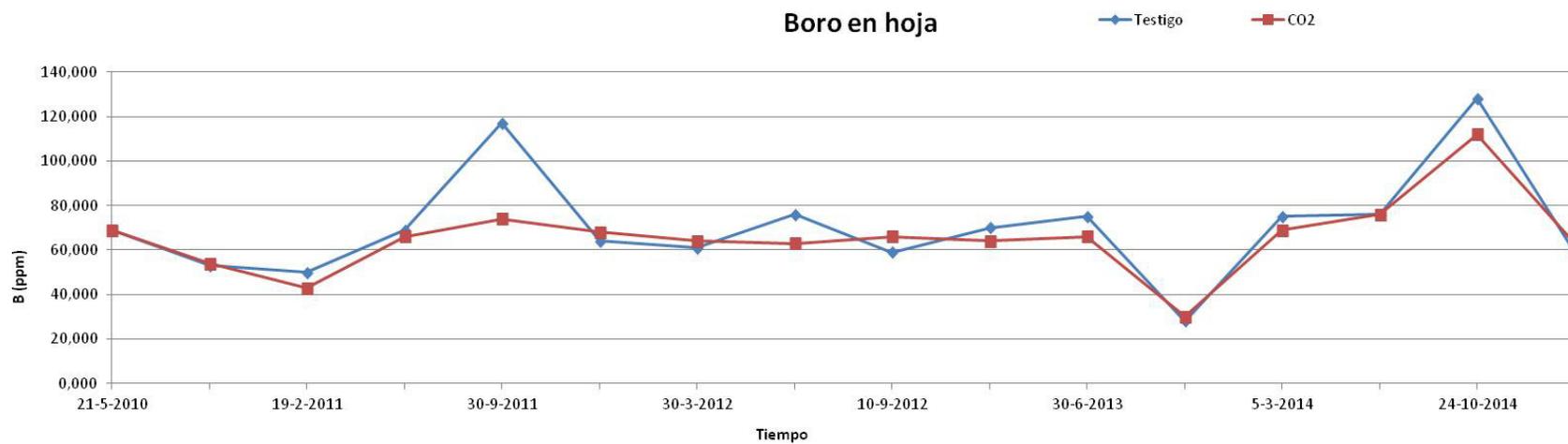


Figura 54. Evolución del contenido de Boro en hojas lo largo de la experiencia.

Como ya se ha comentado para el contenido de oligoelementos en hoja, la similitud de los valores obtenidos en ambas muestras analizadas es muy grande, excepto algún valor anómalo, atribuible a la propia dispersión de los datos, tanto las medias como las evoluciones estacionales. La Figura 54 muestra los resultados.

3.7.11. Molibdeno.

El molibdeno es esencial en la fijación simbiótica del nitrógeno y en la reducción de nitratos a la forma amina. En consecuencia, la deficiencia de molibdeno puede causar deficiencias de nitrógeno, siendo éste el primer síntoma que suele aparecer cuando el elemento que nos ocupa se encuentra a niveles carenciales. La concentración de molibdeno en los tejidos vegetales suele oscilar entre 0,07 y 5,1 ppm. La carencia de molibdeno en cítricos suele manifestarse en forma de grandes manchas cloróticas en las nervaduras, razón por la cual a esta patología se la conoce como "mancha amarilla" (Thompson y Troeh, 1998).

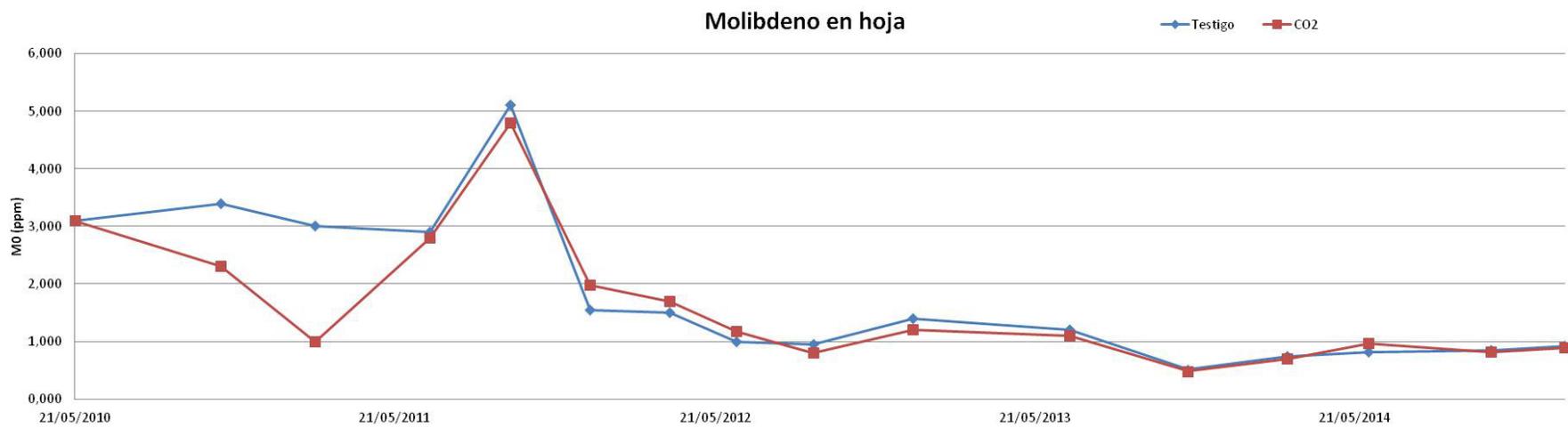


Figura 55. Evolución del contenido de Molibdeno en hojas a lo largo de la experiencia.

Prácticamente los valores de molibdeno son los mismos en toda la serie, tal y como se muestra en la Figura 55.

3.7.12. Aluminio.

No hay todavía evidencia de que el aluminio sea esencial para el crecimiento de los cítricos o de otras plantas superiores. Sí que hay multitud de trabajos acerca de la toxicidad del aluminio (Chapman, 1968). La toxicidad del aluminio se basa, principalmente, en su capacidad para sustituir al magnesio en las reacciones biológicas. La intoxicación por aluminio provoca en primer lugar una inhibición del crecimiento de la raíz y hace a la planta más sensible a las carencias nutricionales y a otros tipos de estrés (Castillo Rodríguez, 2005).

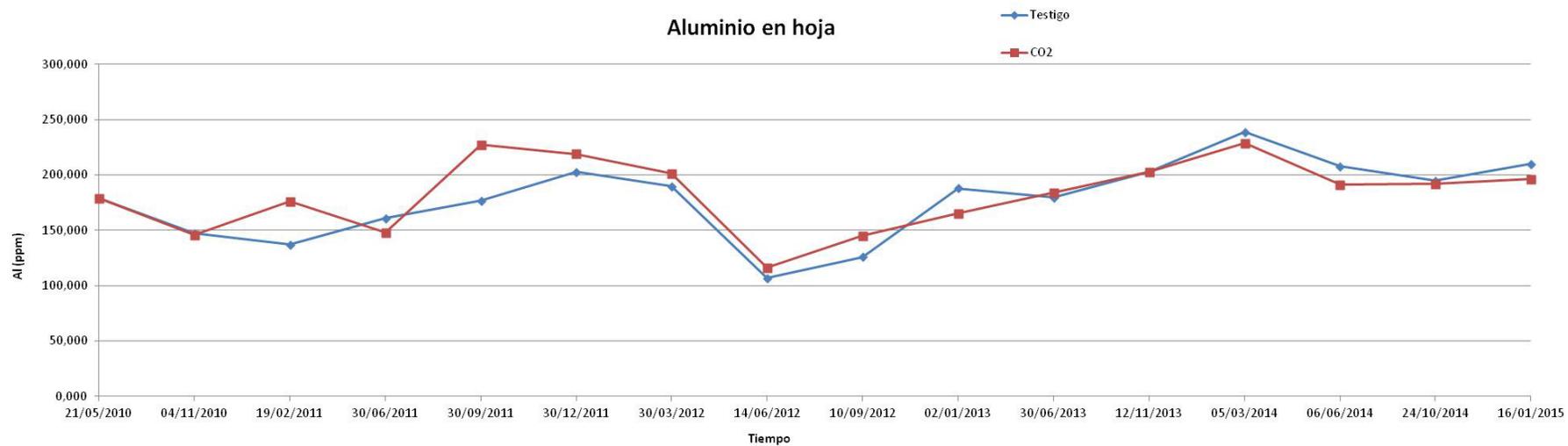


Figura 56. Evolución del contenido de Aluminio en hojas a lo largo de la experiencia.

Una vez más, como se puede apreciar en la Figura 56 no existen diferencias apreciables entre las muestras analizadas a lo largo de los cinco años que ha durado la experiencia.

3.7.13. Hierro

El hierro es un elemento esencial para la vida de las plantas, a pesar de la pequeña cantidad con que se encuentra en sus tejidos. Forma parte de la ferredoxina y los citocromos, sustancias fundamentales en la fotosíntesis y en la respiración. Dada la falta de movilidad del hierro por la planta para trasladarse desde las hojas viejas, la carencia de hierro se manifiesta por la tonalidad inicialmente verde-amarillenta y finalmente amarilla que adquieren las hojas de las brotaciones jóvenes. La reducción del número y tamaño final de los frutos, así como del contenido en sólidos solubles totales de su zumo, son consecuencias que también se derivan de esta deficiencia de hierro (Agustí, 2003).

En la Figura 57 se muestra la evolución del contenido en hierro en hojas. Como se aprecia **sí que existen diferencias claras entre el contenido en hierro de las hojas ensayadas y los de las hojas testigo**. Ninguno de los cationes estudiados presenta diferencias apreciables en los valores obtenidos. Sin embargo, el que el hierro sí que los presente no puede ser atribuido a la simple variabilidad de los datos. En términos cuantitativos, la Figura 58, indica diferencias entre 10 y 18 ppm como promedio.

Tal y como se aprecia, en la Figura 58, las líneas de tendencia confirman estos resultados. Los respectivos valores de las rectas de regresión calculados fueron:

CO₂:

$$y = -0,0146x + 706,97$$

$$R^2 = 0,1194$$

TESTIGO:

$$y = -0,0109x + 541,08$$

$$R^2 = 0,1621$$

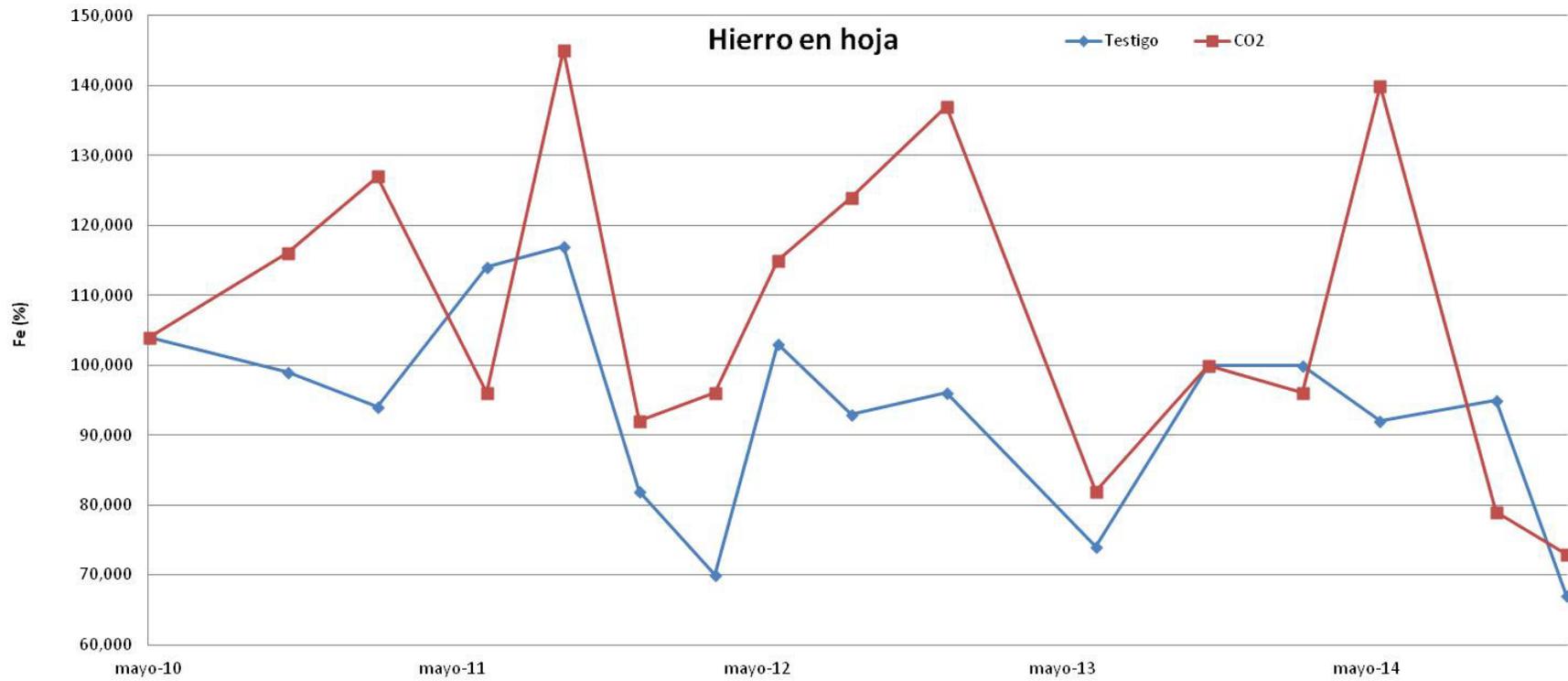


Figura 57. Evolución del contenido de Hierro en hojas lo largo de la experiencia

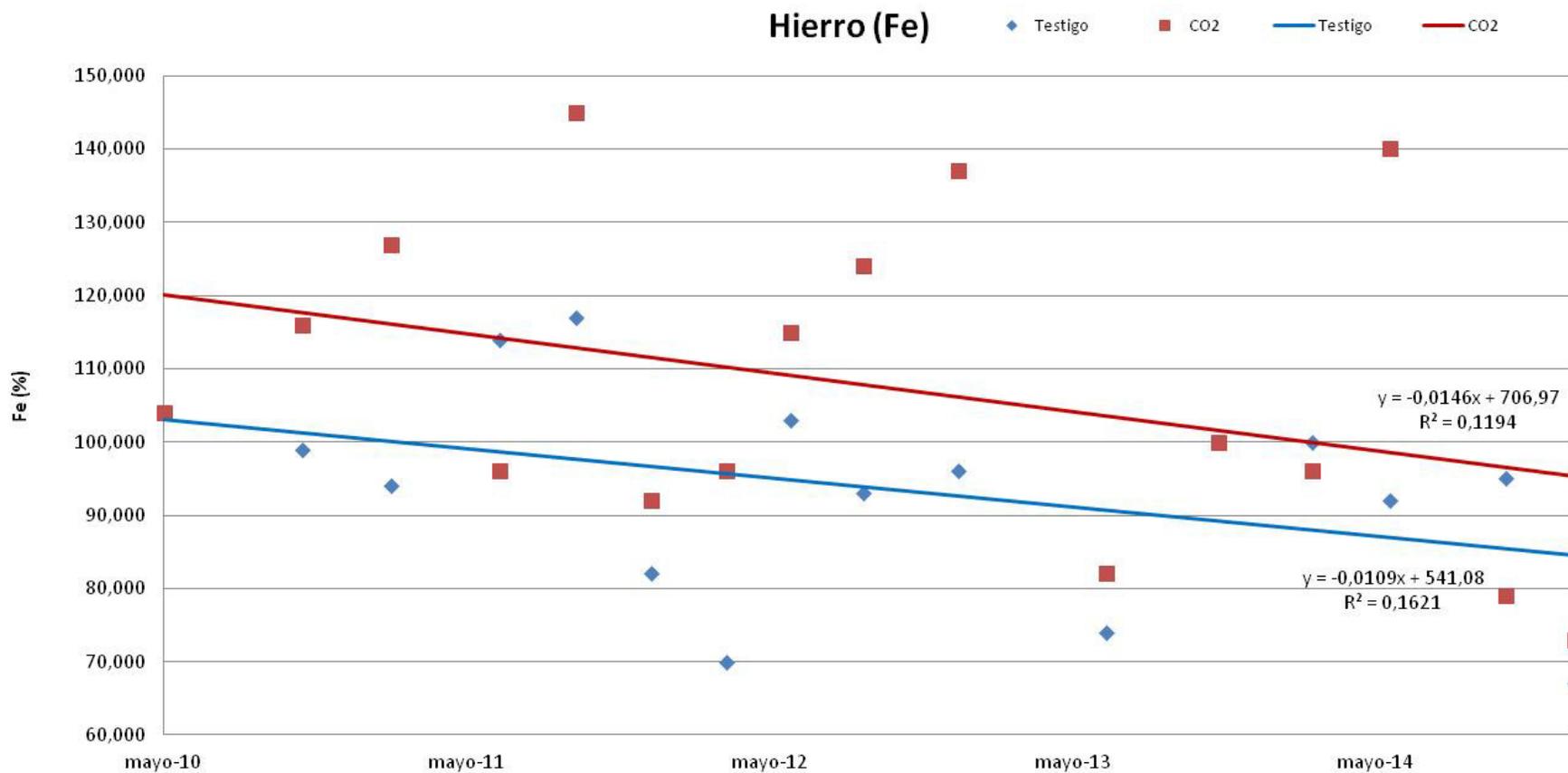


Figura 58. Tendencia del Contenido de Hierro en hojas lo largo de la experiencia.

En este caso, a diferencia del aumento de Materia Orgánica en suelo, no cabe decir que este resultado ha sido inesperado. La correlación entre el pH y la absorción de hierro es conocida (Agustí, 2003) y diferentes investigadores relacionan la fertirrigación carbónica con la mejora en la absorción de nutrientes (Arienzo et al. 1993, De Camargo et al. 2013).

Parece de nuevo indicada la realización de un análisis estadístico más exhaustivo con objeto de determinar fehacientemente la realidad de las conclusiones alcanzadas.

Así, de nuevo se trata de investigar si puede afirmarse que el campo tratado con CO₂ tiene, en promedio, valores más elevados de hierro que el no tratado.

Descontando la observación inicial, antes de empezar la experiencia, se dispone también de 15 valores en cada uno de los dos campos. Dado que los valores se han tomado en las mismas fechas en los dos campos el análisis a realizar es también en este caso una comparación de medias con datos apareados.

Para que el análisis sea estadísticamente correcto hay que constatar si las hipótesis de normalidad de FeDIF es aceptable. Por otra parte, dado que los datos están obtenidos secuencialmente en el tiempo, hay que constatar la ausencia de una autocorrelación significativa que indicaría que los datos no pueden considerarse independientes.

Los valores de FeDIF se recogen en la Tabla 21.

Tabla 21. Valores Fe DIF.

	Fe Testigo (ppm)	Fe CO2 (ppm)	FeDIF (ppm)
04/11/2010	99.00	116.00	17.00
19/02/2011	94.00	127.00	33.00
28/06/2011	114.00	96.00	-18.00
30/09/2011	117.00	145.00	28.00
30/12/2011	82.00	92.00	10.00
30/03/2012	70.00	96.00	26.00
14/06/2012	103.00	115.00	12.00
10/09/2012	93.00	124.00	31.00
02/01/2013	96.00	137.00	41.00
30/06/2013	74.00	82.00	8.00
11/11/2013	100.00	100.00	0.00
05/03/2014	100.00	96.00	-4.00
06/06/2014	92.00	140.00	48.00
24/10/2014	95.00	79.00	-16.00
15/01/2015	67.00	73.00	6.00

Normalidad de FeDIF

La normalidad de FeDIF se ha analizado mediante el test de Saphiro-Wilks, reflejado en la Tabla 22.

Tabla 22: Pruebas de Normalidad para FeDIF.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilks	0.974472	0.884011

Como Valor-P = 0.884 que es mayor que 0.05, se concluye que la hipótesis de normalidad de FeDIF es admisible.

Independencia de los valores de FeDIF

El coeficiente de autocorrelación de orden 1 de la serie FeDIF resulta igual a -0.358, con un Valor-P = 0.208 que indica que es aceptable la hipótesis de que el coeficiente poblacional es nulo y que, por tanto, los datos pueden considerarse independientes.

Comparación de las media de los dos campos

Realizando el correspondiente test t de Student para datos apareados se obtiene:

Prueba de Hipótesis para Fe CO₂ - Fe Testigo

Media Muestral = 14.8

Mediana Muestral = 12.0

Desviación Estándar de la Muestra = 19.7093

Prueba t

Hipótesis Nula: media = 0

Alternativa: no igual

Estadístico t = 2.90828

Valor-P = 0.0114532

Por lo tanto, como Valor-P = 0.011 resulta menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula de que ambas medias son iguales y se concluye que **la media de Fe en el campo tratado es significativamente más alta que en el campo testigo.**

La diferencia de medias es de 14.8 unidades, lo que supone un incremento del 16% sobre el valor medio constatado en el campo testigo.

El hierro se encuentra en el suelo en forma de minerales (pirita, olivina, magnetita...) que se descomponen, mediante hidrólisis y oxidación, en presencia de agua, CO₂ y CO, dando lugar a iones ferroso solubles. En condiciones ácidas y no oxidantes, este ión permanece estable, pero en presencia de O₂, cuando el suelo es alcalino, se forma hidróxido férrico que es insoluble. Por lo tanto, la solubilidad del hierro en la solución acuosa del suelo está controlada por el pH de ésta, predominando las formas iónicas solubles en los suelos ácidos y el hidróxido férrico, insoluble, en los alcalinos. Finalmente, **contenidos elevados de materia orgánica** favorecen la reducción a ión ferroso, que puede adsorberse a ella formando complejos con moléculas orgánicas (Agustí, 2003).

Menéndez et al. (1995) y Zdruli, Jones et al. (2004) han puesto de manifiesto la abundancia de suelos con pH alcalinos en toda la cuenca mediterránea. En general, los suelos poseen cantidades suficientes de Hierro para atender las demandas de las plantas pero es muy frecuente que éste se encuentre en forma insoluble o inasimilable por las plantas (Legaz et al., 1995b). La carencia de hierro, también denominada clorosis férrica, en los cítricos se haya inducida, en la mayor parte de los casos por las condiciones del suelo que favorecen la transición a formas insolubles. Según Legaz et al. (1995b), en terrenos ácidos la deficiencia de hierro puede corregirse mediante la adición al suelo de sulfato ferroso o férrico. Menos eficaz resulta la utilización de los óxidos ferrosos, para la misma cantidad de hierro aplicada. Los compuestos ferrosos son, asimismo, más eficaces que los férricos, y el aporte fraccionado mejora notablemente el aprovechamiento por la planta.

En los terrenos alcalinos la aplicación de sales u óxidos de hierro resultan ineficaces. En estos casos la forma más eficaz de corregir la clorosis férrica es mediante el aporte al suelo de quelatos de hierro, sustancias orgánicas que contienen hierro unido mediante enlaces de coordinación que forman moléculas estables, capaces de secuestrarlo, durante un periodo más o menos prolongado, sin que sufra las reacciones de insolubilización propias de este tipo de suelos. Los quelatos son más eficaces cuanto más estables y deben de incorporarse al suelo inmediatamente después de su aplicación, ya que la luz y la alta temperatura los descomponen rápidamente. Se recomienda, por tanto, inyectarlos al suelo o regar tras su aplicación (Agustí, 2003). En cuanto a la dosis a aportar, depende de la intensidad de la deficiencia y de la forma de aplicación. Las dosis recomendadas varían desde 15 hasta 100 g/árbol (Legaz et al. 1995b). Estas prácticas son muy habituales en toda la citricultura valenciana y

conlleva además, un coste que en determinadas circunstancias puede llegar a ser relativamente alto (Agustí, 2003).

Así, los bajos contenidos en materia orgánica junto con lo elevado del pH de los suelos de la cuenca mediterránea (Zdruli et al., 2004) obligan al uso de quelatos como única vía para evitar la clorosis férrica (Agustí, 2003). Si próximas experiencias permiten confirmar los resultados alcanzados en estos ensayos (probando diferentes dosis de CO₂, patrones, textura del suelo...) **la movilización de hierro que la inyección de CO₂ provoca podría suponer, a la larga, un cambio en las prácticas culturales habituales** en la citricultura valenciana, al eliminar o cuando menos disminuir el aporte de hierro en sus diferentes formas.

3.8. Análisis del agua de Riego.

Durante la experiencia se realizaron dos análisis del agua de riego con objeto no tanto de valorara las repercusiones de la fertirrigación carbónica en las capas freáticas sino para valorar las distintas condiciones del agua usada como vehículo del CO₂ dependiendo de la estación del año. El agua de riego procede de un pozo particular y se extrae a una profundidad de 120 metros. Los análisis se llevaron a cabo el día 21 de mayo de 2010 y el día 30 de diciembre de 2012. La Tabla 23 proporciona los resultados de los dos análisis.

Tabla 23. Valores de los Análisis de Agua efectuados.

ANÁLISIS DE AGUAS	Primavera	Invierno
	21/05/2010	30/12/2012
Fecha de Muestreo		
pH	7,90	7,81
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₄) ppm	0,10	<0,1
Nitrógeno Nítrico (N-NO ₃) ppm	4,90	8,00
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)ppm	175,00	210,00
Calcio (Ca ⁺⁺) ppm	110,00	56,00
Magnesio (mg ⁺⁺)ppm	33,00	29,00
Potasio (K ⁺)ppm	5,20	2,40
Fósforo (P) ppm	0,000	<0,1
Hierro (Fe) ppm	0,179	<0,01
Manganeso (Mn) ppm	0,000	<0,01
Zinc (Zn) ppm	0,000	<0,01
Cobre (Cu) ppm	0,013	<0,01
Boro (B)ppm	0,000	<0,01
Molibdeno (Mo) ppm	0,020	0,010
Aluminio (Al) ppm	0,179	0,136
Cloruros (Cl ⁻) ppm	93,000	27,000
Sulfatos (SO ₄ ⁻⁻) ppm	261,000	194,000
Carbonatos (CO ₃ ⁻⁻) ppm	0,000	0,000
Sodio (Na ⁺) ppm	63,100	57,000

Cabe destacar únicamente, que el pH se mantiene relativamente estable, pero que el nivel de bicarbonatos sí que varía de manera considerable. Dado que la solubilidad del CO₂ en agua depende tanto del pH como del contenido en bicarbonatos (Perry et al., 2001) resulta interesante el seguimiento de estos dos parámetros con miras a valorar el consumo de CO₂ del sistema.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.

Durante un total de cinco campañas se regó una fila de mandarinos Nadorcott (64 unidades) con agua en la que se disolvió dióxido de carbono hasta saturación. Entre 2010 y 2015 se realizaron ensayos comparativos entre la fila regada con CO₂ y las inmediatamente superior e inferior. El **objetivo** del proyecto era valorar las posibles repercusiones tanto favorables como desfavorables de esta práctica en cítricos, por lo que se intentó que, aparte del riego, todo el resto de factores fuera el mismo (fertilización, textura del suelo, patrón, variedad, altura, orientación...)

Los múltiples análisis efectuados para monitorizar los parámetros fundamentales que afectan al desarrollo vegetativo de los naranjos y a la producción de mandarinos han permitido obtener las siguientes conclusiones:

Respecto de los objetivos referentes a la Influencia sobre la fertilidad del suelo de la aportación de CO₂ en el agua de riego:

- El **contenido en materia orgánica** de los suelos estudiados es superior en promedio en un **26%** en las muestras ensayadas respecto de las tomadas como referencia. Esta conclusión puede tener repercusiones medioambientales importantes, habida cuenta de que la respiración edáfica es una de las principales fuentes de emisión de dióxido de carbono. La Figura 44 muestra las tendencias diferentes en el suelo ensayado y el testigo y el análisis estadístico efectuado mediante la técnica de Student confirma las tendencias observadas en las gráficas.

Respecto de los objetivos referentes a la influencia de la fertirrigación carbónica sobre los factores que afectan al desarrollo vegetativo de los cítricos:

- Los estudios de la variación de superficie foliar no indican una mejora en el crecimiento vegetativo de los árboles. Dentro del ámbito del estudio, el riego con agua carbonatada **no tiene ninguna influencia en el desarrollo vegetativo** de los árboles estudiados.
- Se detectaron **niveles de hierro en hojas más altos** en los árboles objeto del estudio, en un **16%**. Tal y como apuntaba la bibliografía para cultivos hortícolas **la fertirrigación carbónica influye en la absorción de nutrientes**. Con este estudio se ha corroborado esta tendencia para los cítricos. El hecho de que mejore los niveles de hierro puede tener repercusiones económicas de relevancia, si, se comprobara en un estudio más detallado que se puede

reducir o suprimir la utilización de secuestradores de hierro en suelos con pH altos. En la Figura 57 y en la Figura 58 se aprecia esta tendencia. De la misma manera, los análisis estadísticos realizados mediante el cálculo de la variable t de Student corroboran estos resultados.

- La fertirrigación carbónica **no ha influido en el contenido del resto de elementos minerales** de las hojas, a excepción del hierro.

Respecto de los objetivos referentes influencia de la fertirrigación carbónica sobre la calidad, productividad y periodo de recolección de los cítricos:

- No existe ninguna influencia de la práctica estudiada en las fases fenológicas de floración y formación de los frutos. La fertirrigación carbónica **no repercutirá en el avance o retraso de la cosecha** en las condiciones analizadas.
- Se observa una gran dispersión en las medidas de los parámetros relativos a los frutos, lo que ha dificultado su análisis. Sin embargo, se puede concluir que la fertirrigación carbónica **no tiene repercusiones significativas en el volumen de la cosecha** (peso y calibre), **ni en la acidez** ni contenido **en azúcares** (pH y °Brix) ni en el periodo de recolección de la misma (Índice de Madurez). Se reafirman pues las conclusiones obtenidas en el análisis de la floración: la inyección de CO₂ no altera la fecha de recolección.

Respecto a los objetivos referentes a la valoración de la problemática inherente a la fertirrigación carbónica:

- El pH y contenido en bicarbonatos del agua de riego no se mantienen constantes a lo largo de todo el año. Dado que estos dos parámetros influyen en la disolución del dióxido de carbono en agua, se han de controlar habitualmente si se quiere **maximizar** el CO₂ consumido. El pH es fácil y económico de medir, pero la medida periódica de bicarbonatos presenta más dificultad.
- Cuando el agua carbonatada es liberada de la red de riego, una pequeña proporción del CO₂ disuelto pasa a la atmósfera. El aumento de los niveles de dióxido de carbono se produce únicamente a nivel de la línea de goteros. A una altura de aproximadamente un metro, los niveles de CO₂ son los mismos que en cualquier otro punto de la parcela. Se puede concluir que todas las consecuencias de la fertirrigación carbónica se producirán por la **disolución del dióxido de carbono en agua** y no por la liberación a la atmósfera del mismo.

El objetivo último de todas las experiencias llevadas a cabo a lo largo de estos cinco años ha sido la valoración del potencial de la fertirrigación carbónica para mejorar una plantación de cítricos en producción. Dado que la acidificación del agua de riego es una práctica habitual en toda la citricultura valenciana con objeto de evitar precipitaciones calcáreas, se pretendía comprobar si el uso de CO₂ como ácido podía tener repercusiones negativas, ya que, las positivas, son de sobra conocidas tanto a nivel científico como agrícola. Los resultados obtenidos **demuestran que no sólo no tiene repercusiones negativas sino que mejora la absorción de hierro y que aumenta el contenido de materia orgánica del suelo.**

Estos estudios van a constituir la base científica para el proyecto LIFE FERTILIFE, (LIFE14 CCM/ES/311) financiado por la Unión Europea y que tiene como fecha de inicio el 1 de octubre de 2015.

La relevancia y las conclusiones de las experiencias realizadas en este trabajo de investigación se contextualizan dentro del marco que proporciona el proyecto LIFE. El uso de la agricultura en general y de la citricultura en particular como **sumidero activo** de CO₂ es una vieja aspiración de la comunidad agrícola. El trabajo aquí presentado supone la primera piedra para que la agricultura pueda empezar a beneficiarse del comercio de emisiones de CO₂. En este momento se trata de un tema muy novedoso, y por tanto se cuenta con escasos precedentes, pero la concienciación medioambiental de la población y la responsabilidad civil de los países generadores de CO₂ le confiere una importancia y vigencia que va a ir en aumento con el tiempo, especialmente en Europa, Estados Unidos y Japón.

Todos los análisis efectuados a lo largo de 5 campañas agrícolas han ido orientados a la valoración del potencial agrícola de la fertirrigación carbónica, obviando aspectos económicos. Actualmente, el dióxido de carbono como acidificante es caro y el coste que supone para el agricultor, no compensa los beneficios que ocasiona (básicamente, la mejora en la absorción de hierro). Sin embargo, si se cumplen los objetivos del proyecto FERTILIFE, a corto-medio plazo el agricultor no sólo no tendrá que pagar por el dióxido de carbono, sino que cobrará por hacerlo.

Actualmente, el uso de CO₂ como acidificante del agua de riego no es económicamente viable. Unos consumos aproximados de 150 Tm/ha y año de este gas supondrían aproximadamente 130 €/ha, según datos facilitados por la empresa de suministro de gases licuados Abelló-Linde.

Las próximas líneas de investigación de este trabajo deberían investigar:

- Disolución de CO₂ en redes de riego extensas, complejas y altamente ramificadas.
 - Monitorización de bicarbonatos en agua de riego y otros parámetros que pueden influir en la solubilidad del CO₂.
 - Posibles diferencias entre variedades, patrones y tipos de suelo.
 - Transporte de CO₂ desde el punto de generación al de suministro.
 - Automatización del proceso de inyección y posible cambio en el diseño de emisores para mejorar la eficiencia.
 - Utilización y valoración de sistemas de riego enterrado para minimizar las pérdidas de CO₂ a la atmósfera.
-

BIBLIOGRAFÍA

1. **Aguilar Clivert J.M. et Baixauli Soria, C.** 2002. Cultivos sin suelo de hortalizas. Aspectos prácticos y experiencias. Generalitat Valenciana, Conselleria d'Agricultura, Pesca i Alimentació. Serie Divulgació Técnica 53.
2. **Aguilera C. et Checa A.B.** 2000. Efectos de la Fertirrigación Carbónica en Tomate. *Agrícola Vergel* 227: 747-753.
3. **Aguilera C., Checa A.B., Ruiz A.** 2002. Efecto de la Fertirrigación Carbónica en la Evolución de la Cosecha de Berenjena en condiciones de cultivo bajo invernadero. *Agrícola Vergel* 251: 646-652.
4. **Agustí M.** 2003. Citricultura. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
5. **Agustí M., Bleiholder H., Buhr L., Hack H., Klose R., Stauß R., Zaragoza S.** 1995. Codificación BBCH de los Estadios Fenológicos del Desarrollo de los Agrios (Gén. Citrus) Generalitat Valenciana, Conselleria d'Agricultura, Pesca i Alimentació. Ficha Técnica. Serie Citricultura nº 6.
6. **Araújo, W. F. et Botrel, T. A.** 2010. Influência do CO₂ via água de irrigação e da cobertura plástica no solo na abobrinha. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 41, n. 2: 216-221.
7. **Archer D.W. et Reicosky D.C.** 2005. Cuantificación agronómica del aumento de materia orgánica del suelo en siembra directa. XIII Congreso de AAPRESID, Rosario, Santa Fe, Argentina, 9 -12 agosto, 2005.
8. **Arias D.J., Chavier N., Griñán A., Mejias J.L., Moros J.E., Vela M.D., Macias F.J.** 2008. Nuevos Métodos de Fertirrigación. Proyecto LIFE Fertigreen. *Agricultura: Revista Agropecuaria* 910: 694-697.
9. **Arienzo M., Basilea C., Zena A.** 1993. Soil nutrient mobility in response to irrigation with carbon dioxide enriched water. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 24:11-12.
10. **Arienzo M., Basile G., Dandria R., Magliulo V., Maggio A.** 1993. Fertilization via carbonated water and mineral concentrations in a tomato crop, *Communications in soil science and plant analysis*, 24(17-18), 1993: 2281-2291.
11. **Arienzo, M., Basile G., Zena, A.** 1993. Soil nutrient mobility in response to irrigation with carbon dioxide enriched water. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, Athens, v. 11/12, n. 24, p. 1183-1195.
12. **Arrhenius S.,** 1896 On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science Series 5*, Volume 41, april: 237-276.

13. **Arteca R.N., Poovaiah B.W., Smith O.E.** 1979. Changes in carbon fixation, tuberization, and growth induced by CO₂ application to the root zone of potato plants. *Science* 205: 1279-1280.
14. **Arteca R.N. et Poovaiah B.W.** 1982. Absorption of CO₂ by potato roots and its subsequent translocation. *Journal of American Society of Horticultural Science* 107: 398-401,
15. **Arteca, R.N.; Poovaiah, B.W.; Smith, O.E.** 1979. Changes in carbon fixation, tuberization and growth induced by CO₂ application to the root zone of potato plants. *Science, New York*, n. 205: 1279-1280.
16. **Bailey D.A. et Hammer P.A.** 1986. Growth and nutritional status of petunia and tomato seedlings with acidified irrigation water. *Horticultural Science* 21: 423-425.
17. **Barley, K.L. et Lazarovitz, G.** 2003. Suppressing soil borne diseases with residue management and organic amendments. *Soil and Tillage Research* 72: 169-180.
18. **Baron J.J. et Gorski A.S.F.** 1986. Response of eggplant to a root environment enriched with CO₂. *Horticultural Science* 21:495-598.
19. **Burger, M. et Jackson L.E.** 2003. Microbial immobilization of ammonium and nitrate in relation to ammonification and nitrification rates in organic and conventional cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry* 35(1), 29-36.
20. **Buyanovsky G.A. et Wagner G.H.** 1983. Annual cycles of carbon dioxide level in soil air. *Soil Science Society of America Journal* 47: 1139-1145.
21. **Canet Castelló, R.** 2005. La materia orgánica en Agricultura. Generalitat Valenciana, Conselleria d'Agricultura, Pesca i Alimentació.
22. **Cañizares, K. A. L., Rodrigues, J. D., Goto, R., Villas Bôas, R. L.** 2005. Influência da irrigação com água enriquecida com dióxido de carbono e da enxertia sobre o estado nutricional de plantas de pepino. *Horticultura Brasileira, Campinas*, v. 23, 1: 9-14.
23. **Cararo, D. C. et Duarte, S. N** 2002. Injeção de CO₂ e lâminas de irrigação em tomateiro sob estufa. *Horticultura Brasileira, Campinas*, v. 20, 3: 432-437.
24. **Carneiro Filho, A. G.** 2004. Teor de nutrientes e produtividade em híbridos de tomateiro em função de doses de CO₂ aplicadas via água de irrigação. 2004. 79 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
25. **Castillo Rodríguez, F.** 2005. *Biotechnología Ambiental*. Editorial Tébar. Madrid.
26. **Chang H.T. et Loomis W.E.** 1945. Effect of carbon dioxide on absorption of water and nutrients by roots. *Plant Physiology* 20: 221-230.

27. **Chang, E.H., Chung, R.S., Tsai, Y.H.** 2007: Effect of different applications rates of organic fertilizer on soil enzyme activity and microbial population. *Soil science and Plant Nutrition* 53: 132-140.
28. **Chaudhuri, U. N., Kirkham, M. B., Kanemasu, E. T.** 1990. Root growth of winter wheat under elevated carbon dioxide and drought. *Crop Science, Madison*, v. 30: 853-857.
29. **Chapman, H.D.** 1968. *The Mineral Nutrition of Citrus*. Universidad California, Div. Agric. Sci. Berkeley, E.E.U.U.
30. **Comisión de Las Comunidades Europeas.** 2000. Libro Verde. Hacia una estrategia europea de seguridad del abastecimiento energético, COM (2000) 769 final. Bruselas.
http://ec.europa.eu/energy/green-paper-energysupply/doc/green_paper_energy_supply_short_es.pdf
31. **Comisión de Las Comunidades Europeas.** 2006. Libro Verde. Estrategia europea para una energía sostenible, competitiva y segura, COM (2006) 105 final {SEC(2006) 317}. Bruselas.
http://ec.europa.eu/energy/green-paper-energy/doc/2006_03_08_gp_document_es.pdf
32. **Comisión de Las Comunidades Europeas.** 2006. The European Union and its Neighbours, Eurobarómetro especial número 259, octubre.
http://ec.europa.eu/public_opinion/archives/ebs/ebs_259_sum_en.pdf
33. **Comisión de Las Comunidades Europeas.** 2007: Comunicación de la Comisión al Consejo Europeo y al Parlamento Europeo. Una política energética para Europa. COM/2007/0001 final, Bruselas.
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2007:0001:FIN:ES:PDF>
34. **Comisión de Las Comunidades Europeas.** 1990. Directorate-General for Energy: Energy for a new century: the European perspective. *Energy in Europe*, número especial, julio.
35. **Comisión de Las Comunidades Europeas.** 1995. Libro Blanco. Una política energética para la Unión Europea. COM/95/0682 final. Bruselas.
<http://europa.eu/abc/doc/off/bull/fr/9512/p103101.htm>
36. **Comisión de Las Comunidades Europeas.** 2005. *European Energy and Transport -Trends to 2030- Update 2005*.
http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/figures/trends_2030_update_2005/energy_transport_trends_2030_update_2005_en.pdf
37. **Consejo de las Comunidades Europeas.** 1986. Resolución del Consejo, de 16 de septiembre de 1986, relativa a los nuevos objetivos de política energética

comunitaria para 1995 y a la convergencia de las políticas de los Estados miembros. DO C241, de 25 de septiembre.

[http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31986Y0925\(01\):ES:HTML](http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31986Y0925(01):ES:HTML)

38. **Consejo de las Comunidades Europeas.**1980. Resolución del Consejo, de 9 de junio de 1980, relativa a las nuevas líneas de acción de la Comunidad en materia de ahorro de energía Diario Oficial, número C 149 de 18 de junio. Edición especial en español: Capítulo 12, tomo 4. [http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31980Y0618\(02\):ES:HTML](http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31980Y0618(02):ES:HTML)
39. **Storlie C.A. et Heckman J.R.** 1996. Bell pepper yield response to carbonated irrigation water. *Journal of Plant Nutrition*. Volume 19, Issue 10-11.
40. **Storlie C.A. et Heckman J.R.** 1996b. Soil, Plant, and Canopy Responses To Carbonated Irrigation Water. *HortTechnology* april-june 1996 vol. 6 no. 2 111-114
41. **Cramer M.D., Oberholzer J.A., Combrink N.J.J.** 2001. The effect of supplementation of root zone dissolved inorganic carbon on fruit yield and quality of tomatoes (cv 'Daniella') grown with salinity. *Scientia Horticulturae* 2001 89:4.
42. **Cramer, M.D., Savidov, N., Lips S.H.,** 1996. The influence of enriched rhizosphere CO₂ concentrations on N uptake and metabolism in NR-deficient and wild type barley. *Physiol. Plant.* 97: 47-54.
43. **Cuquerella, J.** 1997. Técnicas y prácticas de desverdización de cítricos producidos en condiciones mediterráneas. VIII Symposium Internacional Phytoma. La calidad de los frutos cítricos en la post-recolección. Valencia (España), julio, 1997. Ed.: Phytoma.
44. **D'Albuquerque B. S., Frizzone, J., Duarte, S. N., Mingoti, R., Dias, N. Da Sousa S.,** 2007. V. F. de Qualidade física e química de frutos de meloeiro rendilhado cultivado sob diferentes épocas de aplicação de CO₂ via água de irrigação. *Irriga, Botucatu*, v. 12, 3: 273-280.
45. **De Camargo Carmello, Q.A., Kano K., Frizzone J.A., Da Silva Cardoso S.;** 2013. Nutrients' content and accumulation by net melon plant cultivated with potassium and CO₂ in the irrigation water. *Biotemas*, Vol.26(3), p.19
46. **Del Álamo Jiménez, J.C.** 2007. Bosques y cambio climático: la función de los bosques como sumideros de carbono y su contribución al cumplimiento del Protocolo de Kyoto por parte de España. Ponencia Escuela Agraria Cogullada, 22 de febrero de 2007.
47. **Enoch H.Z.**1990. Crop responses to aerial carbon dioxide. *Acta Horticulturae* 268: 17-32.

48. **Enoch, H.Z. et Olesen J.M.** 1993. Plant response to irrigation with water enriched with carbon dioxide. *New Phytol* 125(2):249–258.
49. **Gomes, T. M., Botrel, T. A., Modolo, V. A., Oliveira, R. F.** 2005. Aplicação de CO₂ via água de irrigação na cultura da alface. *Horticultura Brasileira*, Brasília, v. 23, n. 2: 316-319.
50. **Gómez Espí, J.M.** 1997. El Regadío en el umbral del siglo XXI: Planes de Mejora y Modernización. *Papeles de Geografía*. Nº 25: 75-102.
51. **Guri Baiget S.** 2002. Efectos de la fertirrigación carbónica y de la oxigenación del medio radicular en la productividad de los cultivos hortícolas. Tesis Doctoral. Universidad de Lérida, España.
52. **Guri Baiget S., Marfá O., Savé R.** 1999. Efecto de la irrigación carbónica en la producción de un cultivo de pimiento. IRTA, Departamento de Tecnología Hortícola.
53. **Hammer A.M., Li Y., Pelosi R., Stofella P.L.** 1995. Citrus rootstock and carbon dioxide enriched irrigation influence on seedling emergence, growth, and nutrient content. *Journal of Plant Nutrition*. Volume 18, Issue 7.
54. **Hanson P.J., Edwards N.T., Garten C.T., Andrews, J.A.** 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observation. *Biogeochemistry* 48:115–146.
55. **Housecroft C.E. et Sharpe A.G.** 2006. *Química Inorgánica*. Pearson Educación S.A. p. 368.
56. **Ibrahim A.** 1992. Response of Plant to Irrigation with CO₂-Enriched Water. *ISHS Acta Horticulturae* 323: Symposium on Soil and Soilless Media under Protected Cultivation in Mild Winter Climates.
57. **IPCC:** Intergovernmental Panel on Climate Change. "Tecnologías, políticas y medidas para mitigar el cambio climático""Carbon Dioxide Capture and Storage" <http://www.ipcc.ch/index.htm> [Consultado el 14/04/2015]
58. **Jagadeeswari, P.V. et K. Kumaraswamy.** 2000. Long-term effects of manure fertilizer schedules on the yield and nutrient uptake by rice crop in a permanent manorial experiment. *J. Ind. Soc. Soil Sci.* 48: 833-836.
59. **Jackson, M.L.,** 1964. *Análisis químico de suelos* (Traducido por J. Bertrán). Ediciones Omega, S. A. Barcelona, España. 662 p.
60. **Kimball B.A.** 1983. Carbon Dioxide and Agricultural Yield: An Assemblage and Analysis of 430 Prior Observations. *Agronomy Journal* Vol. 75 No. 5: 779-788.
61. **Krizek DT.** 1979. Carbon dioxide enrichment. In: *Proceedings Cotton Producers Research Conference*. Plioenix, Arizona: 283- 290.

62. **Lado L., Rodrigo M.J., Zacarías L.** 2014 Maturity indicators and citrus fruit quality. *Stewart Postharvest Review*, 2:2.
63. **Lanz, K et Greenpeace España.** 1990. El libro del agua. Editorial Debate S.A. Madrid.
64. **Larinova A.A., Rozanova, L. N., Yevdokimov, I. V., Yermolayev, A. M., Kurganova, I. N., Blagodatsky, S. A.** 2003. Land-use change and management effects on carbon sequestration in soils of Russia's South Taiga zone. *Tellus* 55B: 331-333-
65. **Legaz F., et Primo-Millo, E.** 1988. Normas para la Fertilización de los Agríos. Generalitat Valenciana, Consellería d'Agricultura, Pesca i Alimentació. Fullets Divulgació. N°5-88.
66. **Legaz F., Serna M. D., Ferre, P., Cebolla, V., Primo-Millo, E.** 1995. Análisis de hojas, suelos y aguas para el diagnóstico nutricional de plantaciones de cítricos. Procedimiento de toma de muestras. Generalitat Valenciana, Consellería d'Agricultura, Pesca i Alimentació. Fullets de Divulgació. Valencia, España.
67. **Legaz F., Serna M., Primo-Millo, E.** 1995b. La Deficiencia de Hierro en los Cítricos. Generalitat Valenciana, Consellería d'Agricultura, Pesca i Alimentació. Fullets de Divulgació. Valencia, España.
68. **Lincago P.** 2008. Inyección de CO₂ al suelo en tres fases fenológicas de *Gypsophila* (*Gypsophila paniculata* var. Million Stars) a campo abierto. Otón, Pichincha. Publicaciones Facultad de Ciencias Agrícolas. n° XXII. Universidad Central de Ecuador.
69. **Livingston B.E. et Beall R.** 1934. The soil as direct source of carbon dioxide for ordinary plants. *Plant Physiology* 9: 237-259.
70. **Yiqi L. et Zhou, X.** 2006. Soil Respiration and the Environment. Academic Press, Burlington, MA. 2006.
71. **Marcelis L.F.M.** 1986. Some aspects of CO₂ supplementation for crop production. In: Report of Three Research Projects. Littlehampton, England: Glasshouse crops Research Institute, 37 pp.
72. **Marín Quemada J.M.** 2008 Política Energética en la UE: El debate entre la timidez y el atrevimiento. *Economía de la Energía*. mayo-junio 2008. N.º 842 ICE
73. **Martínez E., Fuentes J. P., Acevedo E. B.** 2008. Soil organic carbon and soil properties. *J. Soil Sc. Plant Nutr.* 8 (1) 2008: 68-96.
74. **Matocha J.E et Mostoghimi S.** 1988. Effects of carbon dioxide an iron enrichment of a calcareous soil on Fe chlorosis, root and shoot development of grain sorghum. *Journal of Plant Nutrition* 11: 1503-1515.

75. **Mauney J.R. et Hendrix D.L.** 1988. Responses of glasshouse grown cotton to irrigation with carbon dioxide-saturated water. *Crop Science* 28: 835-838.
76. **Menéndez, I., Moreno, G., Gallardo, J.F., Saavedra, J.** 1995. Soil solution composition in forest soils of Sierra de Gata mountains, Central-western Spain: relationship with soil water content. *Arid Soil Res. Rehab.*, 9: 495-502.
77. **Miller G.W.** 1960. Carbon dioxide-biocarbonate absorption, accumulation, effects of various plant metabolic reactions, and possible relations to lime-induced chlorosis. *Soil Science* 89: 241-245.
78. **Mingo-Castel A.M., Negm F.B., Smith O.E.** 1974. Effect of carbón dioxide and ethylene on tuberization of isolated potato stolons cultured in vitro. *Plant Physiology* 53: 798-801.
79. **Ministerio de la Presidencia.** 2006. Real Decreto 1370/2006, de 24 de noviembre. BOE 282 de 25 de noviembre de 2006.
80. **Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino. Secretaría de Estado de Cambio Climático. Dirección General de Información Ambiental Estratégica. Unidad de Información Ambiental Estratégica.** 2010. Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes a la Atmósfera.
81. **Moore, F. D.** 1990. Potential for irrigation with carbon dioxide. *Acta Horticulturae*, Leuven, 1990, n. 278: 171-178.
82. **Mortensen L.M.** 1986. Carbonated water to tomatoes-interim results. *Gartneryrket* 76: 262.
83. **Naciones Unidas.** 1988. Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
84. **Nilsen, S., Hovland, C., Dons, C., Sletten, S. P.** 1983. Effect of CO₂ enrichment on photosynthesis, growth and yield of tomato. *Sciencia Horticulturae*, 20:1-14.
85. **Novero, R., Smith, D. H., Moore F. D., Shanahan J. F., D'Andria R.** 1991. Field Grown Tomato Response to Carbonated Water Application. *Agronomy Journal*. Vol. 83 No. 5: 911-916.
86. **Noyes H.A.** 1914. The effect on plant growth of saturating a soil with carbon dioxide. *Science* 40: 792-796.
87. **Parker, D. R., Norvell, W. A.** 1999. Advances in solution culture methods for plant mineral nutrition research. *Advances in Agronomy*, San Diego, v. 65: 151-203.
88. **Parlamento europeo y Consejo.** 2001. Directiva 2001/81/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2001. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 27-11-2001.

89. **Parlamento europeo y Consejo.** 2003. Directiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de octubre de 2003. Diario Oficial de la Unión Europea, 25-10-2003.
90. **Parlamento europeo y Consejo.** 2009. Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009. Diario Oficial de la Unión Europea, 5-6-2009.
91. **Paula F. L. M., De Frizzone, J. A., Paula, A. L., De Dia, C. T. S., Soares T. M.** 2011. Produção de pimenta tabasco com aplicação de CO₂, utilizando-se irrigação por gotejamento. *Acta Scientiarum*, Maringá, v. 33: 133-138.
92. **Peña, D.** 2002. *Regresión y diseño de experimentos*". Alianza Editorial.Madrid
93. **Perry R. H.et Green D. W.** 2001. *Manual del Ingeniero Químico*. McGraw Hill. Vol 1. p 2.132. Ciudad de México.
94. **Pinto, J. M.** 1997. Aplicação de dióxido de carbono via água de irrigação em meloeiro. 1997. 82 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba.
95. **Qui, J., Marshall, J.D., Mattson, K.G.**1994. High soil carbon dioxide concentration inhibits root respiration of Douglas fir. *New Phytol*, 128: 435-442.
96. **Raich, J.W., Schlesinger, W.H.** 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 44B:81-89.
97. **Ramos, C.** 1996. El riego con aguas residuales. Aprovechamiento del agua depurada en la Comunidad Valenciana. *Sanejament d'Aigües-Generalitat Valenciana* (eds): 49-63.
98. **Reitger L.F.** 1927. The influence of carbon dioxide on bacteria. *Journal of Bacteriology* 14: 101-127.
99. **Romero Villafranca, R. et Zúnica Ramajo, L.R.** 2005. *Métodos Estadísticos en Ingeniería*. Universidad Politécnica de Valencia.
100. **Ryan J., Stroehlein J.L., Miyamoto S.** 1975. Sulphuric acid applications to calcareous soils: effects on growth and chlorophyll content of common Bermuda grass in the greenhouse. *Agronomy Journal* 67: 633-637.
101. **Saltzman S.** 1989. Combined application of liquid fertilizer and pesticides through an irrigation system. BARD report. Agricultural Research Organization, Bet Dagan, Israel.
102. **Salvador Pérez A.** 1997 Resultados sobre la desverdización en nuevas variedades "Clemenpons" y "Lorentina". VIII Symposium Internacional Phytoma. La calidad de los frutos cítricos en la post-recolección. Valencia (España). julio, 1997. Ed.: Phytoma.

103. **Skelding A.D.** 1957. The effect of carbon dioxide on the absorption of manganese by root tissues of red beet. *Annals of Botany* 21: 121-141.
104. **Smith S.J., Edmonds J.A., Hartin C.A., Mundra A., Calvin K.V.** 2015. Near-Term Acceleration in the Rate of Temperature Change. *Nature Climate Change* 5(4):333-336. doi:10.1038/nclimate2552
105. **Thompson, L.M. et Troeh, F. R.** 1988. *Los Suelos y su Fertilidad*. Ed. Reverté, Barcelona.
106. **United Nations Framework Convention on Climate Change (CMNUCC)** http://unfccc.int/portal_espanol/items/3093.php [Consultado el 12/12/2011]
107. **Van der Westhuizen M.M. et Cramer M.D.,** 1998. The influence of elevated rhizosphere dissolved inorganic carbon concentration on respiratory O₂ and CO₂ flux in tomato roots. *J. Exp. Bot.* 49: 1997-1985.
108. **Vivancos A.D.** 1993. *Fertirrigación*. Madrid: Mundi-Prensa, 1993. 217 p.
109. **Vourinen A.H., Vapaavuori E.M., Raatikainen O., Lapinjoki S.P.** 1992. Metabolism of inorganic carbon taken up by roots in *Salix* plants. *J.Exp. Bot.* 43: 789-795.
110. **Zdruli, P., Jones, R.J.A., Montanarella, L.** 2004. *Organic Matter in the Soils of Southern Europe*. European Soil Bureau Technical Report, EUR 21083 EN, (2004), 16pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.