

Dinámica del silicio agregado y las biomineralizaciones de sílice amorfa en el sistema suelo-cultivo (*Triticum aestivum* L.) del Partido de General Pueyrredón: sus efectos sobre las propiedades químicas y mineraloquímicas

*Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires,
Área Ciencias Agropecuarias*

Celia Frayssinet

Licenciada en Ciencias Ambientales - Universidad de Buenos Aires - 2017

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (CONICET) - Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario (FCEyN-UNMdP)



FAUBA

Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires



COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

Margarita L., Osterrieth

Licenciada en Geología (Universidad Nacional de La Plata)

Doctora en Ciencias Naturales orientación Geología (Universidad Nacional de La Plata)

Codirector

Jorge E., Marcovecchio

Licenciado en Ciencias Biológicas, orientación marina (Universidad Nacional de Mar del Plata)

Doctor en Ciencias Biológicas (Universidad Nacional de Mar del Plata)

Consejero de Estudios

Esteban A., Ciarlo

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad Nacional de Buenos Aires)

JURADO DE TESIS

JURADO

Analía Rosa, Becker

Licenciada en Geología (Universidad Nacional de Río Cuarto)

Doctora en Ciencias Geológicas (Universidad Nacional de Río Cuarto)

JURADO

Olga Susana, Heredia

Ingeniera Agrónoma (Universidad de Buenos Aires)

Doctora en Ciencias Veterinarias - Toxicología (Universidad de Buenos Aires)

JURADO

Román, Serrago

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

Fecha de defensa de la tesis: 31 de julio de 2023

Dedicatoria

Quiero dedicarle este logro a cada uno de los integrantes de mi familia, dado que sin su apoyo no hubiera sido tan sencillo asumir este compromiso ni seguir adelante en los momentos complicados. Particularmente me gustaría resaltar a mi madre y hermana, para quienes no encuentro palabras que expliquen cuanto las amo y el placer que me da poder aprender de ellas y disfrutarlas a diario. Por último, a mi padre, quien como ingeniero agrónomo me cultivó sobre la parte vegetal de la carrera, por ejemplo: llevándome a sembrar los bulbos y manejar los hermosos tulipanes, como así también a la cosecha de trigo o cebada en su campo de Pigüé, entre otras hermosas actividades compartidas que han despertado mi interés para realizar este doctorado y seguir formándome en el área de agronomía. En fin, a mi clon perfecto, mi padre, mi directora de vida y cada uno de los integrantes de mi familia más cercana ¡¡Gracias totales!!

Al mismo tiempo a mis amistades escolares, deportivas, universitarias y laborales, que he generado a lo largo de estos 30 años y han sido un apoyo más que troncal en estos últimos 5. Dentro de este gran grupo, me gustaría mencionar a la Ing. Paula Re, quién se ha convertido en una maravillosa hermana de la vida, siendo un apoyo sustancial tanto académica como personalmente a lo largo de todo el camino universitario recorrido. Todas las personas de los distintos grupos, afortunadamente puestas en mi camino. me han permitido distender, compartir charlas, alegrías, hermosos abrazos, y podría seguir mencionando muchísimas más actitudes sumamente satisfactorias que he tenido el placer de vivir con cada un@ de ell@s, pero me gustaría finalizar con el destacable hecho de que siempre han confiado en mí y transmitido de diversas maneras que crea en mi capacidad cerebral para alcanzar este objetivo. Vinculado a esto último no quería dejar de agradecerle al Dr. Ignacio Mendiondo, dado que es quien ha posibilitado que yo

continúe haciendo sinapsis, proceso fundamental para seguir con el desarrollo de esta tesis doctoral.

Finalmente quiero destacar que este título tendrá únicamente mi nombre pero yo veo el de tantas personas sumamente maravillosas que me han ayudado a lo largo de la vida para alcanzarlo. Haberlo logrado con semejante compañía, que vaya una a saber cómo es que hoy en día me siguen aguantando, me invade de orgullo y me brinda una felicidad extrema. Agradecidísima con cada un@ de ustedes porque, a pesar de todas mis particularidades, continúan brindándome su apoyo y haciéndome mejor persona.

Agradecimientos

Me siento sumamente dichosa y enormemente agradecida por haber podido encarar este desafío con gente maravillosa a mi alrededor. Entre ellos, se encuentran tod@s mis compañer@s del grupo de Geoecología de suelos y ambientes sedimentarios, que han estado siempre más que disponibles para colaborar en cualquier aspecto que fuera necesario, acompañándome en todo y enseñándome a diario. Destacando dentro de este hermoso grupo a Lau, Nati, Mari y Fer, ya que me han ayudado enormemente con las actividades de campo, laboratorio, procesamiento de datos e interpretación de la novedosa información obtenida a lo largo de esta tesis. También a mi codirector y consejero académico, quienes me han ayudado enormemente con el desarrollo de este doctorado, respondiendo a todas mis inquietudes y explicándome procesos totalmente desconocidos para mí hasta entonces. A la Dra. Lourdes, Hernández-Apaolaza quien me ha recibido muy consideradamente en su laboratorio de la UAM, permitiéndome realizar en ambas estadias, la mayoría de los análisis químicos de este proyecto doctoral. Con ella he podido aprender muchísimas cuestiones prácticas y teóricas de laboratorio, que he tenido el placer me fueran inculcadas muy sabiamente desde su vasta experiencia. Al mismo tiempo agradecer a su equipo, que me ha ayudado en el día a día para realizar dichos análisis, mencionando entre ellos a Vir, Mari, Fabi y José, quienes permitieron que mi paso por su laboratorio sea más que agradable y sencillo gracias a todos sus aportes realizados. También, agradezco inmensamente al Dr. Lux y la Dra. Kohanová quienes me han recibido más que amablemente y me han dado lugar en su laboratorio de la universidad de Bratislava, para realizar ensayos que han contribuido enormemente y me han formado en áreas totalmente novedosas para mí.

Al mismo tiempo agradecerle a toda la EPG de la Facultad de Agronomía de la UBA, por haberme formado en los diversos cursos que tuve la posibilidad de tomar con profesionales sumamente destacados, como así también a todo el personal del área directiva, administrativa, secretaría y académica de dicha escuela ya que me han provisto de una atención mas que sobresaliente en cada uno de los casos en los que recurrí a ellos. Han hecho que sea un placer poder ser alumna de dicha EPG, habiendo disfrutado cada actividad dentro de la misma y egresando con el inmenso honor que me brinda haber alcanzado el título de doctora emitido por esta institucion.

Finalmente a mi directora, quién ha confiado plenamente en mí para realizar este proyecto y me ha enseñado muchísimas cosas, que me han hecho crecer en varios aspectos tanto académicos como personales, a lo largo de estos años.

Declaración

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.



Frayssinet, Celia

INDICE GENERAL

Resumen	xix
Abstract	xxi
Capítulo 1. Introducción general.....	1
1.1. El silicio en agroecosistemas	1
1.2. Biomineralizaciones de silicio y sus funciones	3
1.3. Importancia, abordaje en la actualidad, antecedentes locales y fundamentos	6
1.4. Antecedentes y características generales de la zona de estudio.....	7
1.5. Objetivos e hipótesis.....	8
1.5.1. Objetivo general	9
1.5.2. Hipótesis.....	9
1.5.3. Objetivos específicos	9
Capítulo 2. Materiales y métodos	10
2.1. Ubicación y selección del área de estudio.....	10
2.2. Diseño del ensayo y tratamientos a aplicar	11
2.2.1. Ensayos.....	13
2.2.1.1. Primer ciclo de cultivo (2018)	13
2.2.1.2. Segundo ciclo de cultivo (2019)	14
2.3. Análisis estadísticos	16
2.4. Contribuciones metodológicas.....	17
Capítulo 3. Efectos sobre las plantas de trigo de los distintos tratamientos: relaciones entre la concentración de silicio, fósforo y metales pesados, y sus posibles asociaciones con los silicofitolitos.....	18
3.1. Introducción.....	18
3.1.1. El silicio y su rol en la planta.....	19
3.2. Materiales y métodos	21
3.2.1. Desarrollo de los ciclos del cultivo.....	21
3.2.2. Realización de muestreos	23
3.2.3. Análisis de laboratorio.....	24
3.2.3.1. Altura	24

3.2.3.2. Características químicas.....	25
3.2.3.2.1. Determinación de silicio total en peso seco.....	25
3.2.3.2.2. Determinación del fósforo.....	26
3.2.3.3.3. Determinación de metales pesados (Cu y Cd).....	26
3.2.3.3. Caracterización cualitativa, cuantitativa y mineraloquímica de los silicofitolitos (SiF)	26
3.3. Resultados y discusión	27
3.3.1. Datos meteorológicos.....	27
3.3.2. Altura de las plantas.....	27
3.3.2.1. Ciclo de cultivo 2018	27
3.3.2.2. Ciclo de cultivo 2019	28
3.3.2.3. Comparación entre ambos ciclos	29
3.3.3. Concentración de elementos químicos.....	30
3.3.3.1. Concentración de silicio	31
3.3.3.1.1. Ciclo de cultivo 2018	31
3.3.3.1.1.2. Estadio madurativo:.....	34
3.3.3.1.2. Ciclo de cultivo 2019	34
3.3.3.1.2.1. Estadio madurativo.....	38
3.3.3.1.3. Comparación entre ambos ciclos.....	38
3.3.3.2. Concentración de fósforo	41
3.3.3.2.1. Ciclo de cultivo 2018	41
3.3.3.2.1.2. Relación entre la concentración de silicio y fósforo.....	44
3.3.3.2.1.3. Estadio madurativo.....	45
3.3.3.2.2. Ciclo de cultivo 2019	45
3.3.3.2.2.1. Relación entre la concentración de silicio y fósforo.....	48
3.3.3.2.2.2. Estadio madurativo.....	49
3.3.3.2.3. Comparación entre ambos ciclos.....	49
3.3.3.3. Concentración de cobre	52
3.3.3.3.1. Ciclo de cultivo 2018	52
3.3.3.3.1.1. Relación entre la concentración de silicio y cobre	55
3.3.3.3.1.2. Estadio madurativo.....	56
3.3.3.3.2. Ciclo de cultivo 2019	56
3.3.3.3.2.1. Relación entre la concentración de silicio y cobre	59
3.3.3.3.2.2. Estadio madurativo.....	60
3.3.3.3.3. Comparación entre ambos ciclos.....	60
3.3.3.4. Concentración de cadmio	63
3.3.3.4.1. Ciclo de cultivo 2018	63
3.3.3.4.1.2. Relación entre la concentración de silicio y cadmio	67
3.3.3.4.1.3. Estadio madurativo.....	68
3.3.3.4.2. Ciclo de cultivo 2019	68
3.3.3.4.2.1. Relación entre la concentración de silicio y cadmio	72
3.3.3.4.2.2. Estadio madurativo.....	74
3.3.3.4.3. Comparación entre ambos ciclos.....	74
3.3.4. Mineraloquímica, silicofitolitos y composición elemental	78
3.4. Conclusiones	83
Capítulo 4. Efectos sobre el horizonte A de los Argiudoles de los distintos tratamientos: relaciones entre la concentración de silicio, fósforo y metales pesados, y sus posibles asociaciones con los silicofitolitos.....	87
4.1. Introducción.....	87

4.1.1. Silicio y su rol en los suelos.....	87
4.2. Materiales y métodos	93
4.2.1. Características generales del área de estudio	93
4.2.2. Determinación de características morfológicas.....	94
4.2.3. Metodologías de muestreo de las soluciones del suelo	94
4.2.4. Análisis de laboratorio.....	97
4.2.4.1. Caracterización física de los suelos	97
4.2.4.1.1. Determinación de resistencia mecánica	97
4.2.4.1.2. Determinación de la densidad aparente	97
4.2.4.1.3. Determinación de la textura o granulometría.....	97
4.2.4.2. Determinación del pH	98
4.2.4.3. Determinaciones químicas:.....	98
4.2.4.3.1. Silicio en la solución del suelo	98
4.2.4.3.2. Fósforo en la solución del suelo.....	98
4.2.4.3.3. Cadmio y cobre en la solución del suelo	99
4.2.4.4. Caracterización cualitativa, cuantitativa y mineraloquímica de silicofitolitos	99
4.3 Resultados y discusión	97
4.3.1 Características morfológicas.....	99
4.3.2. Características físicas.....	100
4.3.2.1 Resistencia mecánica.	100
4.3.2.2. Densidad aparente.....	100
4.3.2.3. Características texturales.....	101
4.3.4. Determinación del pH.....	102
4.3.5. Características químicas (Si, P, Cu y Cd):.....	102
4.3.5.1. Concentración de dióxido de silicio en la solución del suelo	104
4.3.5.1.1. Ciclo de cultivo 2018	104
4.3.5.1.2. Ciclo de cultivo 2019	106
4.3.5.1.3. Comparación de ambos ciclos	109
4.3.5.2. Concentración de fosfatos en la solución del suelo	113
4.3.5.2.1. Ciclo de cultivo 2018	113
4.3.5.2.2. Ciclo de cultivo 2019	116
4.3.5.2.3. Comparación entre ambos ciclos.....	119
4.3.5.2.3.1. Relación entre las concentraciones de dióxido de silicio y fosfatos	121
4.3.5.3 Concentración de cobre en la solución de los suelos	125
4.3.5.3.1. Ciclo de cultivo 2018	125
4.3.5.3.2. Ciclo de cultivo 2019	128
4.3.5.3.3. Comparación entre ambos ciclos.....	131
4.3.5.3.3.1. Relación entre las concentraciones de dióxido de silicio y cobre	134
4.3.5.4 Concentración de cadmio en la solución del suelo	137
4.3.5.4.1. Ciclo de cultivo 2018	137
4.3.5.4.2. Ciclo de cultivo 2019	140
4.3.5.4.3. Comparación entre ambos ciclos.....	142
4.3.5.4.3.1. Relación entre las concentraciones de dióxido de silicio y cadmio	144
4.3.6. Caracterización mineraloquímicas de silicofitolitos	147
4.4. Conclusiones	153
 Capítulo 5. Relación entre las concentraciones de los distintos elementos en el sistema suelo-plantas al finalizar el ciclo	 157

5.1 Introducción	157
5.2 Resultados.....	158
5.2.1 Silicio	159
5.2.2. Fósforo	160
5.2.3 Cobre	161
5.2.4. Cadmio	162
5.3 Discusión	163
5.4 Conclusión	164
Capítulo 6. Discusión general.....	165
6.1. Antecedentes	165
6.2. Principales logros	166
6.2.1. Plantas.....	166
6.2.2. Suelos	171
6.2.3. Interacción planta-suelo	176
6.3. Constatación de las hipótesis	176
6.4. Perspectivas futuras.....	177
Bibliografía	179
Apéndice	200

INDICE DE CUADROS

Cuadro 4.1. Características morfológicas determinadas para los suelos de ambos ensayos	100
Cuadro 4.2: Valores promedio de las propiedades físicas determinadas	101
Cuadro 4.3: Concentraciones de dióxido de silicio (mg/L) en las soluciones del suelo, extraídas con rizometros	104
Cuadro 4.4: Concentraciones de dióxido de silicio (mg/L) presentes en las soluciones del suelo extraídas mediante rizometros	107
Cuadro 4.5: Concentraciones de fosfatos (mg/L) en las soluciones del suelo, extraídas con rizometros	113
Cuadro 4.6: Concentraciones de fosfatos (mg/L) presentes en las soluciones del suelo extraídas mediante rizometros	116
Cuadro 4.7: Concentraciones de cobre (mg/L) en las soluciones del suelo, extraídas con rizometros	125
Cuadro 4.8: Concentraciones de cobre (mg/L) presentes en las soluciones del suelo extraídas mediante rizometros	129
Cuadro 4.9: Concentraciones de cadmio (mg/L) en las soluciones del suelo, extraídas con rizometros	137
Cuadro 4.10: Concentraciones de cadmio (mg/L) en las soluciones del suelo, extraídas con rizometros	140
Cuadro 4.11: Contenido de silicofitolitos y morfotipos predominantes en los niveles estudiados de ambos ensayos	148

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema general del ciclo biogeoquímico del silicio	5
Figura 2.1: Mapa de ubicación.....	11
Figura 2.2: Diagrama del ensayo	12
Figura 2.3: Línea del tiempo del primer ciclo.....	14
Figura 2.4: Línea del tiempo del segundo ciclo	16
Figura 3.1: Imágenes de las muestras vegetales que serán analizadas.....	25
Figura 3.2: Altura promedio por tratamiento y estadio.....	28
Figura 3.3: Altura promedio por tratamiento y estadio, expresada en centímetros (cm) de las plantas cosechadas durante el ciclo de cultivo del 2019.....	29
Figura 3.4: Altura promedio en los distintos órganos dentro del estadio madurativo	30
Figura 3.5: Concentración de silicio (mg/g) por tratamiento en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado.....	32
Figura 3.6: Concentración de silicio (mg/g) promedio de todos los tratamientos en cada estadio analizado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018.....	33
Figura 3.7: Concentración de silicio (mg/g) agrupando todos los tratamientos en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado	34
Figura 3.8: Concentración de silicio (mg/g) por tratamiento en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado.....	35
Figura 3.9: Concentración de silicio (mg/g) promedio de todos los tratamientos en cada estadio analizado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2019.....	36
Figura 3.10: Concentración de silicio (mg/g) agrupando todos los tratamientos en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado	37
Figura 3.11: Concentración promedio de silicio (mg/g) alojado en los distintos tratamientos dentro del estadio madurativo en ambos ciclos ensayados. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.....	39
Figura 3.12: Concentración promedio de silicio (mg/g) agrupando todos los tratamientos en los distintos órganos a través de los distintos estadios raleados, comparándolos entre ambos ciclos ensayados.....	40
Figura 3.13: Concentración de fósforo (mg/g) por tratamiento en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado.....	42
Figura 3.14: Concentración de fósforo (mg/g) promedio de todos los tratamiento en cada estadio analizado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018.....	42
Figura 3.15: Concentración de fósforo (mg/g) agrupando todos los tratamientos en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado	43
Figura 3.16: Concentraciones promedios de silicio (mg/g) y fósforo (mg/g) agrupando todos los tratamientos dentro de cada órgano evaluado.....	44
Figura 3.17: Concentración de fósforo (mg/g) por tratamiento en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado.....	46
Figura 3.18: Concentración de fósforo (mg/g) promedio de todos los tratamiento en cada estadio analizado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018	47
Figura 3.19 Concentración de fósforo (mg/g) agrupando todos los tratamientos en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado	47
Figura 3.20: Concentraciones promedios de silicio (mg/g) y fósforo (mg/g) agrupando todos los tratamientos dentro de cada órgano evaluado.....	48

Figura 3.21: Concentración promedio de fósforo (mg/g) alojado en los distintos tratamientos dentro del estadio madurativo en ambos ciclos ensayados	50
Figura 3.22: Concentración de fósforo (mg/g) agrupando todos los tratamientos en los distintos órganos analizados, a lo largo de los distintos estadios en ambos ciclos.....	50
Figura 3.23: Concentración de cobre (mg/g) por tratamiento en cada estadio y dentro de cada órgano	53
Figura 3.24: Concentración de cobre (mg/g) promedio de todos los tratamiento en cada estadio analizado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018.....	54
Figura 3.25: Concentración de cobre (mg/g) agrupando todos los tratamientos en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado	54
Figura 3.26: Concentraciones promedios de silicio (mg/g) y cobre (mg/g) agrupando todos los tratamientos dentro de cada órgano evaluado.....	55
Figura 3.27: Concentración de cobre (mg/g) por tratamiento en cada estadio y dentro de cada órgano,	57
Figura 3.28: Concentración de cobre (mg/g) promedio de todos los tratamiento en cada estadio analizado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2019.....	58
Figura 3.29: Concentración de cobre promedio (mg/g) agrupando todos los tratamientos dentro de cada órgano evaluado.....	58
Figura 3.30: Concentraciones promedios de silicio (mg/g) y cobre (mg/g) agrupando todos los tratamientos dentro de cada órgano evaluado.....	59
Figura 3.31: Concentración promedio de cobre (mg/g) alojado en los distintos tratamientos dentro del estadio madurativo en ambos ciclos ensayados. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.....	61
Figura 3.32: Concentración promedio de cobre (mg/g) agrupando todos los tratamientos en los distintos órganos a través de los distintos estadios raleados, comparándolos entre ambos ciclos ensayados.....	62
Figura 3.33: Concentración de cadmio (mg/g) por tratamiento en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado.....	64
Figura 3.34: Concentración de cadmio (mg/g) promedio de todos los tratamiento en cada estadio analizado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018	65
Figura 3.35: Concentración de cadmio (mg/g) agrupando todos los tratamientos en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado	66
Figura 3.36: Concentraciones promedios de silicio (mg/g) y cadmio (mg/g) agrupando todos los tratamientos dentro de cada órgano evaluado.....	67
Figura 3.37: Concentración de cadmio (mg/g) por tratamiento en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado.....	70
Figura 3.38: Concentración de cadmio (mg/g) promedio de todos los tratamiento en cada estadio analizado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2019	71
Figura 3.39: Concentración de cadmio (mg/g) agrupando todos los tratamientos en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado	72
Figura 3.40: Concentraciones promedios de silicio (mg/g) y cadmio (mg/g) agrupando todos los tratamientos dentro de cada órgano evaluado.....	73
Figura 3.41: Concentración promedio de cadmio (mg/g) alojado en los distintos tratamientos dentro del estadio madurativo en ambos ciclos ensayados. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.....	75

Figura 3.42: Concentración de cadmio (mg/g) agrupando todos los tratamientos en los distintos órganos analizados de la planta comparando ambos ciclos completos de desarrollo del cultivo.....	76
Figura 3.43: Imágenes de los SiF presentes en los distintos órganos de las plantas de trigo en estadio madurativo... 80	
Figura 3.44: Análisis mineraloquímico de SiF, mediante MEB, EDS, y espectroscopía Raman.....	79
Figura 4.1: Imágenes del epipedón mólico.....	92
Figura 4.2: Imágenes de rizometros y tubos.....	94
Figura 4.3: Concentración de dióxido de silicio (mg/L) obtenida con ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos) registradas en el estadio madurativo	105
Figura 4.4: Concentración de dióxido de silicio (mg/L) obtenida con ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos), registradas en el estadio madurativo del ciclo de cultivo 2019	108
Figura 4.5: Concentraciones de SiO ₂ (mg/L) promedio obtenidas, agrupando las 3 profundidades y comparando ambos ciclos para cada tratamiento, en el estadio madurativo.....	109
Figura 4.6: Concentraciones promedios de SiO ₂ (mg/ L) obtenidas para el estadio madurativo, por profundidad para cada ciclo, aplicando ambas metodologías de extracción.....	108
Figura 4.7: Concentraciones promedio de SiO ₂ (mg/L), obtenidas para ambos ciclos, aplicando ambas metodologías de extracción	112
Figura 4.8: Concentración de fosfatos (mg/L) obtenida con ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos) registradas en el estadio madurativo del ciclo de cultivo 2018.....	115
Figura 4.9: Concentración de fosfatos (mg/L) obtenida con ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos) registradas en el estadio madurativo del ciclo de cultivo 2019.....	118
Figura 4.10: Concentraciones de H-PO ₄ (mg/L) promedio obtenidas, agrupando las 3 profundidades y comparando ambos ciclos para cada tratamiento, en el estadio madurativo.....	119
Figura 4.11: Concentraciones promedios de H-PO ₄ (mg/ L) obtenidas para el estadio madurativo, por profundidad.....	121
Figura 4.12: Concentraciones de SiO ₂ (mg/L) y H-PO ₄ (mg/L) promedio obtenidas, agrupando las 3 profundidades y comparando ambos ciclos para cada tratamiento, en el estadio madurativo	122
Figura 4.13: Concentraciones promedio de H-PO ₄ (mg/L), obtenidas para ambos ciclos, aplicando ambas metodologías de extracción	124
Figura 4.14: Concentración de cobre (mg/L) obtenida con ambas metodologías de extracción	127
Figura 4.15: Concentración de cobre (mg/L) obtenida con ambas metodologías de extracción	130
Figura 4.16: Concentraciones de Cu (mg/L) promedio obtenidas, agrupando las 3 profundidades y comparando ambos ciclos para cada tratamiento, en el estadio madurativo.....	132
Figura 4.17: Concentraciones promedios de Cu (mg/ L) obtenidas para el estadio madurativo, por profundidad.....	133

Figura 4.18: Concentraciones de SiO ₂ (mg/L) y Cu (mg/L) promedio obtenidas, agrupando las 3 profundidades y comparando ambos ciclos para cada tratamiento, en el estadio madurativo	134
Figura 4.19: Concentraciones promedio de Cu (mg/L), obtenidas para ambos ciclos, aplicando ambas metodologías de extracción	136
Figura 4.20: Concentración de cadmio (mg/L) obtenida con ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos) registradas en el estadio madurativo del ciclo de cultivo 2018.....	135
Figura 4.21: Concentración de cadmio (mg/L) obtenida con ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos) registradas en el estadio madurativo del ciclo de cultivo 2019.....	138
Figura 4.22: Concentraciones de Cd (mg/L) promedio obtenidas, agrupando las 3 profundidades y comparando ambos ciclos para cada tratamiento, en el estadio madurativo.....	143
Figura 4.23: Concentraciones promedios de Cd (mg/ L) obtenidas para el estadio madurativo, por profundidad.....	144
Figura 4.24: Concentración de SiO ₂ (mg/L) y Cd (mg/L) promedio obtenidas, agrupando las 3 profundidades y comparando ambos ciclos para cada tratamiento, en el estadio madurativo	145
Figura 4.25: Concentración promedio de Cd (mg/L), obtenidas para ambos ciclos, aplicando ambas metodologías de extracción	147
Figura 4.26: Silicofitolitos en suelos. Morfotipos predominantes en los niveles pedológicos estudiados.....	150
Figura 5.1: Relación de los valores promedio de Si obtenidos dentro de toda la planta (mg/g) y en la solución del suelo del horizonte A completo (mg/L) al momento de la cosecha	160
Figura 5.2: Relación de los valores promedio de P obtenidos dentro de toda la planta (mg/g) y en la solución del suelo del horizonte A completo (mg/L) al momento de la cosecha	161
Figura 5.3: Relación de los valores promedio de Cu obtenidos dentro de toda la planta (mg/g) y la solución del suelo del horizonte A completo (mg/L) al momento de la cosecha	162
Figura 5.4: Relación de los valores promedio de Cd obtenidos dentro de toda la planta (mg/g) y la solución del suelo del horizonte A completo (mg/L) al momento de la cosecha	163
Figura 6.1: Esquema general conteniendo los principales resultados promedios obtenidos	176

Abreviaturas

Si= Silicio

SiF= Silicofitolitos

P= Fósforo

MP= Metales pesados

Cu= Cobre

Cd= Cadmio

C= Carbono

O= Oxígeno

Ca= Calcio

Na= Sodio

Al= Aluminio

Fe= Hierro

Mg= Magnesio

Mn=Manganeso

Zn= Zinc

tn: Toneladas

ha= Hectárea

HF= Ácido fluorhídrico

AA= Absorción atómica

MOp= Microscopio óptico

MEB= Microscopio electrónico de barrido

Resumen

El silicio es reconocido como un elemento benéfico para el crecimiento de las plantas cumpliendo un rol creciente e importante en la sustentabilidad agrícola y en la preservación ambiental. La Llanura pampeana es altamente fértil con actividades agrícolas intensivas, que promovieron diversos impactos sobre sus agroecosistemas. Este trabajo aborda y genera por primera vez datos básicos, a partir de un ensayo en condiciones de campo, surgidos al evaluar la dinámica del silicio agregado y las biomineralizaciones de sílice amorfa en el sistema suelo-cultivo (*Triticum aestivum L.*) del Partido de General Pueyrredón: sus efectos sobre las propiedades químicas y mineraloquímicas. El contenido de silicio, fósforo, metales pesados y silicofitolitos fue analizado en suelo y órganos vegetales por calcinación, espectrofotometría, análisis con espectrofotometría de absorción atómica, espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente y finalmente con microscopia electrónica de barrido, análisis difractométrico elemental y espectroscopia Raman. En general, no se detectó ningún efecto estadísticamente significativo tras la aplicación de silicio. De todos modos, se ha podido observar una relación entre las concentraciones tanto de silicio como de silicofitolitos con el fósforo y los metales pesados, redundando en beneficios para el sistema suelo-cultivo. Respecto a los mismos puede decirse que el silicio podría estar promoviendo la rizofiltración tanto de cadmio como de cobre. El fósforo se comportó de manera inversa respecto al resto de los elementos tanto en planta como en suelos. El cobre no supero los límites permitidos dentro de la semilla, mientras que el cadmio sí lo hizo. Finalmente, quiero destacar que los análisis microscópicos sustentaron los resultados químicos obtenidos. Dichos datos básicos aquí encontrados permitirán poner a prueba

nuevas hipótesis bajo condiciones de campo tendientes a definir la utilidad de la aplicación de silicio para establecer nuevas estrategias de manejo sustentable.

Palabras clave: Nutrientes; Metales Pesados; Fitorremediación; Silicofitolitos; Conservación de suelos; Calidad del cultivo; Trigo; Sudeste Bonaerense.

Abstract

Silicon is recognized as a beneficial element for plant growth and plays a growing and significant role in agricultural sustainability and environmental preservation. The Pampean Plain region is highly fertile with intensive agricultural activities, which promoted an impact on their agroecosystems. This work deals with and generates for the first-time basic data, under field conditions, arising from the evaluation of the dynamics of added silicon and amorphous silica biomineralizations in the soil-crop system (*Triticum aestivum L.*) of the Partido de General Pueyrredón: their effects on chemical and mineral-chemical properties. The content of silicon, phosphorus, heavy metals and silicophytoliths was analyzed in soil and plant organs by calcination, spectrophotometry, analysis with atomic absorption spectrophotometry, inductively coupled plasma optical emission spectroscopy and finally with scanning electron microscopy, elemental analysis, and Raman spectroscopy. In general, no statistically significant effect was detected after silicon application. In any case, a relationship between the contents of silicon and silicophytoliths with phosphorus and heavy metals has been observed, resulting in benefits for the soil-crop system. It can be said that silicon could be promoting the rhizofiltration of both cadmium and copper. Phosphorus behaved inversely with respect to the rest of the crops, both in plants and in soils. Copper did not exceed the limits allowed in the seed, while cadmium did. Finally, microscopic analyses supported the chemical results obtained. The basic data obtained here will allow testing new hypotheses under field conditions to define the usefulness of silicon application to establish new sustainable management strategies.

Key words: Nutrients; Heavy metals; Phytoremediation; Silicophytoliths; Soil conservation; Crop quality; Wheat; Southeastern Buenos Aires.

Capítulo 1. Introducción general

1.1. El silicio en agroecosistemas

El silicio (Si) es el segundo elemento en orden de abundancia en la litosfera, surgidos principalmente de los silicatos derivados de rocas endógenas y exógenas, así como de las biomineralizaciones de sílice amorfa. Recién en las últimas décadas ha sido considerado un nutriente esencial que juega un rol importante y vital tanto en ambientes marinos como continentales. Dentro de los más de 80 elementos que se hallan en el suelo y/o sedimentos de distintos ambientes el Si es reconocido como un elemento benéfico para el crecimiento de las plantas superiores, cumpliendo un rol creciente e importante en la sustentabilidad agrícola, y en la preservación ambiental. En las últimas dos década, gracias a los avances en la investigación básica y aplicada, ha sido reconocida su importancia por científicos y agricultores en todo el mundo (Datnoff et al., 2001; Ma y Takahashi, 2002; Gerard et al., 2008; Struyf y Conley. 2009, 2012; Guntzer et al., 2012; Heckman 2013; Haynes, 2014; Tubaña y Heckman, 2015; Agostinho, et al., 2017; Walsh et al., 2018; Manivannan et al., 2023). Se ha probado que el Si tiene efectos positivos sobre las plantas al estimular la fotosíntesis, promover el crecimiento, reducir los efectos negativos del estrés biótico y abiótico, como por ejemplo: disminuir la vulnerabilidad a daños provocados por patógenos mediante la estimulación de defensas (tanto a través de procesos químicos como físicos); mejorar la disponibilidad y eficiencia en la captura de nutrientes; aumentar la resistencia al estrés salino e hídrico; promover la simbiosis con organismos benéficos; y disminuir la toxicidad por metales pesados (MP) a través de la inmovilización de éstos; como así también reducir la emisión de ciertos gases de efecto invernadero, entre otros (Deren et al., 2001; De Melo et al., 2010; Feng et al., 2010; Rajendiran et al., 2012; Rizwan, 2012; Greger y Lamberg, 2015; Phonde et al., 2017; Villegas et al., 2017; Delavar et al., 2017; Liu et al., 2022). Acerca de los MP se puede

decir que existen varias categorías, según las funciones fisiológicas de los mismos, distinguiéndolos en elementos del grupo de micronutrientes y de los tóxicos, ya que sus efectos sobre los organismos dependen de las concentraciones. Los microelementos, son aquellos nutritivos que, siendo esenciales, son utilizados por las plantas en cantidades relativamente bajas o muy bajas y su rango de normalidad es muy estrecho, por lo que hay que vigilar su aporte, tanto por defecto como por exceso, dado que pueden pasar de la carencia a la fitotoxicidad con enorme facilidad. Entre ellos puede mencionarse a: hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn), entre otros. Por elemento tóxico, se entiende cualquier sustancia que produce efectos nocivos cuando penetra en el organismo, pudiendo ser los mismo leves o graves, dependiendo de la dosis incorporada y entre ellos se encuentran el plomo, cadmio (Cd), aluminio (Al) y arsénico (Greger, et al., 2011, 2016; Tripathi et al., 2015; Rizwan et al., 2016; Sandeep y Meera, 2017; Keeping et al., 2017; Vaculik et al., 2020).

Todos los mencionados atributos del Si son relevantes en el cultivo de plantas importantes para la provisión de alimentos tales como el arroz, maíz, sorgo, trigo, caña de azúcar, cebada y hortalizas. (Ma y Yamaji, 2006, 2015; Liang et al., 2007; Meunier et al., 2008; Struyf y Conley, 2009; Vandevenne et al., 2015; Izaguirre Mayoral et al., 2017; Sandeep y Meera, 2017; Villegas et al., 2017; White et al., 2017; Vaculik et al., 2020; Hernández-Apaolaza, 2022). Al mismo tiempo, hay reportes sobre la aplicación de formas activas de Si (soluble y extraíble), que generan la posibilidad de gestionar la movilidad de los MP y aliviar su fitotoxicidad, al intervenir en la absorción y acumulación de Al, Cu, Cd, arsénico (As) y otros MP en especies de interés económico (Matichenkov y Bocharnikova, 2001; Liang et al., 2007, 2016; Greger et al., 2011; Keller et al., 2014; Adress et al., 2015; Farooq y Dietz, 2015; Rizwan et al., 2015; Thripathi et al., 2015). Estos procesos tienen influencia directa sobre todos los consumidores de dichos

alimentos, siendo ellos los integrantes de la cadena trófica que incluye al hombre, su calidad de vida y su salud (Vandevenne et al., 2011). Los mecanismos clave evocados incluyen dentro de los vegetales: la translocación de raíz a brote; la quelación y estimulación de sistemas antioxidantes; la complejación y coprecipitación de metales tóxicos con Si; la compartimentación y alteraciones estructurales en los distintos órganos; y la regulación de la expresión de genes de transporte de MP; entre otros. Sin embargo, es importante destacar que dichos mecanismos varían con la especie, el genotipo, los metales, las condiciones de crecimiento, la duración del estrés, las condiciones ambientales, etc. (Adrees et al., 2015; Rizwan et al., 2015; Thripathi et al., 2015; Greger et al., 2016).

Seis de las plantas más cultivadas en el mundo, entre ellas el trigo, son acumuladoras de Si, por lo que el uso del suelo es uno de los factores más importante en el control de su movilización, haciendo de los cultivos los grandes controladores de los flujos de Si en los ecosistemas terrestres. Se ha reportado que los mismos remueven, en promedio, 210 a más 500 millones de toneladas (tn) de Si por año alrededor del mundo (Datnoff et al., 2001; Matichenkov y Bocharnikova, 2001; Haynes, 2014; Guntzer et al., 2012; Struyf y Conley, 2009, 2012; Vandevenne et al., 2015; Meunier et al., 2017; Vaculik et al., 2020). Dada la importancia de los manejos en el control de este elemento, como así también, los efectos benéficos sobre suelos y cultivos, es que está tomando importancia la fertilización silicatada en distintos cultivos de numerosos países (Datnoff et al., 2001; Ma y Takahashi, 2002; Pereira et al., 2007; Agostinho et al., 2017; Walsh et al., 2018; Frayssinet et al., 2019, 2021).

1.2. Biomineralizaciones de silicio y sus funciones

El Si está ampliamente involucrado en los procesos de biomineralización, que son procesos que están genéticamente controlados, y definen los depósitos de sólidos

inorgánicos amorfos o cristalinos como consecuencia de la actividad metabólica de los organismos. Más del cincuenta por ciento de los seres vivos del planeta biomineralizan, por lo cual este proceso vital actúa como fuente y sumidero global de iones, en todos los ambientes y a lo largo de la historia geológica del planeta (Lowenstan, 1981; Jahren, 1996; Osterrieth, 2004).

Las plantas constituyen uno de los principales grupos productores de biomineralizaciones, denominados fitolitos, los que incluyen los compuestos de sílice amorfa hidratada que se depositan tanto inter como extracelularmente y pueden abarcar la totalidad de la célula o bien parte de ella, denominados silicofitolitos (SiF) y los cristales de oxalato y carbonatos de calcio (Ca), llamados calcifitolitos (Jahren, 1996; Gomes Coe et al., 2014). Dicho proceso con los SiF es un fenómeno irreversible dentro de las plantas, dado que se depositan dentro de las misas como consecuencia de su actividad metabólica pero sin haberse encontrado aún, evidencia de algún proceso de disolución de los mismos (Lowenstan, 1981; Piperno, 2006; Osterrieth, 2004), aumentando consecuentemente su contenido a medida que se avanza en el ciclo del desarrollo vegetal (Bartoli y Souchier, 1978; Hodson y Sangster, 1988; Motomura et al., 2002; de Melo et al., 2010; Carey y Fulweiler, 2012; Rajendiran et al., 2012; He et al., 2013). La mayoría de las comunidades vegetales existentes son productoras de SiF, siendo las monocotiledóneas las mayores y en particular las gramíneas, teniendo la capacidad de retener dentro de su matriz diferentes iones, entre ellos: Si, C y O, macro y microelementos presentes al momento de su formación (Neumann y Zur Nieden, 2001; Parr and Sullivan, 2011; Kamenik et al., 2013). Se han caracterizado y cuantificado los SiF presentes en especies vegetales nativas (Labouriau, 1983; Piperno, 2006; Ma y Yamaji, 2006; Fernández Honaine et al., 2005, 2017) y cultivadas (arroz, soja, trigo y maíz) asociadas a suelos con distintos tipos de manejo (Quero, 2008; Meunier et al., 2008,

2017; Benvenuto y Osterrieth., 2016; Vandevenne et al., 2012, 2015; Song et al., 2014; Benvenuto, 2017; Delavar et al., 2020; Liu et al., 2022). Los SiF se incorporan al suelo como consecuencia de la degradación de las plantas que los contienen, representando entre el 6 y el 65 % de la mineralogía de la fracción limo y arenas muy finas. Cabe resaltar que lo hacen parcial o totalmente con una tasa de disolución tres veces mayor que la de los minerales silíceos no biogénicos, posibilitando la liberación de Si a la solución del mismo (Alexandre et al., 1997; Osterrieth, 2004, 2006; Borrelli et al., 2008, 2010; Osterrieth et al., 2009, 2014, 2015). Una vez en solución puede: pasar a los sistemas ácuos (ríos, arroyos, mares y aguas subterráneas); ser reabsorbido por otras plantas y microorganismos; pasar a formar parte de geles de sílice amorfo y/o compuestos organominerales; o bien polimerizarse para formar cadenas de alto peso molecular (Basile-Doelsch, 2006; Meunier et al., 2008; Rizwan, 2012; Tubaña et al., 2016) (Fig.1.1).

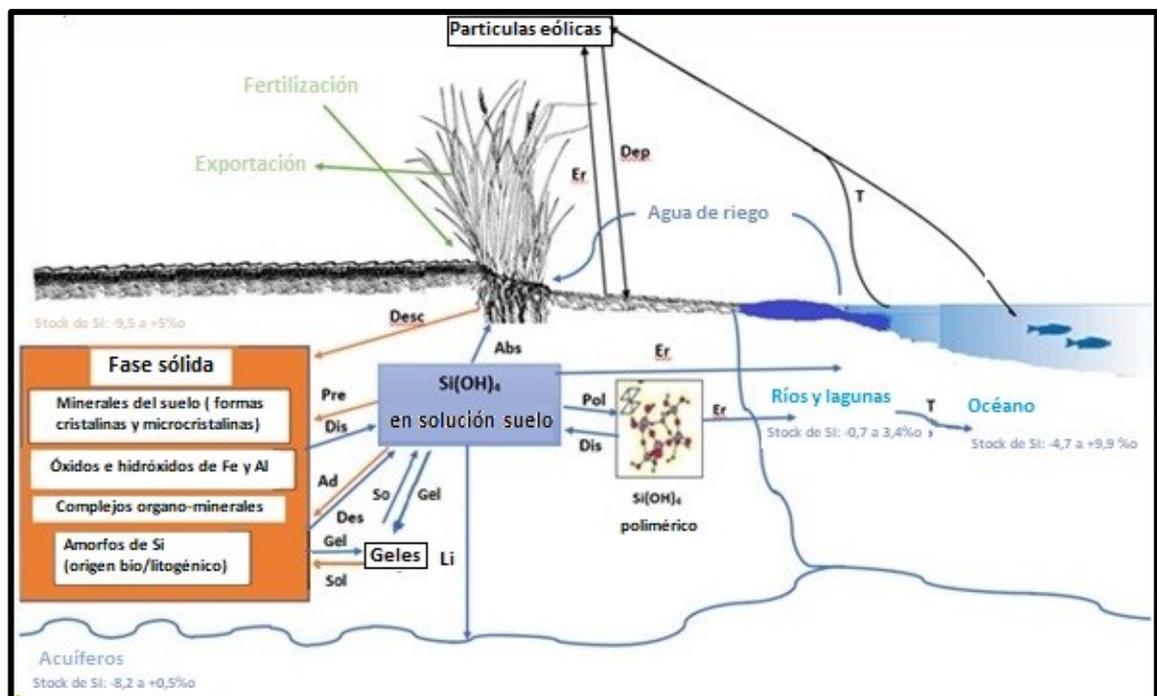


Figura 1.1: Esquema general del ciclo biogeoquímico del silicio. T: transporte. Pre: precipitación. Dis: disolución. Ad: adsorción. Des: desorción. Er: erosión. Dep: depositación. Abs: absorción. Pol: polimerización. Sol: solidificación. Gel: gelificación. So: solubilización. [modificado de Basile-Doelsch, 2006, Meunier y colaboradores, 2008 y Tubaña y colaboradores, 2016)].

Estos procesos son relevantes en la formación de las matrices de los agregados del suelo, condicionando propiedades fisicoquímicas como la estabilidad estructural, la capacidad de retención del agua, la capacidad de intercambio catiónico, los procesos de transferencia asociados a macro, micronutrientes y MP, entre otros (Matichenvok et al., 1995; Martínez y Osterrieth, 1999; Hernández, 2002; Currie y Perry, 2007; Ma y Yamaji, 2006, 2015; Heckman, 2013; Osterrieth et al., 2014, 2015; Vandevenne et al., 2015; Alvarez et al., 2018; Borrelli et al., 2023; Liu et al., 2019, 2023).

1.3. Importancia, abordaje en la actualidad, antecedentes locales y fundamentos

El abordaje del Si y sus efectos sobre aspectos químicos y mineraloquímicos en el sistema suelo-cultivo es muy escaso comparado con los estudios de otros nutrientes, ubicándose este tema en un área de déficit para la ciencia en general y, particularmente, en la Argentina (Guntzer et al., 2012; Osterrieth et al., 2015; Chirkes et al., 2016; Erpelding, 2018). En el país, son casi inexistentes los estudios basados en experimentaciones a campo que relacionen el contenido de Si con nutrientes y MP (Benvenuto, 2017; Frayssinet et al., 2019, 2023). Benevenuto (2017) caracterizó, cuantificó y comparó los SiF presentes en especies vegetales de pastizales, cultivos de trigo, soja y maíz, como así también los suelos asociados del sudeste bonaerense con diferentes prácticas de manejo. Por su parte, Frayssinet y colaboradores (2019 y 2023) caracterizaron los efectos del silicio agregado como fertilizante líquido y sólido en suelos cultivados con trigo respecto al contenido de fosfatos y MP, tanto en la parte aérea de la planta como en los primeros 15cm del epipedón mólico. Respecto a los trabajos realizados en condiciones controladas, cabe destacar que últimamente se han realizado algunos aportes referidos a la adición de Si y su posible efecto estimulante sobre la disponibilidad de fósforo (P), realizados en macetas sobre Ryegrass, comparando su interacción en

suelos con y sin planta (Chirkos et al., 2016; Erpelding, 2018; Conti, 2017). Puede verse entonces que no existe todavía ningún estudio a campo que adicione Si de la forma más pura posible, encontrándose fácilmente disponible, donde a su vez el cultivo se desarrolle sin aplicación de agroquímico alguno (fertilizantes nitrogenados y fosfatados, herbicidas, fungicidas, etc.). Trabajos de este tipo podrían simplificar el abordaje de la interacción entre los elementos (Si, nutrientes y MP), como así también en la fase sólida y líquida del suelo a distintas profundidades, contribuiría sustancialmente a una mayor comprensión de su ciclo biogeoquímico dentro de los agroecosistemas productivos.

1.4. Antecedentes y características generales de la zona de estudio

El Partido de General Pueyrredón, ubicado en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires, presenta suelos con adecuadas aptitudes para el desarrollo de cultivos, por sus cualidades pedológicas y condiciones climáticas adecuadas. Los cambios en la estructura productiva y empresarial de los establecimientos agropecuarios respondiendo a las señales de los mercados en los últimos años han propiciado un crecimiento muy importante de la superficie bajo siembra directa, asociado a una mayor utilización de agroquímicos y fertilizantes. Asimismo, es relevante el desplazamiento y/o intensificación de la actividad ganadera, consecuencia del explosivo crecimiento de superficie destinada a la agricultura con simplificación de rotaciones, desarrollándose principalmente la soja y el doble cultivo de esta oleaginosa sobre trigo, dada la importante demanda mundial que poseen los mismos (Alvarez et al., 2008; Ministerio de Agroindustria de La Nación, 2018). La FAO en el 2020 ha informado que el trigo es un *commodity* que posee la mayor área sembrada mundial, dado que posee 214 millones de hectáreas (ha) y es el segundo cereal con mayor producción mundial, alcanzando los 734 millones de tn anuales (FAO, 2021). Prácticas agrícolas, que han potenciado el nivel de degradación de los suelos de la región pampeana a lo largo de los últimos años, han

afectado negativamente las propiedades químicas, físicas y biológicas (Poblet et al., 1994; Quiroga et al., 1996; Alvarez et al., 2001; Bernardos et al., 2001; Hevia et al., 2003; Sasal et al., 2006.).

Por lo anteriormente expuesto, es que sería interesante profundizar el estudio del Si y los SiF sobre la calidad de uno de los principales cultivos de la zona, como así también en las propiedades químicas y mineraloquímicas de los suelos asociados de agroecosistemas del sudeste bonaerense, que aun habiendo sufrido los procesos de degradación antes mencionados, siguen siendo considerados los suelos más fértiles del país (Ministerio de Agroindustria de La Nación, 2018; INTA, 2020). Entonces, si se logra revertir con la aplicación de Si, aunque sea alguno de los efectos negativos que han sufrido estos suelos, derivaría en un recurso de mejor calidad y si esa reversión es con manejos sustentables, también se fomentaría la conservación para poder mantener dichas ventajas en el largo plazo. Entre ellos, puede mencionarse que habría una mayor disponibilidad de nutrientes para los cultivos (fundamentalmente del P, tan escaso y necesario en la zona de estudio) y un menor contenido de MP en el suelo luego de finalizado su ciclo, tanto por la no aplicación de químicos como por el efecto benéfico del silicio agregado sobre los cultivos. Al mismo tiempo, se podrían reflejar beneficios a largo plazo, como por ejemplo: una mejor estabilidad de los agregados e incrementos en la capacidad de retención hídrica de dichos suelos, entre otros. Estos efectos estarían revirtiendo las consecuencias de los manejos anteriormente mencionados, que han sido aplicados durante años en la zona de estudio, como así también brindando ventajas directas al productor que desea cultivar dicho suelo con prácticas de manejo más sustentables.

1.5. Objetivos e hipótesis

1.5.1. Objetivo general

El objetivo general de esta tesis es evaluar el rol del silicio agregado y de los silicofitolitos en la calidad del cereal de invierno más importante del sudeste bonaerense, como así también, en las propiedades químicas (macronutrientes y metales pesados) y mineraloquímicas de suelos asociados.

1.5.2. Hipótesis

➤ La adición de silicio en los suelos incrementa la concentración de cada uno de los elementos analizados en la biomasa vegetal provocando su disminución en la solución del suelo al finalizar el ciclo.

1.5.3. Objetivos específicos

- Analizar la concentración de silicio, fósforo y metales pesados dentro de las plantas de trigo en los distintos estadios fenológicos, como así también la cuantificación, caracterización morfológica y mineraloquímica de silicofitolitos presentes en los mismos.
- Realizar la caracterización física, química y mineraloquímica de las soluciones del suelo correspondiente a los distintos niveles pedológicos seleccionados (0-5; 10-15 y 15-23 cm de profundidad, dentro del horizonte A llegando hasta el límite superior del horizonte B) de los Argiudoles.
- Analizar en la interacción planta-suelo las posibles relaciones entre las concentraciones de los elementos químicos analizados.

Capítulo 2. Materiales y métodos

2.1. Ubicación y selección del área de estudio

El ensayo se llevó a cabo en la ciudad de Mar del Plata, perteneciente al Partido de General Pueyrredón. Dicha zona se caracteriza por poseer un clima templado, con un régimen hídrico subhúmedo-seco, recibiendo un volumen anual de lluvias que ronda los 700 a 800 mm (Thornthwaite, 1948; Deluchi et al., 1995). En el Partido los suelos predominantes son los Molisoles, dentro de los cuales los Argiudoles típicos incluidos en la serie Mar del Plata son los más abundantes. En el área de estudio se trabajan dichos suelos, los cuales se caracterizan por ser muy oscuros, bien drenados, no alcalinos y no salinos. La textura del suelo varía entre franco a franco-limosa y según su capacidad de uso se clasifican dentro de la categoría Iles, siendo entonces su limitación principal la susceptibilidad a la erosión hídrica (INTA, 2010). Las parcelas se ubicaron en la manzana “Segura” perteneciente a la Universidad Nacional de Mar del Plata, localizada en Matheu entre San Juan y Deán Funes (38°00’31.1” S; 57°34’33.6” O) (Fig.2.1). Dicha parcela oportunamente fue parte del parque de una residencia-quinta familiar y se estima, según historia conocida, que nunca fue cultivado ni afectado por práctica agrícola-ganadera desde el siglo XX hasta la actualidad.

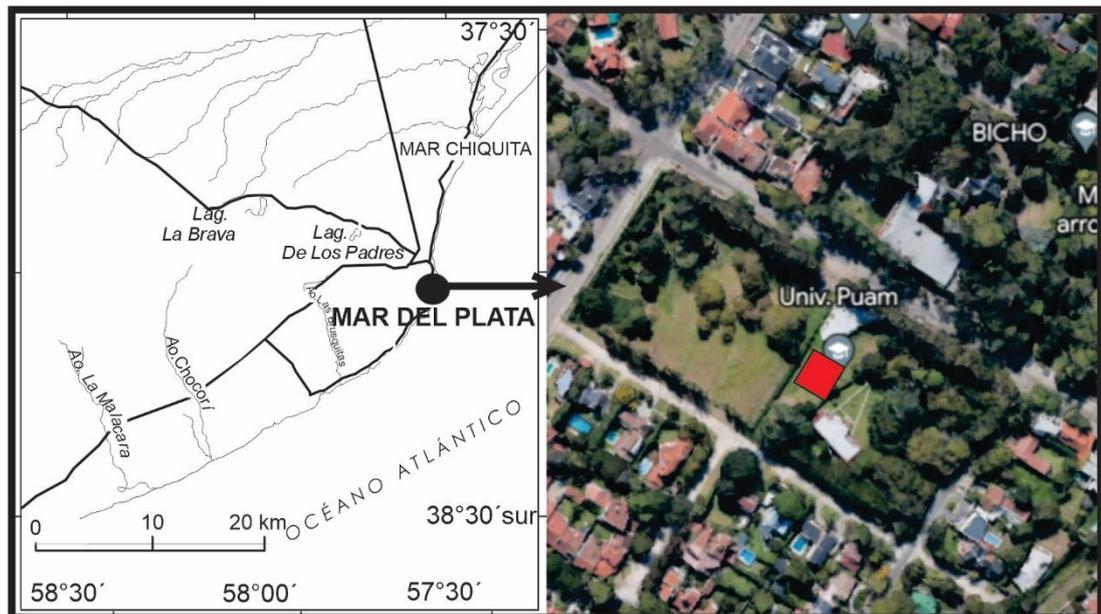


Figura 2.1: Mapa de ubicación. Se observa la ubicación del área de estudio, como así también, la localización del ensayo realizado, identificando dicha superficie con un cuadrado rojo dentro de la imagen que se encuentra a la izquierda.

2.2. Diseño del ensayo y tratamientos a aplicar

Para evaluar las hipótesis planteadas, se colocaron 18 tubos de PVC de 25 cm de diámetro y 23 cm de profundidad ubicándose a 10 cm de distancia uno del otro (Fig. 2.2), sobre los cuales se sembró el trigo pan (cv. Baguette 501 Premium), dejándolo crecer hasta que completó su ciclo.

Sobre los mismos, se realizó un experimento con diseño completamente aleatorizado con un solo factor (aplicación de soluciones) con seis tratamientos: 1) control, 2) aplicación de una única dosis inicial de 200 mililitros al momento de macollaje (estadio 2.1 según Zadoks et al., 1974) de sílice 0,7mM (equivalente a 19,66 mg de Si) a partir de silicato de sodio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), 3) aplicación de una única dosis inicial de 200 mililitros al momento de macollaje de 90 μM Cd (equivalente a 10 mg de Cd) en forma de $\text{CdCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 4) aplicación conjunta al momento de macollaje de Si y Cd (0,7mM y 90 μM , respectivamente), 5) aplicación de una única dosis inicial de 200 mililitros al momento de macollaje de 300 μM Cu (equivalente a 19 mg de Cu) en forma de

$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 6) aplicación conjunta al momento de macollaje de Si y Cu (0,7mM y 300 μM , respectivamente). La cantidad de repeticiones fue de 4 para cada uno de los tratamientos aplicados.

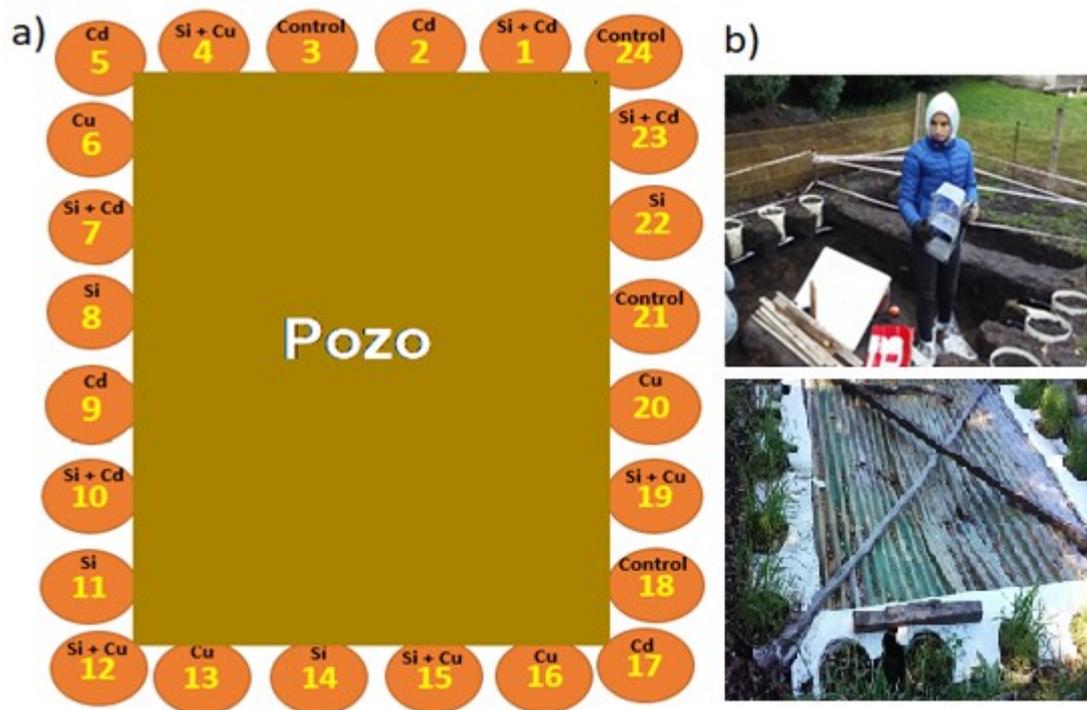


Figura 2.2: Diagrama del ensayo. a) Esquema del ensayo. b) Vista de preparación del ensayo y el mismo ya en marcha.

Acercas de los elementos químicos seleccionados, se pueden ver 3 que han sido combinados para obtener los 5 tratamientos aplicados sobre los tubos. Para comenzar se seleccionó una fuente silicatada considerando que sea un aporte de Si lo más pura posible y que no contenga varios elementos extras, con la finalidad de ver algunos de los efectos benéficos que producen en este caso, sobre el cultivo de trigo, dado que es el cultivo perteneciente a las gramíneas mayormente sembrado en la zona (Ministerio de Agroindustria de La Nación, 2018). Acerca de los MP se puede decir que escoger un micronutriente y otro elemento tóxico nos puede dar idea de su comportamiento en un ciclo normal del cultivo. Para ello se ha escogido el micronutriente: Cu y el elemento tóxico: Cd, ambos con combinaciones que lo aporten al suelo lo más puramente posible,

y que nos permitan observar sus efectos individuales, como así también, su comportamiento al combinarse con adición de Si.

Cabe aclarar que los únicos tratamientos aplicados fueron los 6 debidamente mencionados y que no hubo ninguna aplicación de distintas dosis de fertilizantes utilizados comúnmente en las prácticas agrícolas para cultivos de trigo en el sudeste bonaerense, con la finalidad de poder visualizar más claramente los posibles efectos del silicio y evitar las modificaciones que generarían la aplicación de numerosos componentes que poseen los agroquímicos y pueden estar ejerciendo efectos que favorezcan las variaciones de los resultados obtenidos.

2.2.1. Ensayos

A continuación, se mostrará la cronología de los dos ensayos desarrollados a nivel general, observándose los registros de precipitaciones recibidas y temperaturas registradas. Se detallará en los capítulos 3 y 4 acerca de los conceptos específicos aquí mencionados del sistema planta y suelo, respectivamente. Puede verse, que, en ambos ciclos de cultivo, se realizó la siembra durante el mes de agosto del 2018 y 2019, respectivamente. Luego se procedió con la aplicación de los tratamientos al comienzo del macollaje, se muestrearon las plantas en los 3 estadios fenológicos seleccionados y se extrajeron las soluciones del suelo a través de los rizometros a lo largo del ciclo completo. Por último, se realizó la quita de los tubos, obteniendo el muestreo final de suelos al momento de la cosecha.

2.2.1.1. Primer ciclo de cultivo (2018)

Se sembró el 17 de agosto del 2018 una cantidad de 150 semillas de Baguette 501, por tubo, manteniendo una distancia adecuada entre ellas y localizándose uniformemente, entre 4 a 5 cm de profundidad. El 14 de septiembre se aplicaron los 6 tratamientos

anteriormente mencionados. Este ciclo finalizó el 11 de febrero del 2019, con el muestreo final tanto del sistema vegetal como del edáfico (Fig. 2.3).

A lo largo de este ciclo, se registraron precipitaciones totales acumuladas de 415,8 mm, durante el desarrollo del estadio vegetativo, mientras que a lo largo del estadio reproductivo se precipitaron valores cercanos a 70 mm, incrementado finalmente a 130 mm durante el estadio madurativo. La temperatura media osciló entre los 10 °C y 15°C desde mediados de agosto hasta mediados de noviembre, subiendo hasta los 20.6 °C hacia mediados de diciembre y finalizando con 23°C en mediados de febrero (OGIMET, 2019).

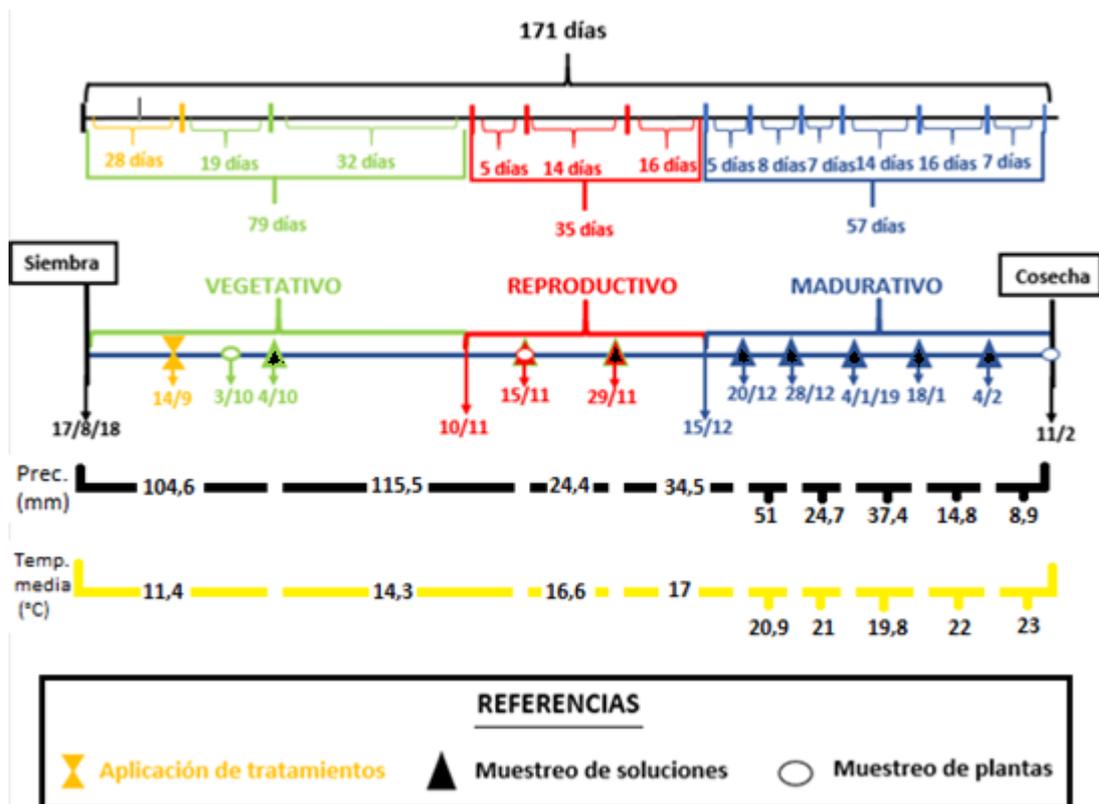


Figura 2.3: Línea del tiempo del primer ciclo. Se muestra el trabajo realizado a lo largo del ciclo 08/2018-02/2019. Los colores verde, rojo y azul refieren a los períodos de cada uno de los estadios determinados para los muestreos a lo largo del desarrollo del cultivo.

2.2.1.2. Segundo ciclo de cultivo (2019)

Se sembró el 27 de agosto de 2019 una cantidad de 80 semillas Baguette 501 por tubo (la reducción del 50% en la densidad de siembra respecto del ciclo de cultivo 2018,

se fundó en la falta de semillas propias del cultivo al finalizar el mismo), manteniendo una distancia adecuada entre ellas y localizándose uniformemente, entre 4 a 5 cm de profundidad dentro de cada uno de los nuevos tubos colocados. El 26 de septiembre se aplicaron los 6 tratamientos anteriormente mencionados. El ensayo finalizó con el muestreo del 30 de enero del 2020, recolectando las plantas como así también quitando los rizometros y los suelos contenidos en los tubos de PVC. Como se explicó en el ítem anterior se adjunta el esquema de trabajo para el ciclo 2019 (Fig. 2.4).

Durante el tiempo en que se realizó este ensayo, las precipitaciones totales acumuladas fueron de 261,5 mm, viéndose una reducción casi del 50% respecto de las lluvias caídas durante el primer ciclo. En este caso, también se registró el máximo dentro del estadio vegetativo con unos 100 mm aproximadamente, mientras que en los estadios siguientes se registraron valores cercanos a 80 mm dentro de cada uno de ellos. La temperatura media fue de los 10,5°C en fines de agosto llegando 18°C para fines de noviembre y subiendo hasta los 21,5°C en el mes completo de enero (OGIMET, 2020), percibiéndose valores de temperatura media bastante similares entre ambos ciclos

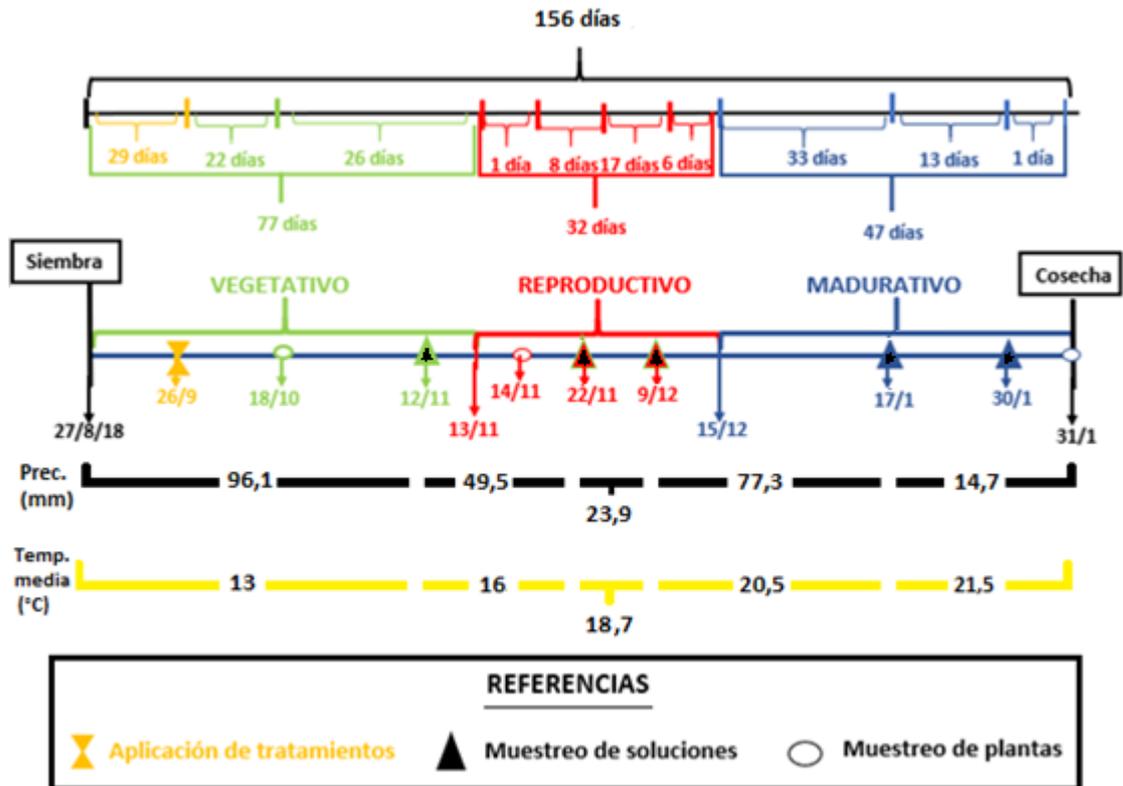


Figura 2.4: Línea del tiempo del segundo ciclo. Se muestra el trabajo realizado a lo largo del ciclo 08/2019-02/2020. Los colores verde, rojo y azul refieren a los periodos de cada uno de los estadios determinados para los muestreos a lo largo del desarrollo del cultivo.

Los análisis realizados del material vegetal como así también de los suelos, serán explicados en los capítulos correspondientes a cada sistema, siendo los mismos el 3 y 4, respectivamente.

2.3. Análisis estadísticos

Se utilizó el programa Infostat (Di Rienzo et al., 2016) para aplicar tests de ANAVA seguida por Test de Tukey con la finalidad de visualizar efectos estadísticos entre los tratamientos impuestos en los suelos y el cultivo estudiado. Los ANAVA de las dos metodologías de extracción de las soluciones de suelo se han corrido de manera independiente uno del otro. Finalmente, se realizaron regresiones lineales entre la concentración de los elementos químicos evaluados y obtenidos dentro de las plantas y los suelos analizados.

2.4. Contribuciones metodológicas

Este tipo de ensayo a campo, realizado en tubos de PVC, es inédito en nuestro país para el cultivo de trigo, y si bien se trató de considerar antecedentes en condiciones similares, lamentablemente no se ha encontrado alguno para la planificación más adecuada del mismo. Por lo explicado, es que el primer ciclo fue esencial para corregir errores y mejorar dichos aspectos dentro del segundo. Otra cuestión que no posee referencias bibliográficas al respecto es la evaluación de la utilización de los rizómetros dentro del campo para la extracción de las soluciones del suelo a lo largo del desarrollo completo del cultivo en ambos ciclos. Dicha aplicación se explicará en el capítulo 4, pero cabe mencionar brevemente que se ha realizado con la finalidad de evaluar la disponibilidad química de los distintos elementos para ser captados por las raíces a lo largo del desarrollo del cultivo, como así también para compararlas con las metodologías de extracción comúnmente utilizadas a nivel mundial.

Capítulo 3. Efectos sobre las plantas de trigo de los distintos tratamientos: relaciones entre la concentración de silicio, fósforo y metales pesados, y sus posibles asociaciones con los silicofitolitos

3.1. Introducción

Considerando que el trigo es el segundo cultivo de importancia en el sudeste de la provincia de Buenos Aires y que se consume en el mercado local, así como también se exporta a nivel mundial (Ministerio de Agroindustria de La Nación, 2018), es que se decidió sembrar para el desarrollo de esta tesis el trigo pan (*Triticum aestivum L.*). Está presente en la región desde principios del siglo pasado, cuando fue introducido por el arribo de inmigrantes con profunda vocación triguera. Se generan nuevos cultivares tanto de trigo pan como de trigo candeal, adaptados a la región considerada (Sur, 2017). El trigo pan es el principal cultivo de invierno cultivado en Argentina y dentro del partido de Gral. Pueyrredón el promedio de hectáreas sembradas desde el 1970 hasta la actualidad es de 21.555 ha con rendimientos de 3.146 kilogramos/ha (kg/ha) aproximadamente. Particularmente para los años 2018 y 2019 las superficies sembradas fueron 14.135 ha y 11.000 ha y con rendimientos de 5.000 kg/ha y 4.200 kg/ha, respectivamente (Ministerio de Agroindustria de La Nación, 2018) y se encuentra como una de las principales en Argentina en lo que respecta a rendimientos del cultivo (Sur, 2017; Cultivos invernales, 2017). Dentro de la gran variedad de semillas de trigo pan que existe en la actualidad, se sembró la Baguette 501 correspondiente a Nidera. Esta semilla es de ciclo corto, con excelente desarrollo y sumamente usada cuando se decide hacer doble ciclo de cultivo (invierno y verano) para aprovechar la capacidad productiva de los suelos de la región durante todo el año. Una importante fracción de los nutrientes presente en los suelos es la

comúnmente utilizados por este cultivo (N, P, K, S, Si, etc.), siendo entonces adsorbida por las plantas a lo largo de su desarrollo, mientras que otra fracción puede ser arrastrada por el agua o bien acumularse en el suelo y los sedimentos, transfiriendo cantidades elevadas de los mismos en ríos y lagos (Alvarez et al., 2001; Heredia y Cirelli, 2008; Severiche et al., 2013; Berardo et al., 2019).

3.1.1. El silicio y su rol en la planta

Mientras que el papel del Si en las reacciones inorgánicas se conoce desde hace mucho tiempo, sólo en los dos últimos decenios se ha reconocido la importancia del ciclo biogénico del silicio en el ámbito terrestre (Struyf y Conley, 2009, 2012; Basile-Doesch, 2006; Delplace et al., 2020). El Si es conocido por ser capaz de aliviar el estrés de los metales en las plantas de muchas maneras (Adrees et al., 2015; Rizwan et al., 2016; Bhat et al., 2019). Este elemento puede inmovilizar los MP en el entorno de crecimiento (por precipitación o quelación) (Neumann y Zur Nieden 2001; Liang et al., 2005, 2007); aumentar el sistema de defensa antioxidante de la planta (Farooq y Dietz., 2015; Naem et al., 2018; Huang et al., 2019); modificar los genes expresados (Li et al., 2008; Vaculik et al., 2020) o alterar la estructura de la planta, como la longitud de las raíces (Keller et al., 2014), entre otros.

La absorción del Si por parte del trigo pan, incluye los mecanismos mencionados en el capítulo 1, es decir: la pasiva o la activa, que se da por transportadores radiculares que facilitan su entrada al organismo tanto para capturarlo del medio, como para transportarlo dentro de la planta (Ma y Yamaji, 2008, 2015). Las plantas suelen poseer entre el 0,1 y el 10% de su peso seco en Si y se las puede clasificar según la cantidad de Si que acumule, como acumuladora ($> 1\%$), acumuladoras medias (0,5-1%) o no acumuladoras ($<0,5\%$) (Ma y Takahashi, 2002). Dentro de las primeras tenemos a las familias Gramíneas y Ciperáceas, dentro del segundo grupo las Cucurbitales, Urticales y

Commelináceas, y las demás especies se clasifican como plantas con baja acumulación de silicio (Mitani y Feng, 2005; Ma y Yamaji, 2006). Los patrones de acumulación varían con la especie, pero en líneas generales puede decirse que se depositan principalmente en la epidermis de diversos tejidos, por debajo de las cutículas, en los estomas (Deren et al., 2001), en las paredes celulares (Teodoro et al., 2015), entre otros, otorgándole diversas ventajas funcionales. Respecto de la relación del Si con el macronutriente P existen muy pocos antecedentes. Estudios recientes han abordado el contenido de ambos elementos dentro de las plantas, asociándolos positivamente y con un mayor desarrollo de la biomasa vegetal (Navarro y Navarro, 2000; Hu et al., 2018).

Recientemente se ha planteado la inmovilización de metales en formas no tóxicas en el interior de las raíces o las hojas, como un mecanismo de la planta para disminuir la toxicidad de éstos. Esta inmovilización tiene lugar mediante una precipitación o unión del metal mediada por el Si a las paredes celulares de la planta (Neumann y Zur Nieden, 2001; Liang et al., 2007; He et al., 2013). Lux y colaboradores (2020) han visto que el Cd y Zn han mostrado esta relación con el Si presente en las raíces de ciertos cultivos. Además, se ha observado, durante la senescencia de la planta o durante los períodos de carencia, la removilización de los nutrientes almacenados en las hojas y los tallos hacia las semillas, los frutos o incluso las hojas jóvenes (Waters et al., 2009), dado que proporcionan una relación fuente-sumidero que conduce a un uso más eficiente del nutriente absorbido (Fe, Cu, Zn, Mn,) (Li et al., 2008; Khandekar y Leisner 2011; Hernández-Apaolaza, 2014, 2022; Liu et al., 2022).

Al ser las gramíneas las mayores productoras de SiF, cabe destacar que los mismos poseen la capacidad de retener dentro de su matriz, diferentes elementos químicos presentes al momento de su formación (Neumann y Zur Nieden, 2001; Parr y Sullivan, 201; Kamenik et al., 2013). Se han caracterizado y cuantificado los SiF presentes en

especies vegetales nativas (Labouriau, 1983; Piperno, 2006; Ma y Yamaji, 2006; Fernández Honaine et al., 2005, 2017) y cultivadas (arroz, soja, trigo y maíz) (Meunier et al., 2008, 2017; Vandevenne et al., 2015; Benvenuto, 2017; Frayssinet et al., 2019), siendo su relación con MP abordada a lo largo de los últimos años (He et al., 2013; Bhat et al 2019; Liu et al., 2022; Frayssinet et al., 2023). Entre estos últimos los más peligrosos pueden mencionarse al: As, Cd, Cr, y Pb debido a su amplio uso, toxicidad y distribución generalizada en el medio ambiente (Greger et al., 2011, 2016; Greger y Landberg, 2015; Kabata-Pendias, 2011; Rizwan et al., 2016). Otros también presentan efectos tóxicos cuando elevan sus contenidos superando el valor umbral, tanto para el medio ambiente como para la salud del vegetal y la humana, hallándose entre ellos el Cu (Li et al., 2008; Colin, 2011; Frantz et al., 2011; Tran et al., 2019)

Por lo anteriormente explicado, la aplicación de alternativas agronómicas para el manejo de cultivos representa un importante desafío, con la finalidad de obtener niveles de producción sustentables y con efectos benéficos sobre el desarrollo del trigo. Para ello, procederemos a evaluar dentro del presente capítulo la posible contribución de la aplicación del Si para tal fin, con la idea de que la adición de Si en los suelos incrementará el contenido de Si y SiF presente en la biomasa vegetal al final del ciclo del cultivo, así como también la concentración de nutrientes y MP, implicando beneficios para el desarrollo del trigo pan.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Desarrollo de los ciclos del cultivo

Como bien sabemos, resulta extremadamente importante la elección de las variedades aptas en su época de siembra y zona (Sur, 2017), dado que, por ejemplo: la temperatura media influye sobre el desarrollo del cultivo y el llenado de los granos. Datos meteorológicos muestran que las precipitaciones son suficientes para asegurar

rendimientos adecuados en toda la región, aunque el volumen de las mismas disminuye hacia el sudoeste (INTA, 2020). Estos valores moderados de temperatura definen valores de cociente fototermal (relación entre la radiación solar media diaria y la temperatura media) muy favorables para el logro de altos rendimientos (Guanca et al., 2012). Finalmente, en posiciones bajas del relieve el rendimiento alcanzable es alto dado que la zona se caracteriza por tener una muy baja probabilidad de déficit hídrico (menor al 5%) desde la siembra hasta la espigazón del cultivo, como así también por la profundidad de los suelos con buena fertilidad. Únicamente debería tenerse en cuenta que el riesgo de heladas tardías es mayor al de otros ambientes, debiendo demorarse la fecha de espigazón del cultivo para acotar el mismo, pudiendo hacerlo al sembrar cultivares de ciclos cortos durante el mes de agosto (Calvino y Divito, 2017).

Considerando lo dicho, es que se escogió la variedad de semilla producida por Nidera, conocida como Baguette 501, que pertenece al grupo II de calidad, la cual no tiene requerimientos de frío, posee capacidad de macollaje medio, altura de 70 cm, es de ciclo corto y se puede sembrar en esta zona para los meses de Julio y Agosto (Gallego, 2015).

En este trabajo se realizaron dos ensayos, que comprendieron los ciclos completos del cultivo de trigo, es decir desde la siembra hasta la cosecha. El primero se realizó en el 2018/2019 y el segundo en el 2019/2020 y se hará alusión a los mismos como ciclo 2018 y ciclo 2019, dado que es el año en que se han sembrado respectivamente. En ambos se utilizó la semilla de trigo Baguette 501, dentro de tubos de PVC respetando las condiciones naturales de campo. Durante el desarrollo del ensayo se decidió no fertilizar, no regar (secano), ni aplicar biocidas, para mantener, en esta etapa de un estudio básico, el suelo en las condiciones más naturales posibles. Además, se mantuvo limpio al cultivo, sacando a mano las malezas y pastos que crecían en la parcela. Durante el segundo ensayo

se detectaron hormigas negras que consumían las plantas de trigo, eliminándolas con insecticida sólido específico colocado por fuera del cultivo y en la boca del hormiguero que se encontraba 20 metros por fuera del ensayo.

3.2.2. Realización de muestreos

Recolección al azar de muestras de plantas en tres estadios fenológicos, en ambos ciclos:

- Vegetativo: Se ha recolectado un total del 50% de los individuos desarrollados en cada ciclo con la finalidad de lograr la cantidad de material correspondiente para la realización de los análisis requeridos. Dicho estadio es el definido como 4.1 y conocido como estado de bota (Zadoks et al., 1974).
- Reproductivo: Se ha recolectado el 25% de los individuos desarrollados en cada ciclo con la finalidad de lograr la cantidad de material correspondiente para la realización de los análisis requeridos. Dicho estadio corresponde al como 6.1, según Zadoks et al. (1974), conocido como comienzo de antesis.
- Madurativo: Se ha recolectado el 25% de las plantas restantes y que aún permanecían en los tubos en ambos ciclos, correspondiendo al 9.2 según Zadoks et al. (1974), de madurez fisiológica del grano.

Respecto a los órganos colectados luego de un evento de lluvia, puede decirse que en el estadio vegetativo del 2018 solo fue posible analizar hojas y tallos, dado que las raíces no eran fácilmente colectables desde el tubo a pesar del contenido de humedad que poseían luego de la precipitación ocurrida. Lo mismo puede ser explicado por la elevada competencia que había entre todas las plantas desarrolladas, que podría no haber permitido un desarrollo más robusto de las mismas. Por otro lado, al avanzar en el ciclo, dentro del estadio reproductivo si fue posible coleccionar más raíces, dado que había un 50%

menos de plantas dentro de cada tubo y las mismas pudieron desarrollarse durante dicho lapso entre estadios, pudiendo extraerse con mayor facilidad. Al mismo tiempo, cabe mencionar que ya se encontraban las espigas presentes en el estadio reproductivo, las cuales fueron colectadas y finalmente también las mismas completamente desarrolladas en el estadio madurativo. En el cultivo 2018 las plantas se observaron etioladas (estiradas con entrenudos largos y hojas finitas), sin haber desarrollado las semillas. Dicho aborto de las flores podría relacionarse con la alta densidad de siembra en el 1^{er} ciclo (150 semillas por tubo) y la probable disminución en la absorción de macro y micronutrientes que no han permitido lograr su correcto desarrollo. Se arriba a dicha conclusión, dado que, en el ciclo del 2019, se sembró la mitad (80 unidades por tubo) y sí hubo desarrollo de las semillas en todas las plantas de trigo. Cabe mencionar que durante este segundo estadio si fue posible colectar raíces en el estadio vegetativo. asociándose nuevamente dicha posibilidad a la menor competencia entre las plantas desarrolladas dentro de cada tubo. Se debe considerar que la extracción de las raíces fue parcial en todos los estadios recolectados de ambos ciclos, aún en condiciones de saturación, dada la elevada dificultad para extraer el sistema radicular completo, en toda su extensión y más aún al querer hacerlo sin generar perturbaciones considerables dentro del suelo contenido en los tubos, dado que los mismos debían permanecer sosteniendo el desarrollo de las plantas restantes hasta el final del ciclo.

3.2.3. Análisis de laboratorio

3.2.3.1. Altura

Las plantas de ambos ciclos recolectadas en los tres estadios fueron medidas en su longitud (cm) con una cinta métrica.

3.2.3.2. Características químicas

A las plantas recolectadas se las separó en los órganos encontrados dentro de cada estadio, A cada órgano se lo lavó con ultrasonido (Test-Lab, Ultrasonic TB-010) durante 15-20 minutos con agua destilada y fueron luego secados en estufa a 60°C durante 24hs. Posteriormente a dicho material se lo trató según lo indicado por las distintas metodologías que se explicaran a continuación para la determinación de Si, P, Cu, Cd y SiF (Fig. 3.1).

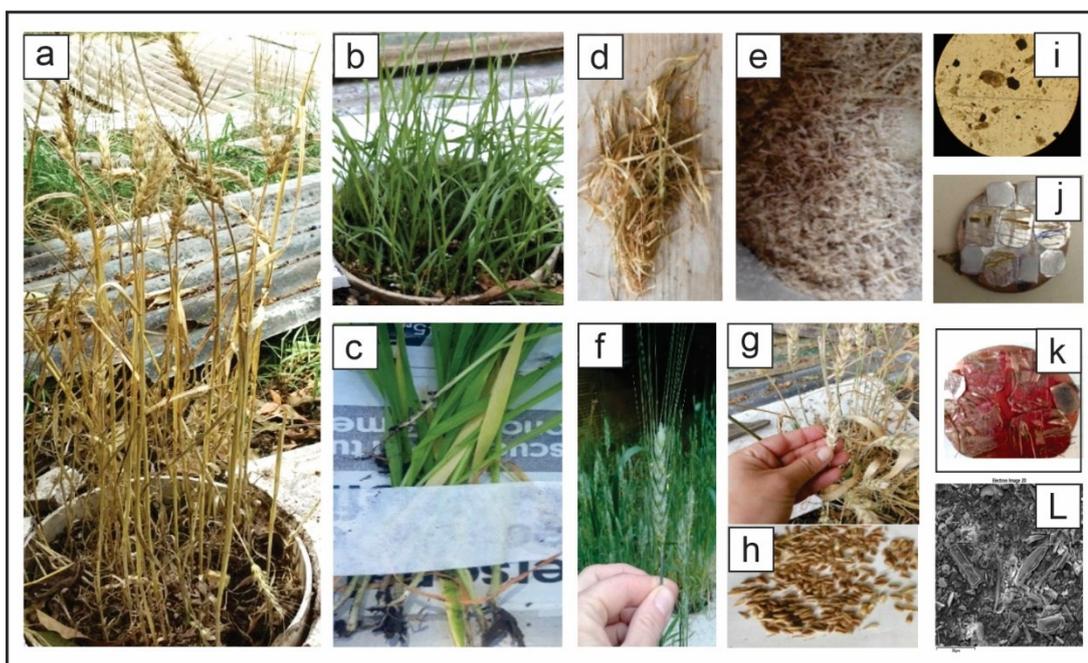


Figura 3.1: Imágenes de las muestras vegetales que serán analizadas. a) Planta en el estadio madurativo b) Planta en el estadio vegetativo c) Hojas del estadio vegetativo cosechadas. d) Tallos de la planta limpios y secos e) Tallos limpios, secos y molidos f) Espiga en el estadio reproductivo. g) Espigas en el estadio madurativo h) Semillas limpias y secas. i) Microfotografía bajo MOP j) Muestras secas montadas k) Muestras bañadas en oro y paladio l) Microfotografía de las cenizas bajo MEB.

3.2.3.2.1. Determinación de silicio total en peso seco

El método consistió en tomar 0,5g (peso inicial) del material vegetal, ya limpio y molido, para someterlo a calcinación a 200 °C durante 2h, después se hirvieron en HCl 5 N para disolver los cristales de Ca y finalmente se calcinaron a 700-800 °C durante 3h (Labouriau, 1983). Las cenizas, compuestas principalmente por silicofitolitos, se pesaron (peso final) y se calculó el contenido de sílice amorfa como peso final/peso inicial

(Fernández Honaine et al., 2005), y finalmente se expresó como miligramos de Si por gramo de planta.

3.2.3.2.2. Determinación del fósforo

Se calcinaron los órganos comenzado a 150°C durante 20 min, luego a 300°C durante otros 20 min y finalmente 1 hora a 400°C. Al día siguiente pasaron a disolución total con ácido fluorhídrico (HF) y posteriormente se analizaron por colorimetría, utilizando para ello al complejo fosfovanadomolibdico (Olsen et al., 1954). Este procedimiento fue realizado en Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM-España).

3.2.3.3.3. Determinación de metales pesados (Cu y Cd)

Se mineralizaron los órganos recolectados, siguiendo la metodología explicada para el P y su disolución con HF pero en este caso, analizándose finalmente con espectrofotometría de absorción (AA) utilizando un AAnalyst 800 Spectrometer (PerkinElmer, Shelton, CT, USA) Este procedimiento fue realizado en la Facultad de Cs.Exactas de la UAM (España).

3.2.3.3. Caracterización cualitativa, cuantitativa y mineraloquímica de los silicofitolitos (SiF)

Una alícuota del material calcinado que se obtuvo para evaluar el contenido de Si en peso seco dentro de la planta, se montó en aceite de inmersión para su descripción. Se contaron de 400 morfotipos, bajo microscopio óptico (MOp) (Zeiss Axiostar Plus) y petrográfico (Olympus BX51), utilizando para su caracterización el “El Código Internacional para la Nomenclatura de Fitolitos” de Madella y colaboradores (2005). Otra porción de las cenizas se montó en discos de Al y recubrieron con oro o paladio, para su análisis al microscopio electrónico de barrido (MEB), FEI (Quantas 200, LIMF-UNLP), además se identificaron los elementos presentes en los SiF (con una media de 50

especímenes observados), mediante espectroscopia de dispersión de rayos X (EDSSDD Drift Detector LIMF-UNLP). De modo exploratorio en virtud de nuevos pero escasos estudios mineraloquímicos en los SiF, se analizaron algunas muestras secas y de cenizas mediante microscopio espectrográfico Raman (RENISHAW inVia), utilizando las escalas de bandas definidas por Socrates, versión 5.11 (2004) en INTEMA-Facultad de Ingeniería- Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP).

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Datos meteorológicos

Considerando los datos de precipitaciones y temperaturas registrados para ambos ciclos de cultivos (Fig. 2.3 y 2.4) y acudiendo a las tablas que indican los rangos de valores óptimos de ambos factores climáticos, puede decirse que los mismos se han desarrollado bajo los parámetros adecuados (Guanca et al., 2012; Calvino y Divito, 2017).

3.3.2. Altura de las plantas

3.3.2.1. Ciclo de cultivo 2018

En el gráfico (Fig. 3.2) no se observan diferencias en los patrones de crecimiento entre tratamientos aplicados dentro de cada estadio medido.

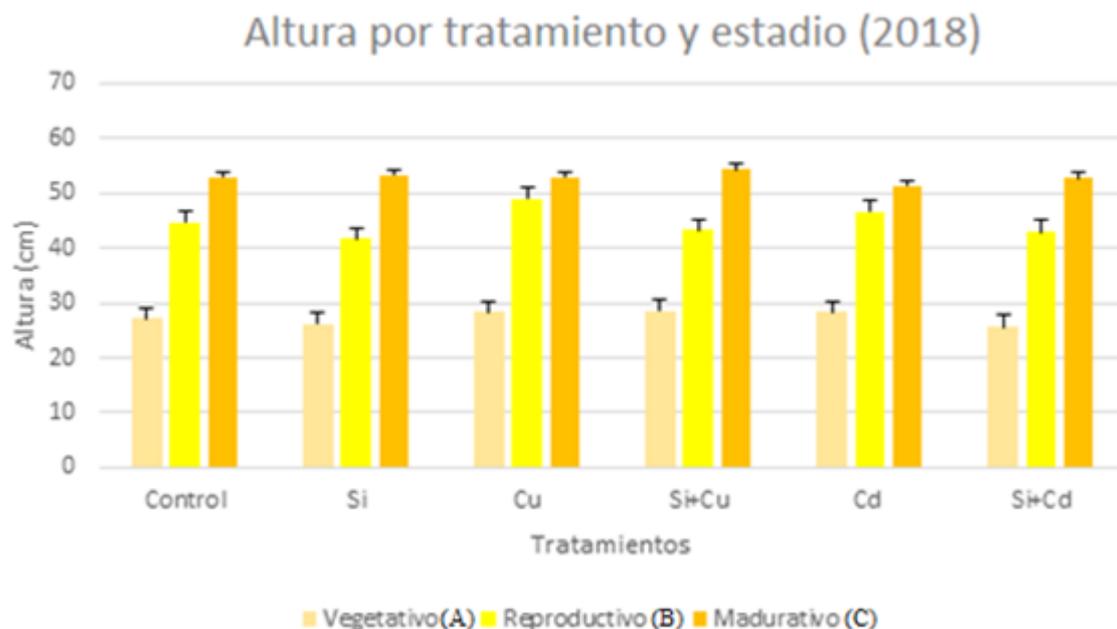


Figura 3.2: Altura promedio por tratamiento y estadio, expresada en centímetros (cm) de las plantas cosechadas durante el ciclo de cultivo del 2018. Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Como es esperable, puede verse que las plantas crecen a medida que se avanza a lo largo de desarrollo fenológico del cultivo, pasando de valores promedio mínimos de 27 cm en estadio vegetativo, a 45 cm en reproductivo y llegando a los máximos del madurativo que oscilan alrededor de los 53 cm Cabe destacar que entre los promedios de los tres estadios medidos se han presentado diferencias significativas (valor $p < 0,0001$).

Para el análisis de los tratamientos dentro del estadio madurativo no se ha visto diferencia significativa alguna (valor $p = 0,9538$), rondando sus valores desde los 51 a los 54 cm (Fig.3.4).

3.3.2.2. Ciclo de cultivo 2019

En este caso se ve que las plantas tampoco presentan diferencias estadísticas comparando entre tratamientos aplicados dentro de cada estadio medido (Fig.3.3).

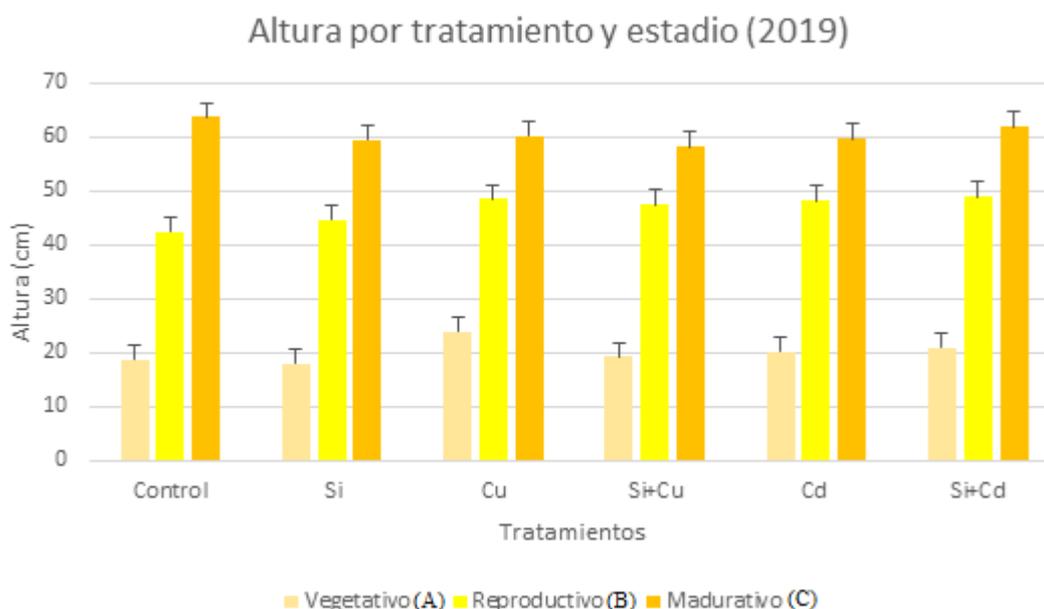


Figura 3.3: Altura promedio por tratamiento y estadio, expresada en centímetros (cm) de las plantas cosechadas durante el ciclo de cultivo del 2019. Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Nuevamente, las plantas crecen a medida que se avanza a lo largo de desarrollo fenológico del cultivo, pasando de valores promedio mínimos de 20 cm en estadio vegetativo a 47 cm en reproductivo y llegando a los máximos del madurativo que oscilan alrededor de los 60 cm, presentando diferencias significativas entre los mismos (valor $p < 0,0001$).

También se vio que los tratamientos dentro del estadio madurativo no han mostrado diferencia significativa alguna (valores $p = 0,7902$) (Fig.3.4).

3.3.2.3. Comparación entre ambos ciclos

Al realizar la comparación de los tratamientos entre los estadios madurativos de ambos ciclos ensayados (Fig. 3.4), resultó que para todos los tratamientos son mayores las alturas alcanzadas en el segundo ciclo ensayado respecto las del primero.

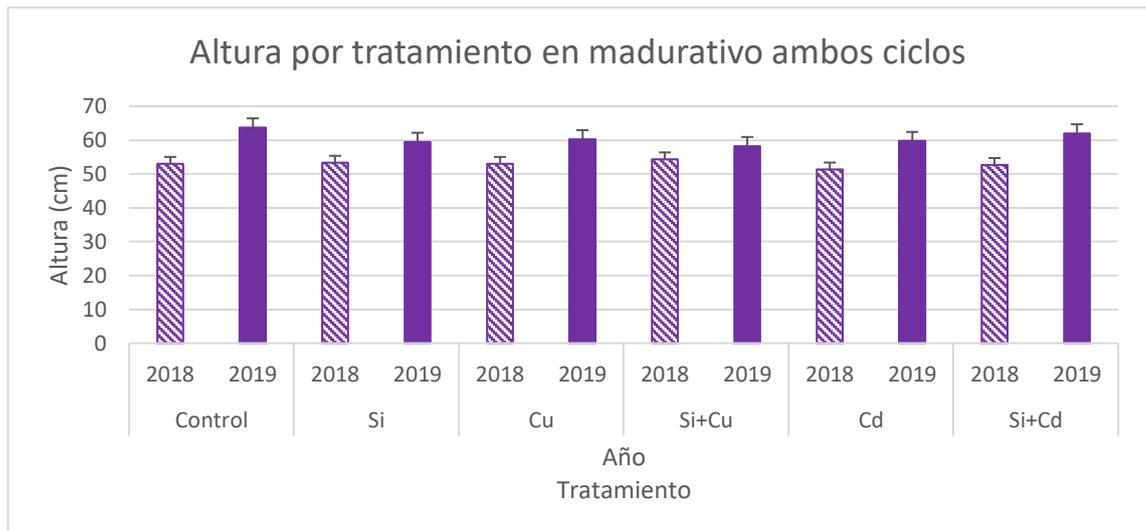


Figura 3.4: Altura promedio (cm) en los distintos órganos dentro del estadio madurativo durante ambos ciclos. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Analizando las diferencias en las alturas registradas por los distintos tratamientos en estadio madurativo entre ambos ciclos, las mismas podrían ser explicadas por el factor de competencia mayor durante el primer ciclo por el que debieron pasar dichas plantas al considerar la diferencia en la densidad de siembra aplicada entre cada ciclo desarrollado y la consecuente falta de espacio para el esperado crecimiento del trigo en 2018, dado que han alcanzado en promedio un valor menor en 10 cm respecto del mejor desarrollado (50 cm vs 60 cm, respectivamente; valor $p = 0,7597$). Finalmente puede decirse que el segundo ciclo se encontró más cerca de los valores reportados para el cultivo Baguette 501 sembrado (Gallego, 2015; Sur, 2017).

3.3.3. Concentración de elementos químicos

Cabe aclarar que los resultados correspondientes a las concentraciones de Si, P, Cu y Cd se presentarán de la siguiente manera. Se mostrará primero un gráfico que detalla para cada tratamiento la cantidad que se ha alojado dentro de los diversos órganos a lo largo del ciclo. Luego se detallará la acumulación promedio por parte de los órganos en

los distintos estadios para ver si existe algún patrón de distribución. Cerrando las descripciones de lo obtenido dentro de cada ciclo, se mostrarán los resultados de la acumulación del Si junto con cada uno del resto de los elementos analizados dentro de los diversos órganos a través de los estadios, lo cual permite poner a prueba si es que existe o no relación alguna entre el Si con el resto de los elementos. Luego se analizará en el estadio madurativo la acumulación promedio en cada uno de los tratamientos como así también su patrón de distribución dentro de los órganos para cada uno de los estadios evaluados. Se detalla dentro del estadio madurativo dado que las plantas ya se han desarrollado completamente y son visibles los efectos de los distintos tratamientos aplicados, siendo importante su evaluación dado que es el momento de cosecha del cultivo y fundamental para poder establecer manejos sustentables que redundarán en beneficios tanto para el productor de trigo como para la conservación del agroecosistema.

3.3.3.1. Concentración de silicio

3.3.3.1.1. Ciclo de cultivo 2018

Los análisis estadísticos no evidencian efecto sobre el contenido de Si detectado en los distintos tratamientos entre los diferentes estadios evaluados (Cuadro 3.1 en el Apéndice). Por otro lado, al observar los resultados correspondientes a las concentraciones de Si (Fig. 3.5), en los distintos órganos y estadios evaluados puede verse que mayormente aumentan su contenido a lo largo del ciclo, siendo superiores en el madurativo respecto de ambos estadios previos, donde las hojas y espigas han presentado más mg de Si por gramo del tejido de planta analizado.

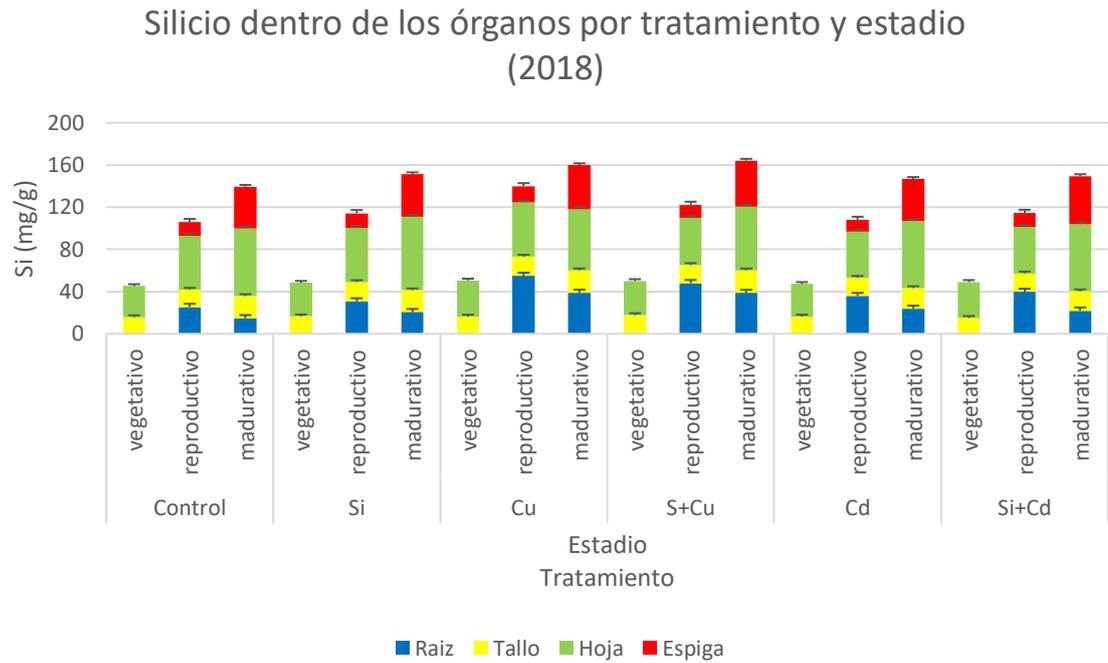


Figura 3.5: Concentración de silicio (mg/g) por tratamiento en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Analizando las concentraciones registradas entre los distintos estadios, se han observado diferencias significativas entre las del estadio vegetativo y el estadio reproductivo respecto del estadio madurativo (valor $p < 0,0001$), siendo de 24 mg/g en el vegetativo, de 30 mg/g en el reproductivo y finalizando el ciclo con un promedio cercano a 40 mg/g (Fig. 3.6)

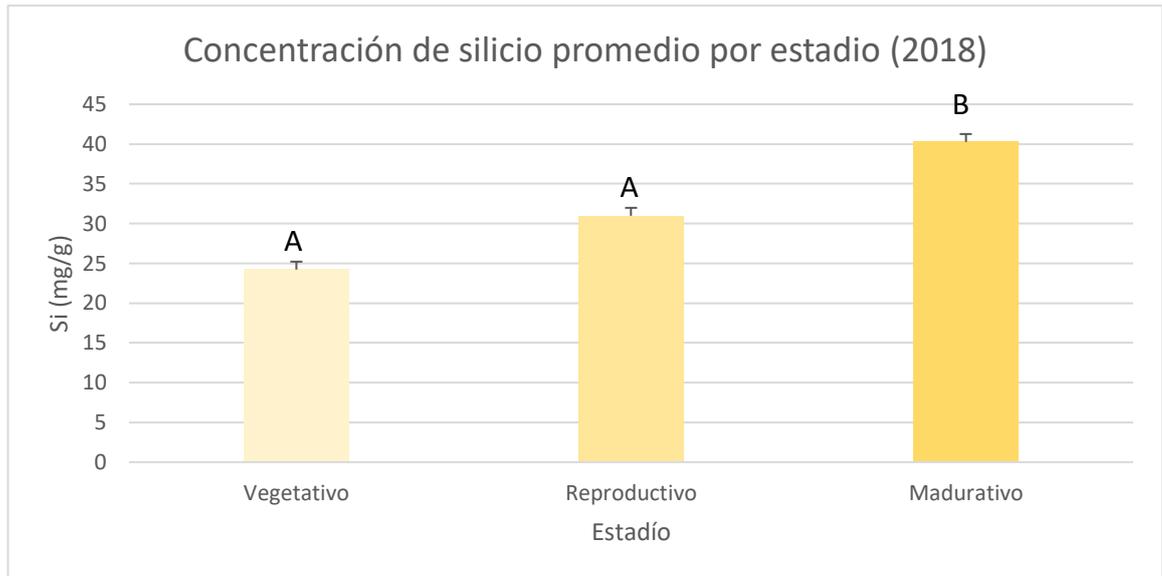


Figura 3.6: Concentración de silicio (mg/g) promedio de todos los tratamientos en cada estadio analizado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018. Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Dicho comportamiento responde a lo demostrado por varios trabajos, que indican que el proceso de silicificación en las plantas es un fenómeno irreversible y, por tanto, especies acumuladoras producen más biomineralizaciones de Si a medida que crecen (Bartoli y Souchier, 1978; Hodson y Sangster, 1988; Motomura et al., 2002; De Melo et al., 2010; Fernández Honaine et al., 2013, 2017; Frayssinet et al., 2019, 2023).

Considerando cada uno de los órganos (Fig. 3.5), puede observarse valores promedio de Si que modifican su patrón al pasar de un estadio al siguiente y dinámicas similares a lo largo del ciclo en todos los tratamientos. Dicha similitud, nos posibilita agrupar y realizar un gráfico con la concentración de este elemento a lo largo del desarrollo de las plantas, considerando los diversos órganos evaluados (Fig. 3.7). En el mencionado gráfico, se ve que las raíces son el único órgano que disminuye desde el estadio reproductivo al estadio madurativo en promedio, sin diferencia significativa (valor $p = 0,0630$), mientras que el resto de los órganos incrementan su contenido en los sucesivos estadios fenológicos presentando diferencias significativas (valores $p < 0,0001$).

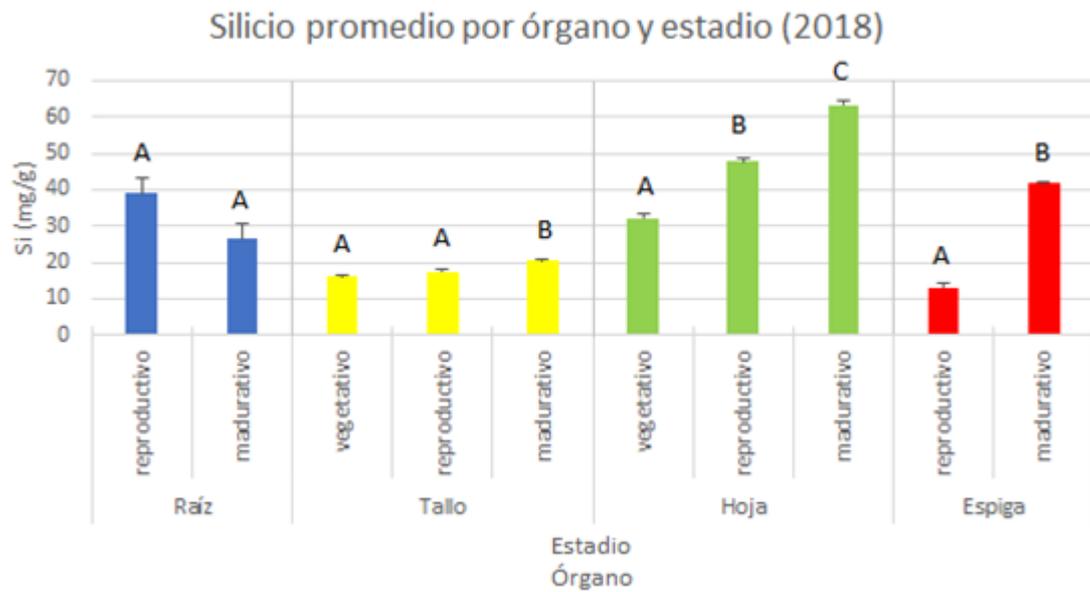


Figura 3.7: Concentración de silicio (mg/g) agrupando todos los tratamientos en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018. Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

3.3.3.1.1.2. Estadio madurativo:

Al ahondar en las concentraciones dentro del estadio madurativo, los tratamientos no han presentado diferencia significativa alguna (valor $p = 0,9995$), mostrando un rango de valores entre 36,5 mg/g hasta los 39 mg/g (Fig. 3.11). Continuando con el análisis del contenido de Si en miligramos por gramo de planta analizada (Fig. 3.7), se ve que los órganos han mostrado diferencias significativas entre ellos (valor $p < 0,0001$) con prevalencia en su contenido por parte de las hojas (63,3 Si mg/g); seguidas por las espigas (41,7 Si mg/g), luego por las raíces (26,3 Si mg/g) y finalmente los tallos (20,4 Si mg/g).

3.3.3.1.2. Ciclo de cultivo 2019

Los análisis estadísticos no evidencian efecto sobre el contenido de Si detectado en los distintos tratamientos entre los diferentes estadios evaluados (Tabla 3.2 en el Apéndice). Al observar los resultados correspondientes a Si (Fig. 3.8), en los distintos órganos y estadios evaluados puede verse que mayormente aumentan su contenido a lo largo del ciclo, siendo superiores en el madurativo respecto de ambos estadios previos.

La excepción a esta tendencia se observa en las plantas que recibieron Cu, donde el contenido de Si en las raíces del estadio vegetativo es considerablemente superior al resto de las raíces y haciéndolo con valores elevados que posicionan a este estadio por encima del reproductivo y madurativo en sus contenidos totales.

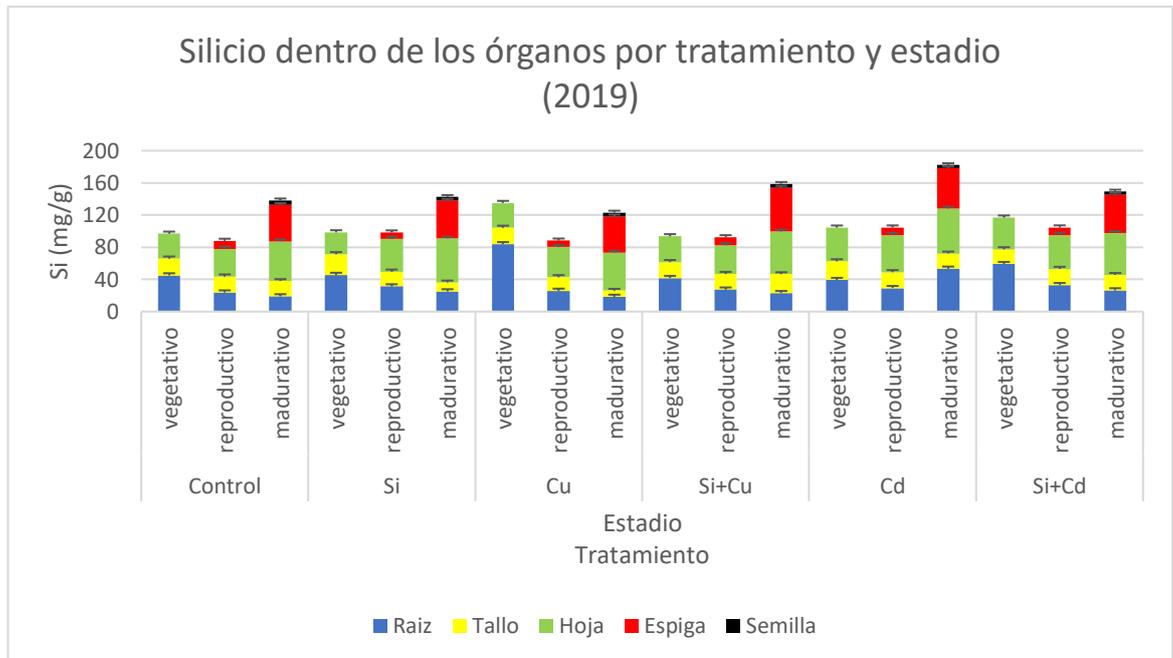


Figura 3.8: Concentración de silicio (mg/g) por tratamiento en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2019. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Consecuentemente, al evaluar la concentración promedio de Si por estadios, se visualiza que dentro del vegetativo se han registrado 35 mg/g, en el reproductivo aproximadamente 24 mg/g y finalmente valores cercanos a 30 mg/g en el final del ciclo, con diferencias significativas entre los mismos (valor $p = 0,0008$) (Fig. 3.9).

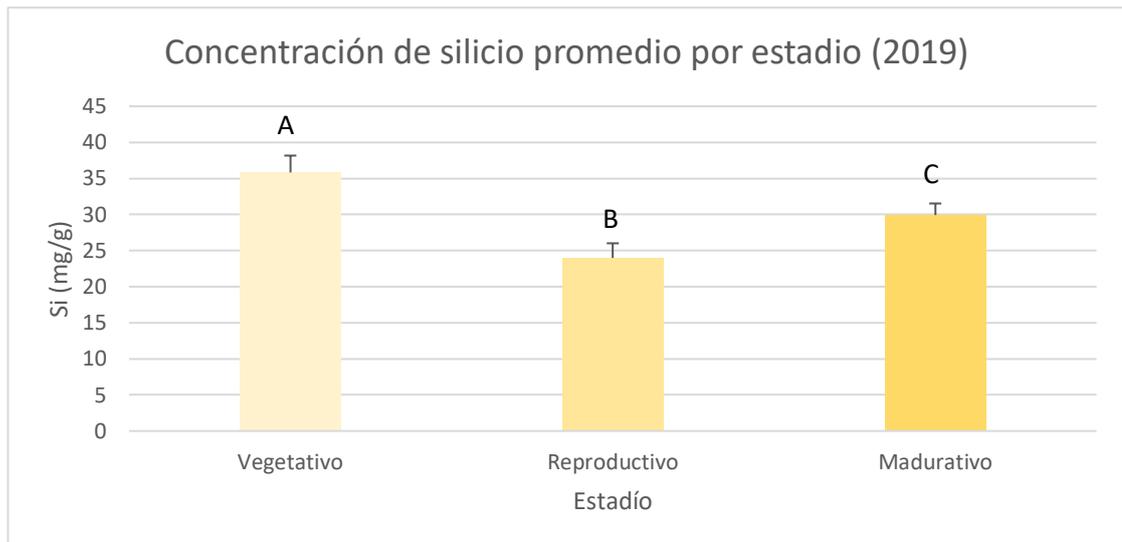


Figura 3.9: Concentración de silicio (mg/g) promedio de todos los tratamientos en cada estadio analizado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2019. Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Vale considerar que los patrones descritos se diferencian del ciclo anterior principalmente por la incorporación en el análisis de las raíces del estadio vegetativo, como así también de las semillas en el madurativo pero que no han contribuido con contenidos considerables sobre la cantidad total de Si determinada. En este ciclo, nuevamente se observa una similitud entre las cantidades de sílice entre tratamientos evaluados, lo cual nos posibilita agrupar y realizar un gráfico promedio entre la concentración de este elemento a lo largo de su desarrollo y dentro de los diversos órganos evaluados. En dicho gráfico (Fig. 3.10), se observan diferencias con valores estadísticamente significativos (valores $p < 0,05$).

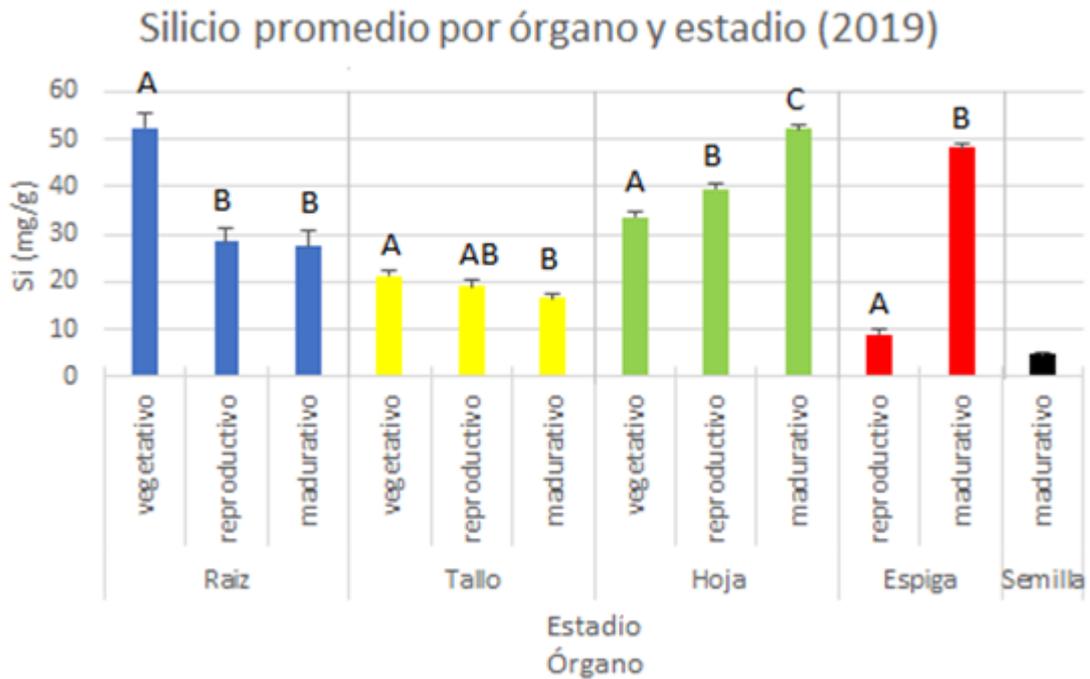


Figura 3.10: Concentración de silicio (mg/g) agrupando todos los tratamientos en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2019. Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Puede verse que las raíces han disminuido su contenido a lo largo del ciclo cayendo en valores cercanos a 20 miligramos de Si por gramo de planta analizado desde el estadio vegetativo hasta el estadio reproductivo y estadio madurativo, presentando estos últimos, valores muy similares entre sí (valor $p < 0,0001$). Los tallos han presentado una dinámica similar, pero en este caso disminuyendo cerca de 3 mg/g entre cada estadio sucesivo (valor $p = 0,0141$). Respecto de las hojas puede decirse que mostraron una dinámica opuesta a ambos órganos anteriormente mencionados, dado que aumentan su contenido en aproximadamente 6 mg/g desde el primer al segundo estadio y luego de este al final del ciclo se incrementa en un valor cercano a 12 mg/g, con diferencia significativa entre los tres estadios analizados (valor $p < 0,0001$). Por su parte, las espigas han pegado un salto considerable en la concentración de Si acumulado entre ambos estadios (valor $p < 0,0001$), siendo el mismo de aproximadamente 40 mg/g y finalmente las semillas han

sido el órgano que menor concentración de Si ha presentado (4,5 mg/g), considerando todos los órganos a lo largo del ciclo.

3.3.3.1.2.1. Estadio madurativo

Al ahondar en las concentraciones dentro del estadio madurativo, nuevamente no se ha encontrado diferencia significativa alguna entre tratamientos (valor $p = 0,6924$), mostrando un rango de valores comprendido entre los 24,5 mg/g y los 35,5 mg/g (Fig. 3.11). Consecuentemente, al analizar el contenido de Si en miligramos por gramo de planta analizada al momento de la cosecha, se ve que los órganos han mostrado diferencias significativas entre ellos (valor $p < 0,0001$) con prevalencia en su contenido por parte de las hojas (52 mg/g); seguidas por las espigas (48 mg/g), luego por las raíces (27,5 mg/g), seguidas por los tallos (16,6 mg/g) y finalmente las semillas (4,6 mg/g) (Fig. 3.10).

3.3.3.1.3. Comparación entre ambos ciclos

Al realizar la comparación de los tratamientos entre los estadios madurativo de ambos ciclos ensayados (Fig. 3.11), puede verse que todos los tratamientos han presentado mayores concentraciones de Si en las plantas desarrolladas durante el primer ciclo respecto las del segundo, con promedios generales de 40,26 y 29,92 miligramos de Si por gramo de planta analizada.

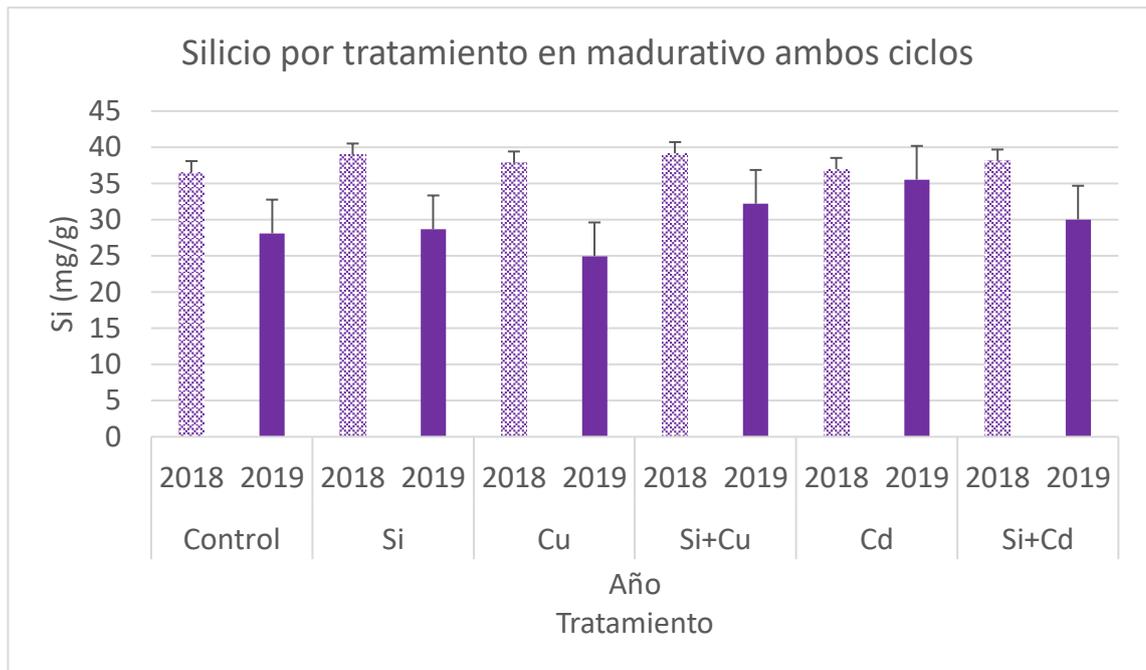


Figura 3.11: Concentración promedio de silicio (mg/g) alojado en los distintos tratamientos dentro del estadio madurativo en ambos ciclos ensayados. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Pudiendo estar dichas diferencias explicadas por la menor superficie vegetal disponible, dado el menor crecimiento que han registrado las plantas del 2018, lo cual limita su capacidad de distribución dentro de la misma, quedando finalmente más concentradas las cantidades de Si colectadas. Cabe mencionar que dichas cantidades se corresponden con las mencionadas por otros autores tanto a nivel mundial como regional, rondando este último los 30 mg/g (Parr y Sullivan, 2011; Gocke et al., 2013; Tubaña y Heckman, 2015; Benvenuto, 2017; Fernández Honaine et al., 2017; Frayssinet et al., 2023).

A continuación, se verá el patrón con el que las plantas han acumulado Si dentro de los diversos órganos en cada estadio a lo largo de ambos ciclos analizados (Fig. 3.12).

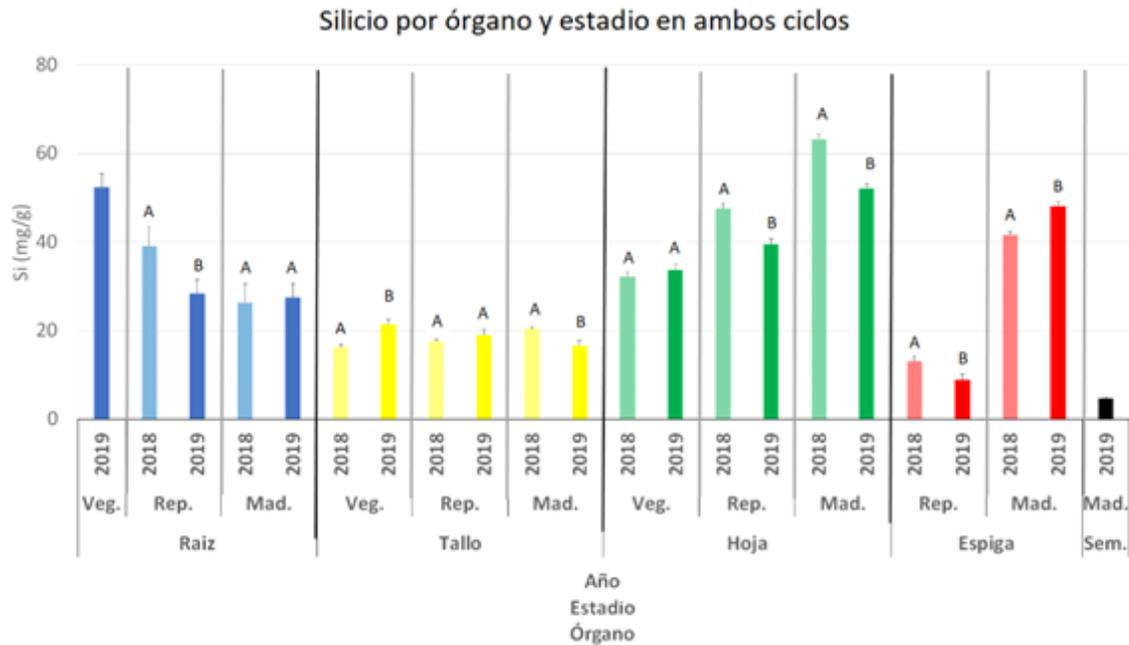


Figura 3.12: Concentración promedio de silicio (mg/g) agrupando todos los tratamientos en los distintos órganos a través de los distintos estadios raleados, comparándolos entre ambos ciclos ensayados. Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Puede verse que en ambos ciclos se repite el patrón de acumulación dentro de cada órgano, dado que las raíces disminuyen su contenido, mientras que los tallos se mantienen estables y por su parte las hojas incrementan las cantidades, al igual que las espigas. Se observan algunas diferencias significativas entre ciclos en los contenidos de sílice en ciertos órganos en determinados estadios: las raíces presentan diferencias significativas únicamente en el estadio reproductivo (valor $p = 0,0032$); los tallos presentan diferencias en el estadio vegetativo (valor $p < 0,0001$) y estadio madurativo (valor $p = 0,0272$); por su parte las hojas incrementan su contenido entre los últimos dos estadios evaluados (valores $p < 0,0001$) y finalmente las espigas también acumularon mayores valores en 2018 respecto del 2019 dentro de ambos estadios (valores $p = 0,0001$ y $0,0003$, respectivamente). Al ahondar en el patrón de acumulación al finalizar el ciclo puede verse que en promedio, ambos ciclos presentaron sus máximos dentro de las hojas (56 mg/g), seguidos por las espigas (45 mg/g), luego por lo contenido en las raíces (27 mg/g),

escoltadas por los tallos (18 mg/g) y presentando el mínimo dentro de las semillas (4,5 mg/g), habiéndose encontrado diferencias significativas entre cada uno de ellos (valor $p < 0,0001$). Dichos valores de prevalencia en la disposición no responden de la misma manera que lo reportado por Frayssinet y colaboradores (2023) dentro de los órganos de la planta de trigo que han evaluado, habiendo valores levemente mayores en promedio dentro de las hojas (52,05 mg/g), seguidas por los tallos (20 mg/g) y finalmente las espigas (21 mg/g).

3.3.3.2. Concentración de fósforo

3.3.3.2.1. Ciclo de cultivo 2018

Los análisis estadísticos no evidencian efecto sobre el contenido de P detectado en los distintos tratamientos entre los diferentes estadios evaluados (Cuadro 3.3 en el Apéndice). Al observar la concentración de P en la planta a lo largo del ciclo y discriminada por órgano (Fig. 3.13), puede verse que los máximos se dan en el estadio reproductivo dado que presenta elevadas cantidades en las espigas, luego en estadio vegetativo. se presentan importantes cantidades dentro de tallos y hojas, mientras que en el estadio madurativo arrojaron valores totales cercanos a los del estadio recientemente mencionados. Al mismo tiempo puede notarse que las cantidades dentro de todos los órganos disminuyen a medida que se avanza en el ciclo, siendo los tallos y las espigas los que lo hacen más marcadamente. Finalmente se puede observar que el máximo dentro del estadio reproductivo se da en el tratamiento que recibió el Si, destacándose por la elevada concentración que contiene en su espiga, respecto del resto de los tratamientos en la misma etapa del desarrollo.

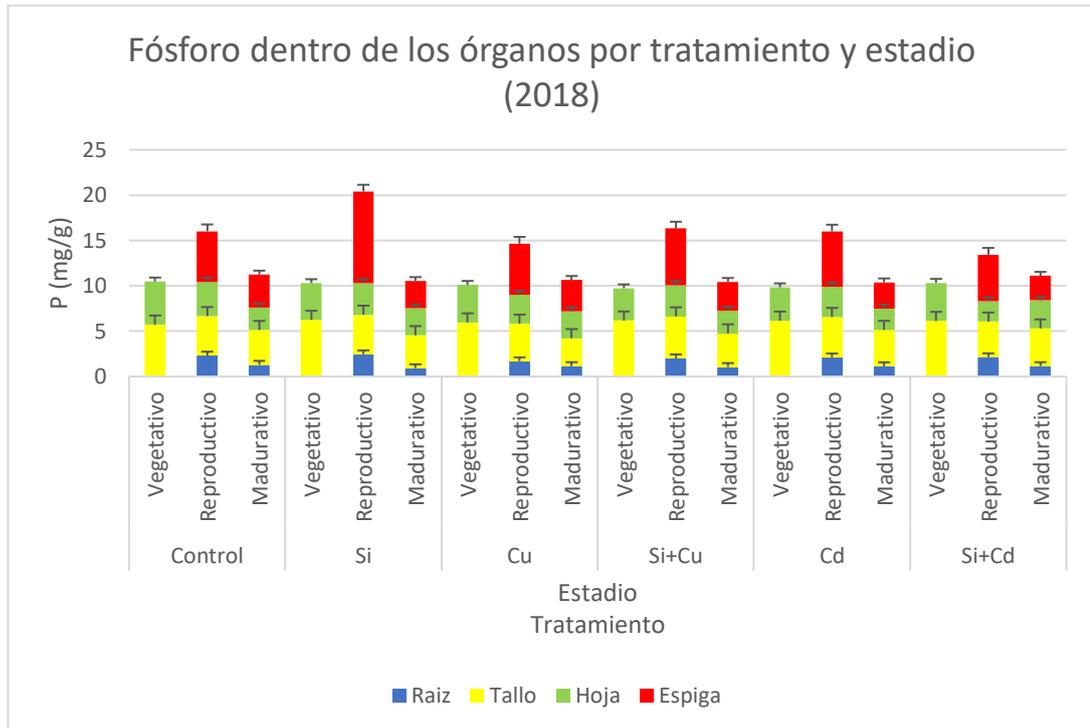


Figura 3.13: Concentración de fósforo (mg/g) por tratamiento en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Al analizar las concentraciones promedio a lo largo del ciclo, los valores máximos se encuentran en el estadio vegetativo (5,06 mg/g), mientras que se encuentran más cercanas sus cantidades en reproductivo y madurativo, siendo 3.54 mg/g y 2.68 mg/g, respectivamente, presentando diferencias significativas entre cada una de ellas (valor $p < 0,0001$) (Fig. 3.14).

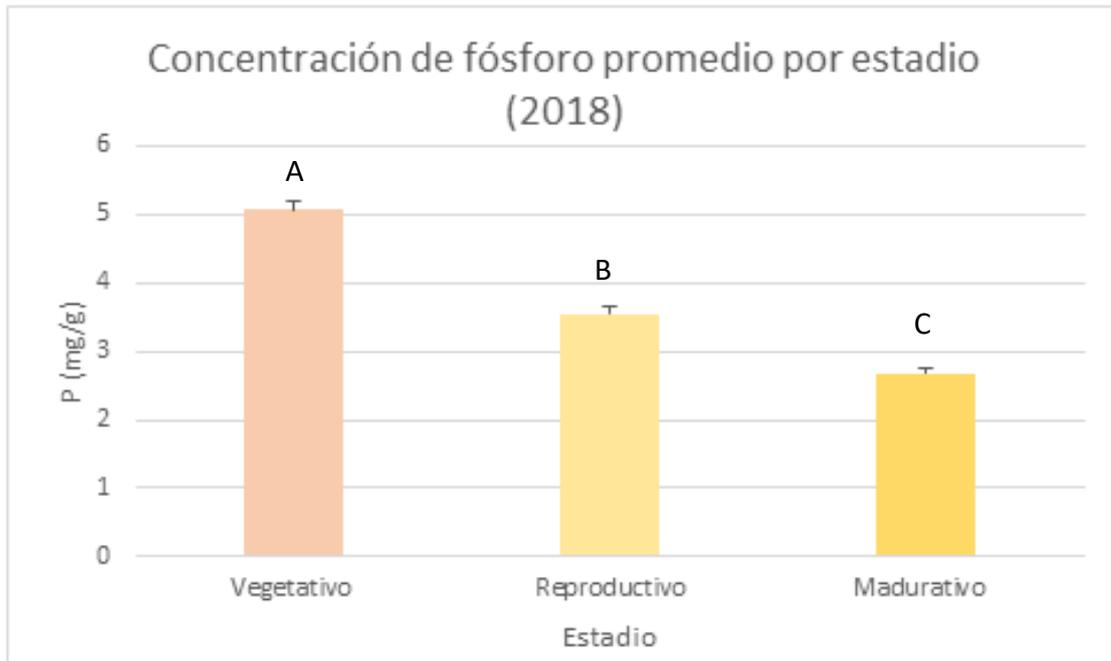


Figura 3.14: Concentración de fósforo (mg/g) promedio de todos los tratamientos en cada estadio analizado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018. Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos

Como se ha indicado anteriormente, todos los tratamientos presentan el mismo patrón de acumulación de P (Fig. 3.13), lo cual nos posibilita graficar su promedio dentro de los diversos órganos. Al observar el mismo (Fig. 3.15), se ve que todos disminuyen con el paso del tiempo, presentado diferencias significativas (valores $p < 0,0001$).

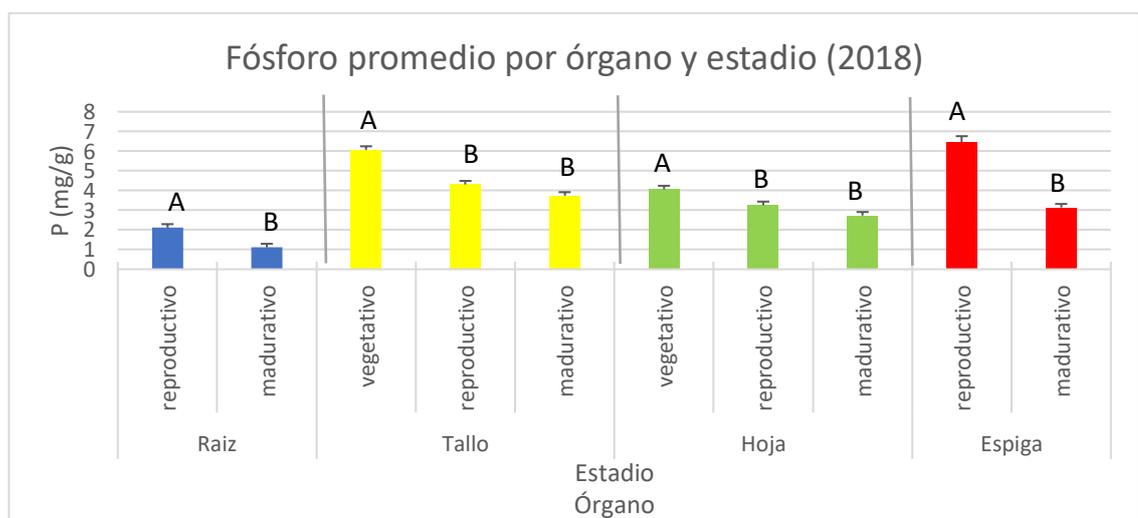


Figura 3.15: Concentración de fósforo (mg/g) agrupando todos los tratamientos en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018. Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Se observa que las raíces caen a la mitad, por su parte los tallos presentan el máximo en vegetativo disminuyendo hacia madurativo; mientras las hojas poseen una disminución cercana a un 1 mg/g entre estadios; y finalmente las espigas descienden su contenido en un 50% aproximadamente entre estadios.

3.3.3.2.1.2. Relación entre la concentración de silicio y fósforo

A continuación, evaluaremos si es que existe relación alguna entre la concentración promedio de Si y P, por órgano a lo largo de los distintos estadios muestreados dentro del 2018 (Fig. 3.16).

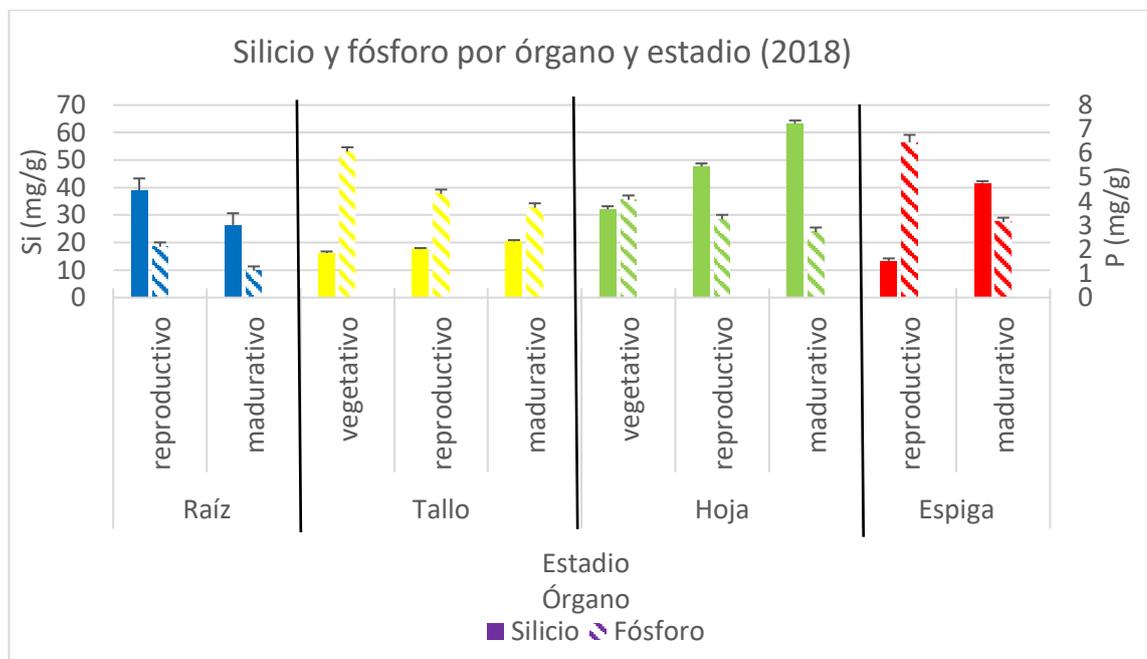


Figura 3.16: Concentraciones promedio de silicio (mg/g) y fósforo (mg/g) agrupando todos los tratamientos dentro de cada órgano evaluado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Luego de haber combinado los gráficos de concentración anteriormente explicados, puede verse que ambos elementos comparten un descenso en las cantidades registradas dentro de las raíces, mientras que el resto de los órganos presentan dinámicas opuestas, ya que los contenidos de Si aumentan mientras que los de P disminuyen. En este caso puede decirse que los órganos aéreos han acumulado mayor contenido de Si a

lo largo del desarrollo mientras que con el P sucede lo contrario. Sustentando lo encontrado por Song y colaboradores (2014), que han visto también un patrón inverso entre la concentración de Si y P en diversas gramíneas analizadas

3.3.3.2.1.3. Estadio madurativo

Al considerar la planta completa y evaluar las concentraciones promedio de P dentro del estadio final, no se ha visto efecto significativo entre los diistintos tratamientos (valor $p = 0,9965$) encontrándose los mismos entre los 2,59 mg/g y los 2,80 mg/g (Fig. 3.21).

Finalmente al evaluar los órganos en los cuáles prepondera este macronutriente al momento de la cosecha (Fig. 3.15), puede verse que se destacan los tallos (3,73 mg/g) presentando diferencias significativas respecto del resto de los órganos, estando seguidos por las espigas y hojas (3,13 mg/g y 2,72 mg/g, respectivamente), las cuales entre si no se diferencian estadísticamente, pero si lo hacen las raíces para con el resto de los órganos, dado que contienen cantidades significativamente inferiores 1,11 mg/g (valor $p < 0,0001$).

3.3.3.2.2. Ciclo de cultivo 2019

Los análisis estadísticos no evidencian efecto sobre el contenido de P detectado en los distintos tratamientos entre los diferentes estadios evaluados (Cuadro 3.4 en el Apéndice). Por otro lado, al observar la concentración de P en la planta a lo largo del ciclo y discriminado por órgano (Fig. 3.17), puede verse que los máximos se dan en el estadio reproductivo con elevadas cantidades en las espigas decayendo luego hacia el final del ciclo. Por su parte en el estadio vegetativo se presentan importantes cantidades dentro de tallos y hojas, siendo similares para todos los tratamientos ensayados, mientras que en el estadio madurativo arrojaron valores sumamente elevados en las semillas. Finalmente se puede observar que el tratamiento Control es el único que presenta valores superiores en

el estadio vegetativo, respecto del estadio madurativo, dado que ha registrado cantidades de P en las raíces evaluadas, contenido que no se detectó en el resto de los tratamientos.

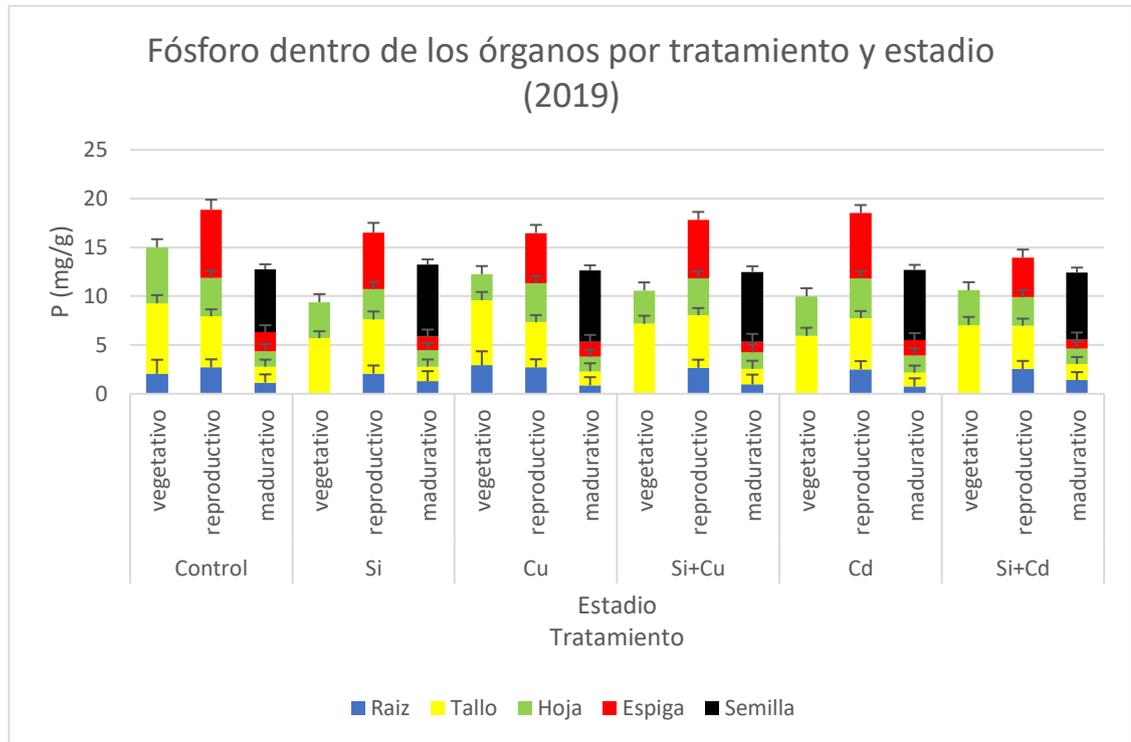


Figura 3.17: Concentración de fósforo (mg/g) por tratamiento en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2019. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Al evaluar la concentración promedio de P a lo largo del ciclo, puede verse que los valores caen aproximadamente en 1 mg/g a lo largo del ciclo, presentando diferencias significativas (valor $p = 0,0007$), siendo los mismos: 5,11 mg/g en estadio vegetativo, luego 4,20 mg/g en estadio reproductivo y finalizando con 3,40 mg/g (Fig. 3.18).

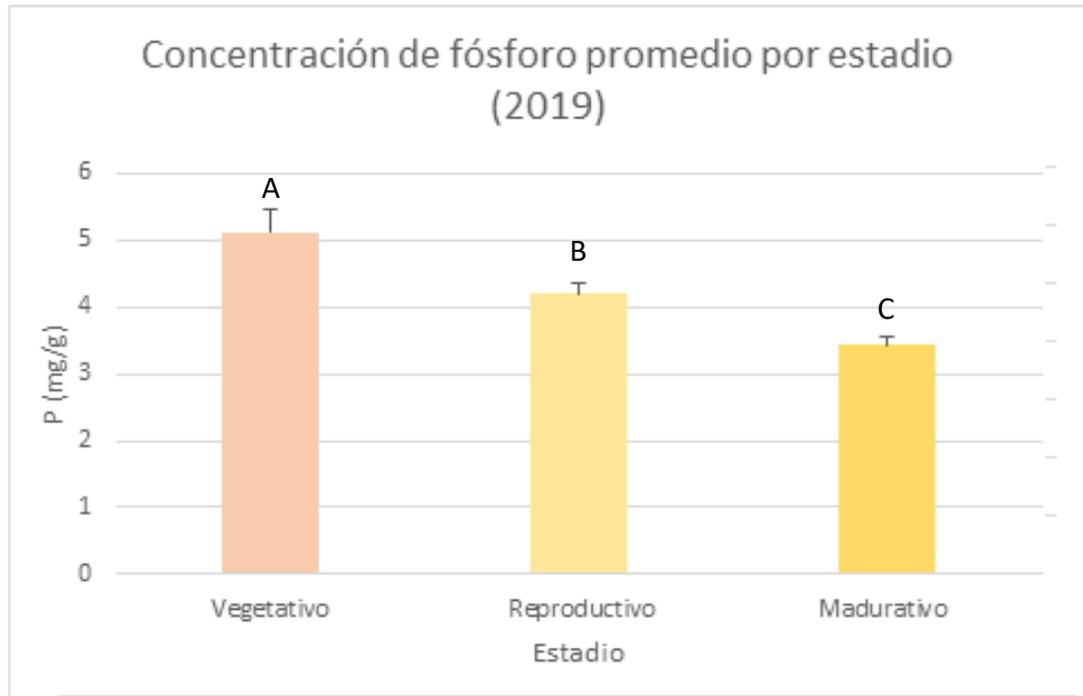


Figura 3.18: Concentración de fósforo (mg/g) promedio de todos los tratamientos en cada estadio analizado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018. Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

La similitud observada en la figura 3.17, nos posibilita agrupar y realizar un gráfico con la concentración de este elemento a lo largo del desarrollo de las plantas, considerando los diversos órganos evaluados (Fig. 3.19).

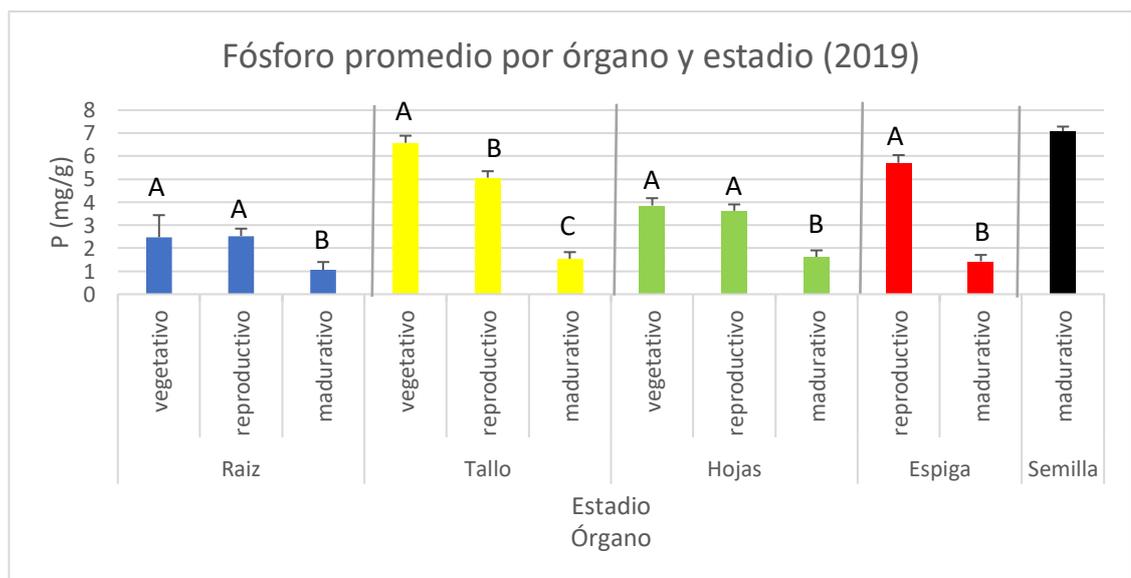


Figura 3.19 Concentración de fósforo (mg/g) agrupando todos los tratamientos en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2019. Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Por su parte la concentración de P en las raíces disminuye desde los primeros estadios aproximadamente 1 mg/g hasta el estadio madurativo (valor $p < 0,0001$); los tallos presentan diferencias significativas, pasando de 6,57 mg/g en estadio vegetativo a 1,54 mg/g en estadio madurativo (valor $p < 0,0001$) por su parte las hojas del estadio vegetativo y estadio madurativo contienen cantidades similares, cayendo en 2mg/g hacia el final del ciclo (valor $p < 0,0001$); luego las espigas muestran un descenso de valores más abrupto (valor $p < 0,0001$) y finalmente encontramos el máximo dentro las semillas.

3.3.3.2.2.1. Relación entre la concentración de silicio y fósforo

Nuevamente, evaluaremos si es que existe relación alguna entre la concentración promedio de Si y P, por órgano a lo largo de los distintos estadios muestreados dentro del 2019 (Fig. 3.20).

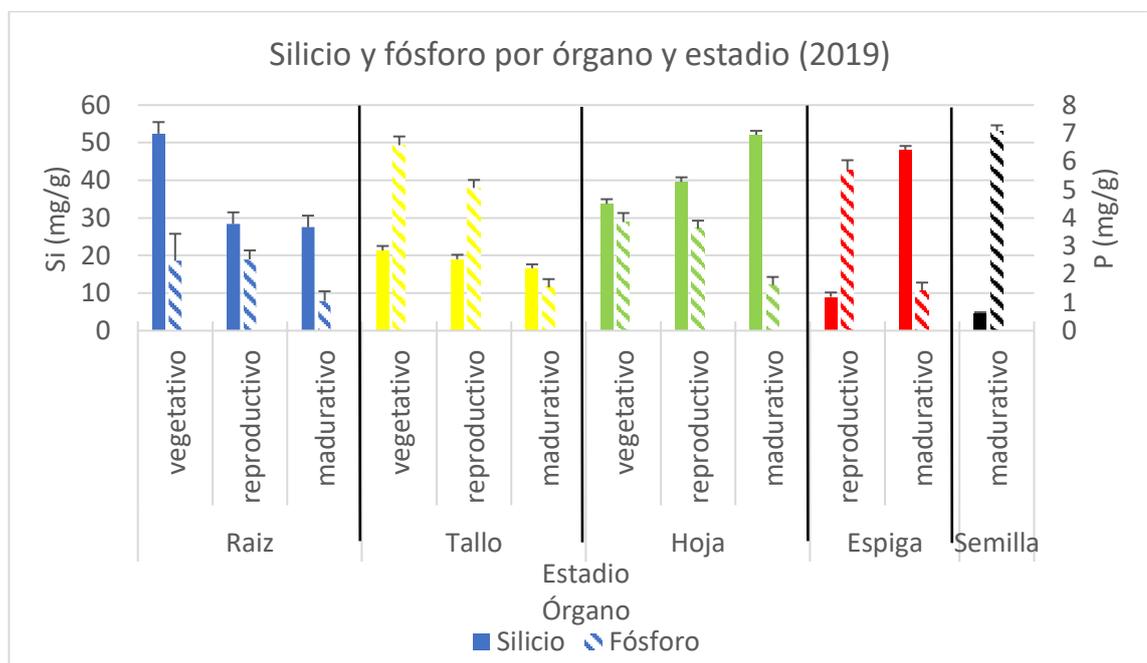


Figura 3.20: Concentraciones promedio de silicio (mg/g) y fósforo (mg/g) agrupando todos los tratamientos dentro de cada órgano evaluado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2019. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Al combinar los patrones de deposición previamente mencionados, puede verse que nuevamente son los órganos aéreos los que presentan dinámicas opuestas, mientras

que las raíces poseen patrones de acumulación descendientes para ambos elementos a lo largo del último ciclo evaluado. Un aspecto sumamente interesante en esta relación es el del contenido dentro de las semillas, dado que es el órgano que contuvo la menor cantidad de Si registrada, mientras que el P ha mostrado su máximo, considerando ambos valores a lo largo de todos los estadios evaluados y considerando todos los órganos involucrados.

Este resultado, puede verse explicado por la importancia que posee el P como macronutriente para acumularse en la semilla y asegurar el correcto desarrollo de la plántula durante la emergencia del cultivo en el nuevo ciclo por delante. Podría entonces considerarse a la semilla como un órgano destino en lo referente al P y su distribución.

3.3.3.2.2.2. Estadio madurativo

Al evaluar las concentraciones promedio de P por tratamiento al momento de la cosecha del cultivo, puede verse que no han presentado diferencia alguna (valor $p = 0,9958$), encontrándose sus valores entre los 3,13 mg/g y los 3,64 mg/g (Fig. 3.21).

Al analizar su distribución dentro de los diversos órganos (Fig. 3.19), puede verse que son las semillas las que contienen cantidades sumamente superiores al resto de los órganos, siendo su valor: 7,08 mg/g y poseyendo en promedio las mismas 6 miligramos más de P por gramo de planta analizada que el resto, implicando diferencias significativas (valor $p < 0,0001$), ya que los valores registrados para las raíces fueron de 1,06 mg/g; para los tallos de 1,54 mg/g; mientras que para las hojas 1,62 mg/g; y finalmente 1,42 mg/g dentro de las espigas.

3.3.3.2.3. Comparación entre ambos ciclos

Al comparar la concentración al momento de la cosecha para los tratamientos ensayados en ambos ciclos (Fig. 3.21), puede verse que no hay diferencia significativa (valores $p > 0,05$), y que las plantas del 2019 han tenido una absorción levemente mayor

de P (3,41 mg/g) respecto a las plantas del 2018 (2,68 mg/g), estando sus valores rondando lo determinado por otros autores dentro del mismo cultivo (Calderini et al., 1995; Baligar et al., 2001; Sharma y Sharma, 2016; Wang y Huang, 2019). El incremento entre ciclos puede explicarse, gracias a las adaptaciones vegetales desarrolladas, como la liberación de ácidos orgánicos y enzimas fosfatasas, para mejorar su captura y proveer las cantidades necesarias de dicho macronutriente con la finalidad de alcanzar su correcto desarrollo (Vance et al., 2003; Richardson et al., 2011; Lambers y Plaxton, 2015; He et al., 2019).

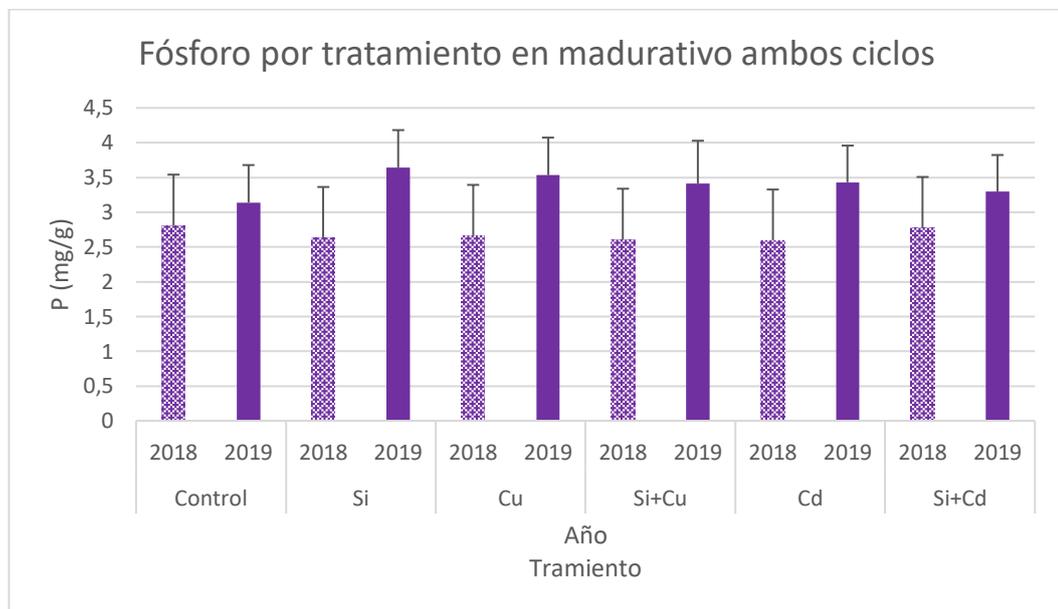


Figura 3.21: Concentración promedio de fósforo (mg/g) alojado en los distintos tratamientos dentro del estadio madurativo en ambos ciclos ensayados. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Finalmente, al evaluar la concentración de P dentro de los diversos órganos a lo largo de ambos ciclos (Fig. 3.22), puede verse que poseen una dinámica muy similar, dado que todos disminuyen sus concentraciones dentro del 2018 y del 2019, pero al compararlos entre ciclos se observa algunas dinámicas diferentes, con pocas diferencias significativas.

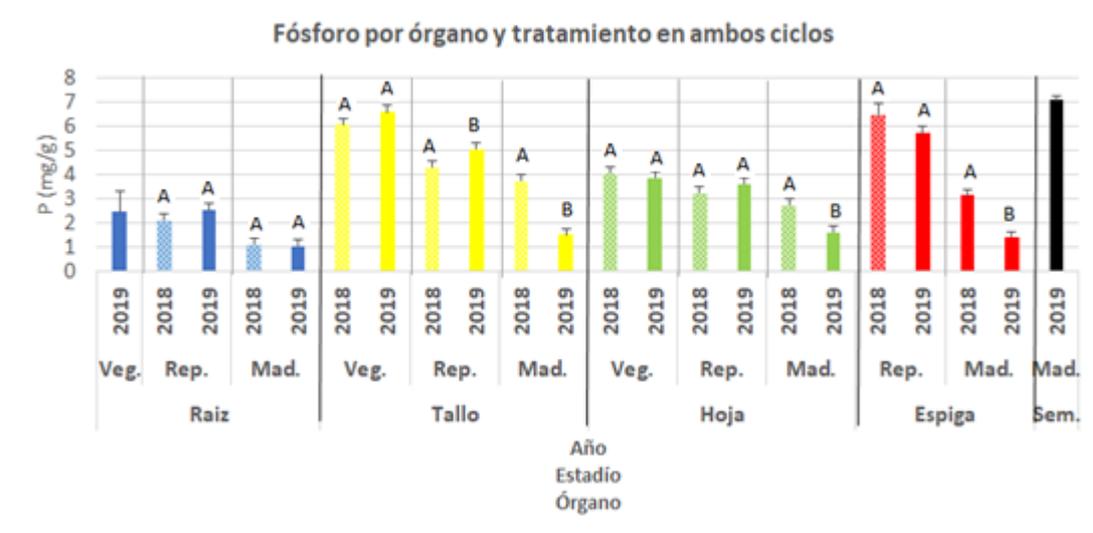


Figura 3.22: Concentración de fósforo (mg/g) agrupando todos los tratamientos en los distintos órganos analizados, a lo largo de los distintos estadios en ambos ciclos. Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Puede verse que las raíces no han presentado modificaciones considerables entre ciclos, mientras que los tallos presentaron aumentos en estadio vegetativo y reproductivo, con diferencias estadísticas significativas dentro de este último (valor $p = 0,0431$) y con menores valores del 2019 respecto del 2018 en el estadio madurativo (valor $p < 0,0001$); las hojas son muy similares entre estadio vegetativo y reproductivo de ambos ciclos, pero disminuyendo en el estadio madurativo de 3,73 mg/g a 1,54 mg/g (valor $p < 0,0001$); mientras que las espigas presentaron diferencias en estadio madurativo (valor $p < 0,0001$), siendo superior su contenido en el primero respecto del segundo (3,13 mg/g y 1,42 mg/g, respectivamente). Por último, pero con concentraciones sumamente destacables al compararse con el resto de los órganos pertenecientes a ambos ciclos, tenemos a las semillas que alojaron los máximos valores de P detectados, siendo los mismos de 7,08 mg/g.

Finalmente cabe destacar que en promedio ambos ciclos al momento de la cosecha presentaron los mismos patrones de deposición, teniendo sus mínimos en el órgano subterráneo (1,09 mg/g) seguidas por las hojas (2,11 mg/g), espigas (2,18 mg/g) y tallos

(2,53 mg/g), estando finalmente su máximo presentando dentro de las semillas (con valores promedio cercanos a 7 mg/g), habiéndose encontrado diferencias significativas entre raíces, los 3 órganos aéreos con valores promedio de 2 mg/g y las semillas (valor $p < 0,0001$). Los valores observados han mostrado una prevalencia en su acumulación para las semillas como varios autores han demostrado (Papakosta, 1994; Grant y Flaten, 2011; Irfan et al., 2018), pero con diferencias en el resto de los órganos, dado que han observado que las raíces poseen mayores concentraciones, seguidas por las espigas y tendiendo finalmente a los tallos y hojas con el menor contenido dentro del cultivo de trigo que han analizado. Finalmente, al observar dicho patrón, cabe resaltar nuevamente la importancia que posee dicho macronutriente para ser acumulado en la semilla con la finalidad de garantizar su desarrollo y madurez, como así también de promover una correcta emergencia contribuyendo de esta manera el comienzo de un nuevo ciclo de cultivo (Baligar et al., 2001; Grant y Flaten, 2011; Wang y Huang, 2019).

3.3.3.3. Concentración de cobre

3.3.3.3.1. Ciclo de cultivo 2018

Los análisis estadísticos no evidencian efecto sobre el contenido de Cu detectado en los distintos tratamientos entre los diferentes estadios evaluados (Cuadro 3.5 en el Apéndice). Al observar los valores de Cu registrados en los distintos órganos a lo largo de los distintos estadios (Fig. 3.23), se detectó un contenido abundante dentro de las raíces, siendo mayor en el estadio madurativo que en el reproductivo. Al mismo tiempo se observa que durante el estadio vegetativo todos los tratamientos han mostrado valores similares, como así también su distribución dentro de los tallos y hojas, concentraciones que van disminuyendo hacia el final del ciclo. La única excepción son las hojas del tratamiento de Si+Cd ya que contienen más en el estadio madurativo respecto de lo

contenido en estadio reproductivo y vegetativo. Finalmente puede verse que las espigas tienen un comportamiento variado entre tratamientos, ya que Control, Si+Cu y Si+Cd elevan su contenido hacia el final del ciclo, mientras que Si, Cu y Cd lo disminuyen.

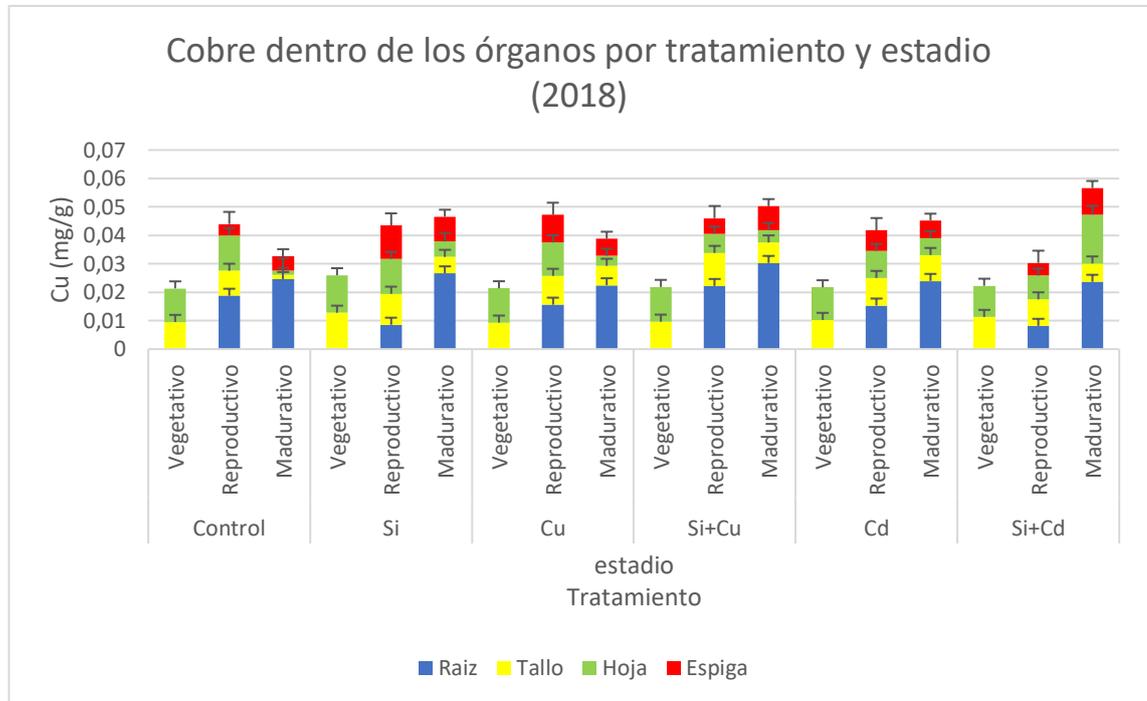


Figura 3.23: Concentración de cobre (mg/g) por tratamiento en cada estadio y dentro de cada órgano, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Al mismo tiempo puede verse que la mayoría de los tratamientos, aumentan su concentración total de Cu, exceptuándose de presentar dicha dinámica las plantas pertenecientes al Control y al Cu. Al analizar los valores promedio de los distintos estadios, se observa que en el estadio vegetativo poseen 0,011209 mg/g, ascendiendo a 0,011216 mg/g en el reproductivo y finalizando con 0,01153 mg/g en el estadio madurativo, sin presentar diferencia significativa entre ellos (valor $p = 0,9613$) (Fig 3.24).

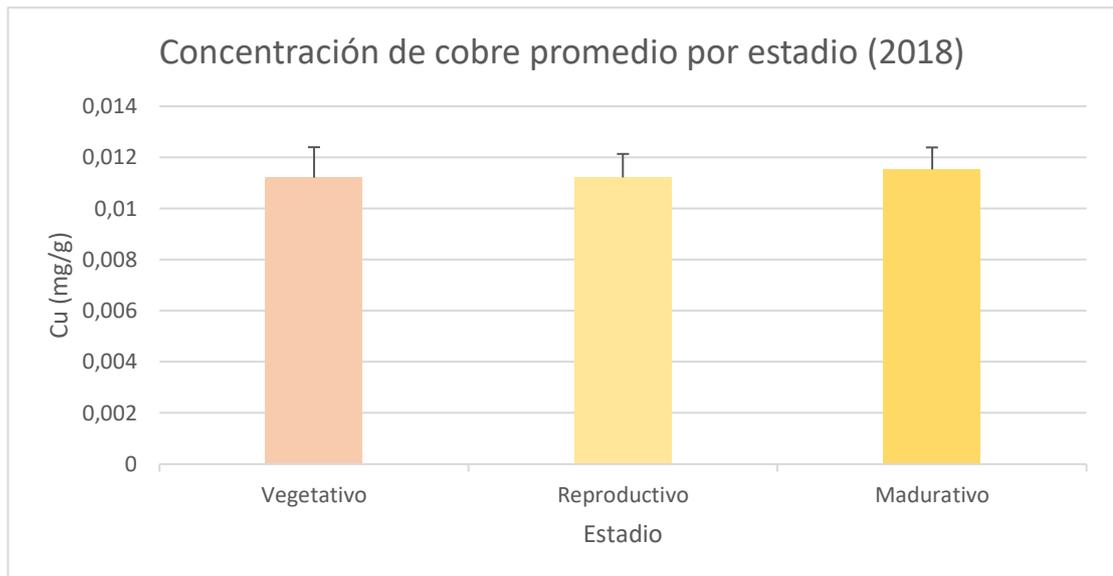


Figura 3.24: Concentración de cobre (mg/g) promedio de todos los tratamientos en cada estadio analizado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos

La similitud observada a través de la mayoría de los tratamientos (Fig. 3.23) nos posibilita agrupar y realizar un gráfico acerca de la distribución promedio del Cu a través de los estadios (Fig.3.25).

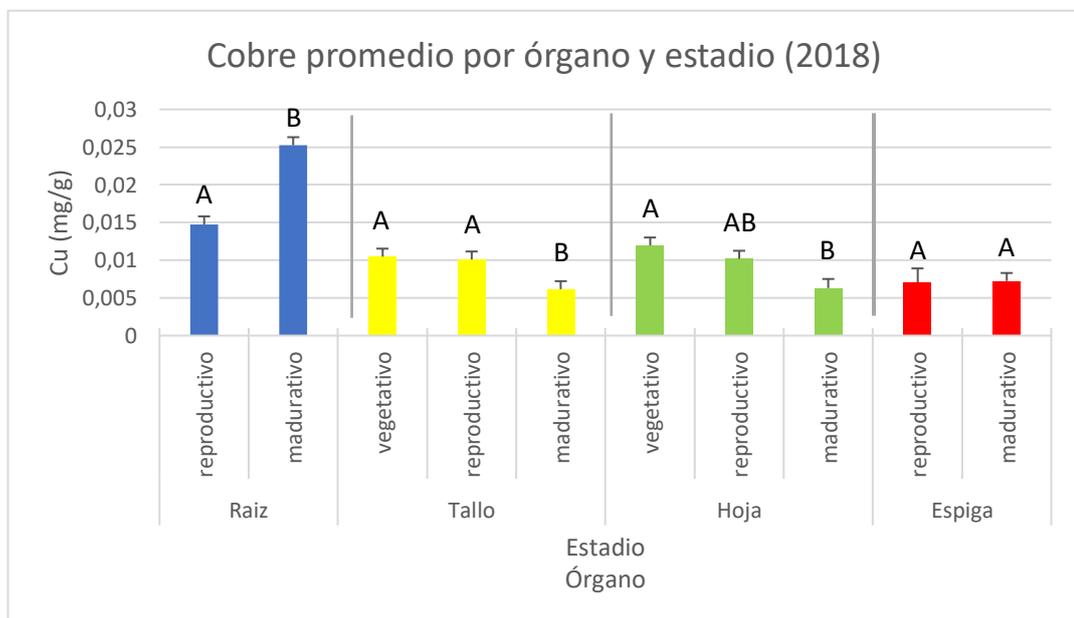


Figura 3.25: Concentración de cobre (mg/g) agrupando todos los tratamientos en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018. Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Se observa que la mayoría de los órganos disminuyen su contenido, exceptuando a las raíces y espigas que se comportan inversamente. Las raíces casi duplican mientras tallos y hojas descienden en valores cercanos a la mitad sus concentraciones determinadas entre estadios (valores $p < 0,007$), mientras que las espigas presentan valores similares (valor $p = 0,9499$).

3.3.3.3.1.1. Relación entre la concentración de silicio y cobre

A continuación, evaluaremos si es que existe relación entre la concentración promedio de Si y Cu, por órgano a lo largo del 2018 (Fig. 3.26).

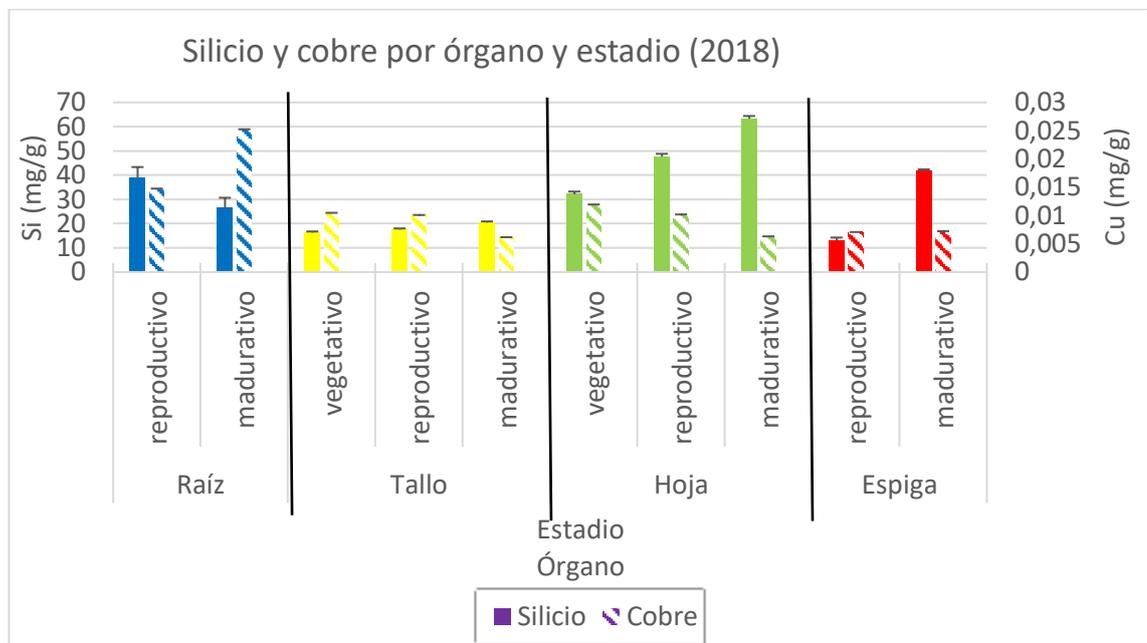


Figura 3.26: Concentraciones promedio de silicio (mg/g) y cobre (mg/g) agrupando todos los tratamientos dentro de cada órgano evaluado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Puede verse que todos los órganos presentan dinámicas inversas en los contenidos determinados para Cu respecto del Si. Estas dinámicas pueden estar indicando algún proceso de acumulación diferencial entre el Cu y el Si dentro de la planta ante condiciones de estrés (considerando en este caso, la elevada competencia entre las plantas desarrolladas), dado que los mayores contenidos de Cu han coincidido con los menores

de Si a lo largo de todo el ciclo y dentro de cada uno de los órganos evaluados (Khandekar y Leisner, 2011; Moore et al., 2014).

3.3.3.3.1.2. Estadio madurativo

Al analizar la concentración del Cu a lo largo de los distintos tratamientos aplicados en el estadio final, se observó que sus valores rondan los 0,009472 mg/g hasta los 0,013878 mg/g, sin mostrar efecto significativo (valor $p=0,8978$) (Fig. 3.31).

Al considerar su acumulación por parte de los órganos en estadio madurativo, puede verse que la raíz sobresale, presentando diferencias significativas para con el resto de los órganos (valor $p<0,0001$), dado que presenta valores de 0,02525 mg/g, que triplican a los obtenidos por las hojas, tallos y espigas 0,00616 mg/g, 0,00631 mg/g y 0,00724 mg/g, respectivamente (Fig.3.25). Dicho patrón de acumulación puede estar indicando un posible proceso de rizofiltración por parte de las plantas de trigo, con la finalidad de evitar su traspaso a los órganos aéreos para que no sufran efectos negativos al superar el valor umbral de dicho micronutriente, el cual si se encuentran excediendo las cantidades necesarias desencadenaría procesos de toxicidad dentro de la planta (Li et al., 2008; Frantz et al., 2011).

3.3.3.3.2. Ciclo de cultivo 2019

Los análisis estadísticos no evidencian efecto sobre el contenido de Cu detectado en los distintos tratamientos entre los diferentes estadios evaluados (Cuadro 3.6 en el Apéndice). Al observar el gráfico donde se detalla su concentración dentro de cada órgano a lo largo del ciclo (Fig. 3.27) puede verse que las raíces incrementan su contenido en todos los tratamientos. Al mismo tiempo, se presentan cantidades más abundantes de este elemento en los tallos y hojas dentro del estadio vegetativo, exceptuándose únicamente al control y viéndose que dicha abundancia en hojas se repite solamente en el estadio madurativo para el tratamiento Cd. Por otro lado, se visualiza que la concentración se

incrementa en las espigas, salvo para el tratamiento de Si, que se comporta a la inversa. Finalmente se observa que las semillas contienen cantidades similares dentro de todas las plantas analizadas.

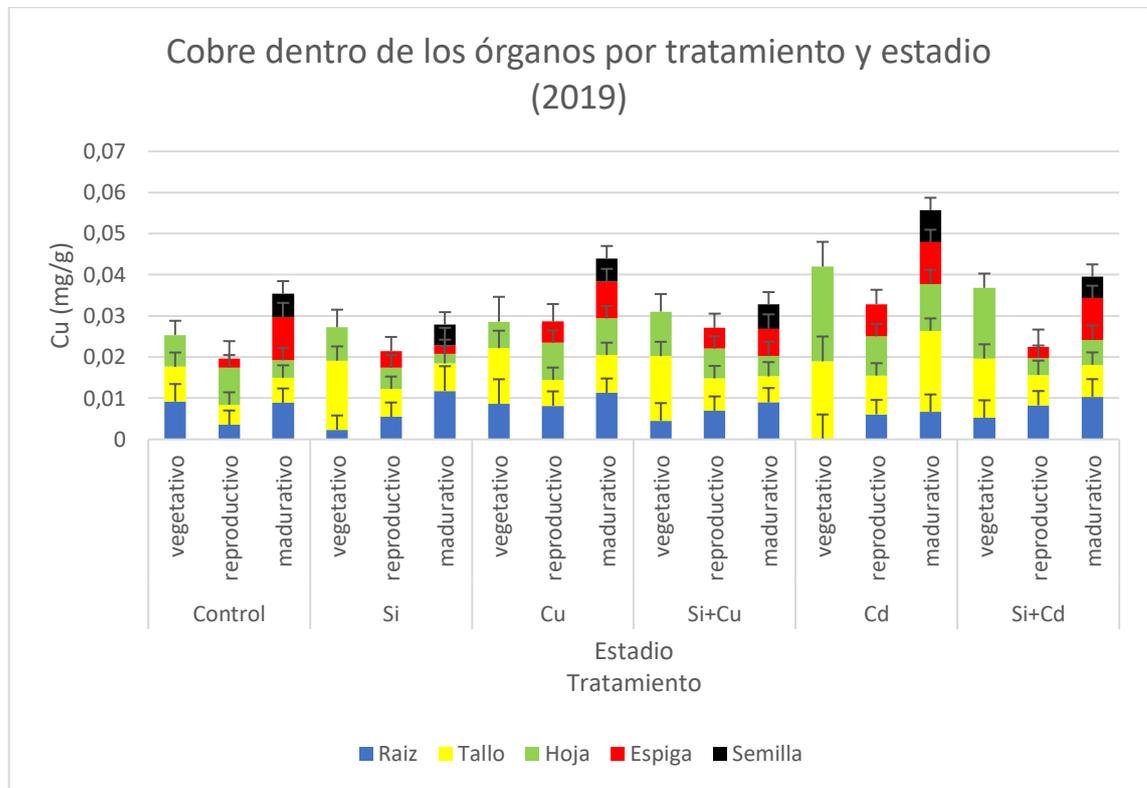


Figura 3.27: Concentración de cobre (mg/g) por tratamiento en cada estadio y dentro de cada órgano, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2019. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Al mismo tiempo se observa que todos los tratamientos disminuyen su concentración desde el estadio vegetativo (0,01118 mg/g) al reproductivo (0,006569mg/g), finalizando con un leve incremento respecto de este último dentro del madurativo (0,007848 mg/g), con diferencias significativas entre el primer estadio que casi duplica a los dos restantes (valor $p=0,0011$) (Fig. 3.28).

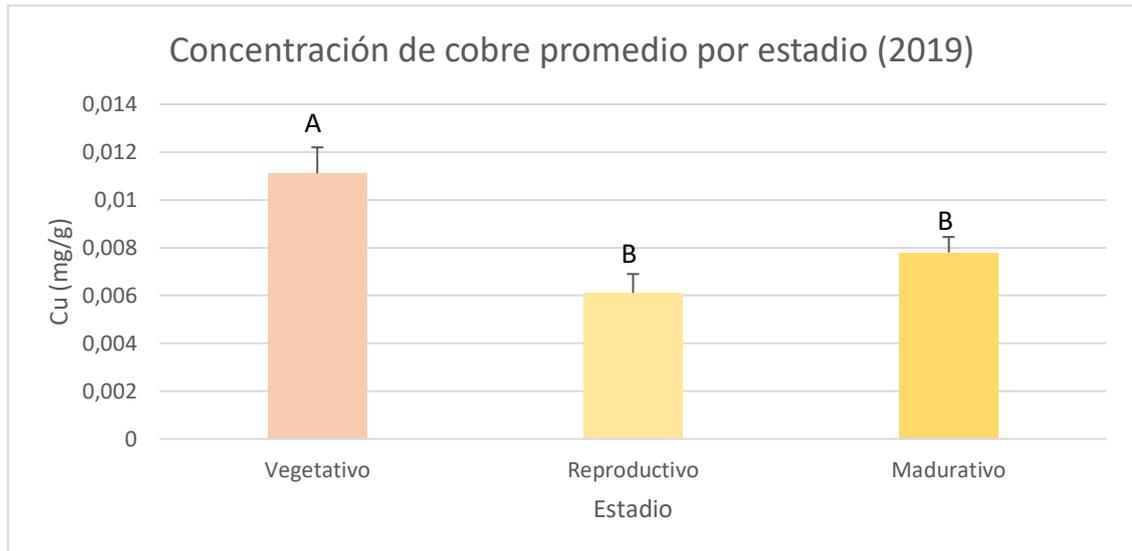


Figura 3.28: Concentración de cobre (mg/g) promedio de todos los tratamientos en cada estadio analizado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2019. Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Al evaluar la concentración del Cu a lo largo de su desarrollo y dentro de los diversos órganos (Fig. 3.29), se presentan comportamientos distintos, existiendo en 3 de ellos diferencias significativas.

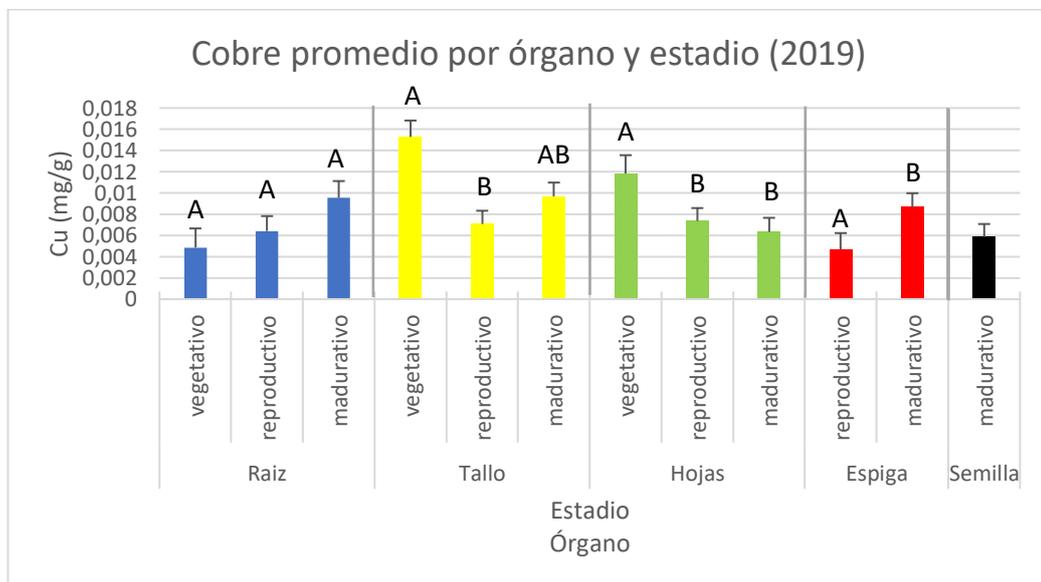


Figura 3.29: Concentración de cobre promedio (mg/g) agrupando todos los tratamientos dentro de cada órgano evaluado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2019. Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Las raíces incrementan su contenido en 0,002 mg desde el estadio vegetativo al reproductivo y en 0,003 mg/g desde éste al estadio madurativo (valor $p=0,0744$); mientras que los tallos presentan su menor contenido en el estadio reproductivo y su máximo en el vegetativo, con diferencias significativas entre ellos (valor $p=0,0153$); luego las hojas han mostrado valores decrecientes con diferencias significativas entre el estadio vegetativo y los dos siguientes (valor $p=0,0175$); por su parte las espigas duplicaron su contenido (valor $p = 0,0286$); y finalmente las semillas arrojaron valores de 0,005862 mg/g, cercanos al promedio.

3.3.3.2.1. Relación entre la concentración de silicio y cobre

A continuación, evaluaremos si es que existe relación alguna entre la concentración promedio de Si y Cu, por órgano a lo largo de los distintos estadios (Fig. 3.30).

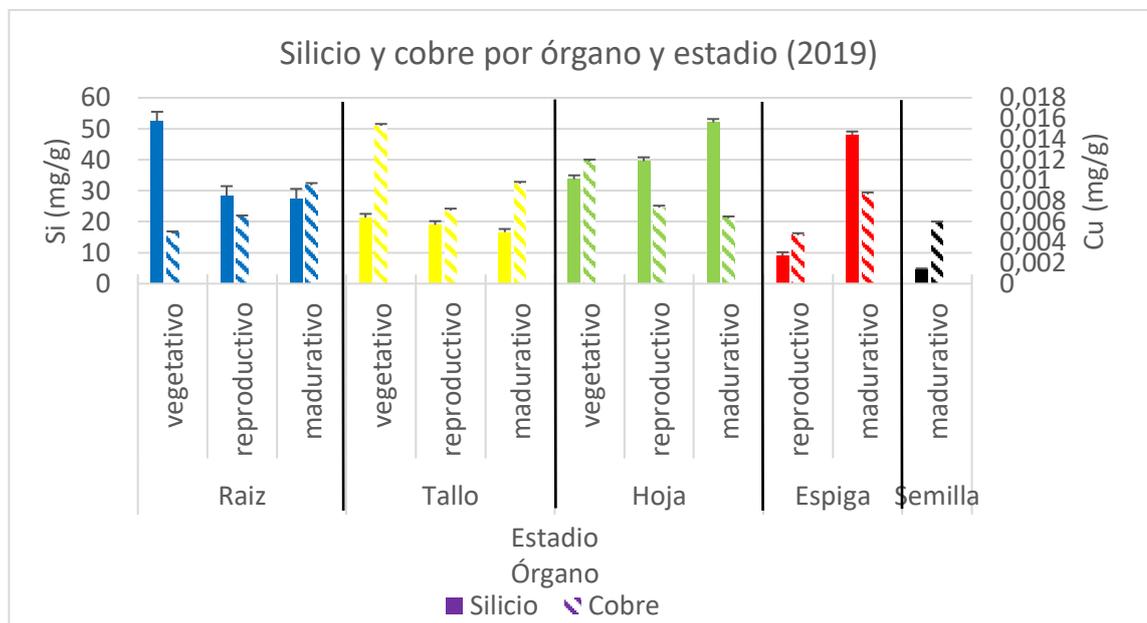


Figura 3.30: Concentraciones promedio de silicio (mg/g) y cobre (mg/g) agrupando todos los tratamientos dentro de cada órgano evaluado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2019. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Puede verse un comportamiento inverso en el órgano subterráneo y las hojas, mientras que las espigas lo hacen de manera similar (aumentando la concentración de

ambos elementos con el tiempo). Por su parte los tallos presentan un menor contenido de ambos elementos en el estadio final respecto del inicial, pero el Cu lo hace habiendo registrado el menor contenido dentro del estadio reproductivo, mientras que el Si descende de manera progresiva. Finalmente se observa que las semillas contienen las cantidades más bajas de Cu y Si respecto a lo detectado para el resto de los órganos al momento de la cosecha, pudiendo tener alguna utilidad semejante a la hora de depositarse en dichas proporciones dentro del órgano que dará lugar a un nuevo ciclo de cultivo. Puede decirse que ambos elementos presentan dinámicas variables al analizar cada órgano, ya que dos son inversas y las otras dos muy similares. Finalmente se destaca que la concentración registrada dentro de los granos ha sido baja para ambos elementos, estando en este ciclo los valores de Cu dentro de los permitidos para su consumo por la FAO-OMS (1999), posibilitando su comercialización como *commodity*, cumpliendo así su rol de satisfacer parte de la demanda del mercado a nivel mundial.

3.3.3.3.2.2. Estadio madurativo

Al evaluar las concentraciones de Cu en los distintos tratamientos al momento de la cosecha, no se ha visto efecto significativo (valor $p = 0,0678$), habiendo presentado valores que comienzan en 0,00470 mg/g y alcanzan los 0,01165 mg/g (Fig. 3.31). Finalmente se ha registrado que las raíces y los tallos son los órganos que más cobre contienen por gramo de planta (0,00953 mg/g y 0,00968 mg/g, respectivamente), seguidos por las espigas (0,00865 mg/g), luego por las hojas (0,00633 mg/g) y teniendo en último lugar a las semillas con 0,00586 mg/g, sin diferencia significativa (Fig.3.29) (valor $p = 0,1808$).

3.3.3.3.3. Comparación entre ambos ciclos

Al comparar entre los ciclos ensayados las concentraciones de Cu detectados para cada tratamiento dentro del estadio final del ciclo (Fig. 3.31) puede verse que los del

primer ciclo acumularon mayores cantidades (0,01153 mg/g) que los del segundo (0,00784 mg/g), pudiendo estar explicadas por la menor superficie vegetal disponible, dado el menor crecimiento que han registrado las plantas del 2018, lo cual limita su capacidad de distribución dentro de la misma, quedando finalmente más concentradas las cantidades de Cu colectadas. Dichos valores se encuentran rondando los determinados para ciertos cultivos a nivel mundial y dentro de la zona (Almaroai et al., 2012; Frayssinet et al., 2023). Se han considerado los reportados para las gramíneas que no se han desarrollado en ambientes con concentraciones sumamente elevadas de Cu (áreas mineras e industriales, entre otras), ya que estas últimas no reflejan lo sucedido en este ensayo como así tampoco la realidad de los cultivos comúnmente sembrados en el sudeste bonaerense.

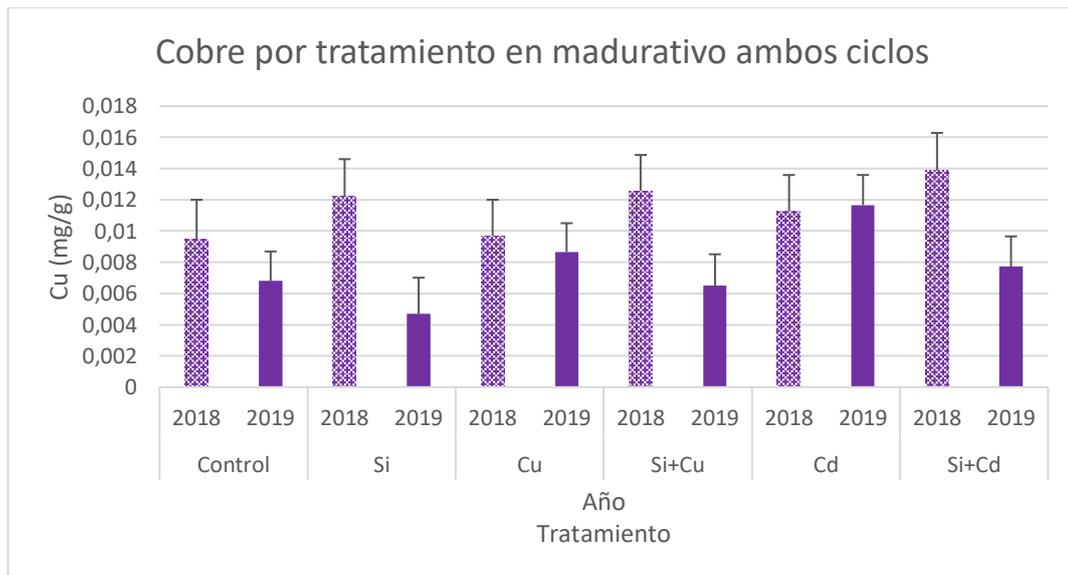


Figura 3.31: Concentración promedio de cobre (mg/g) alojado en los distintos tratamientos dentro del estadio madurativo en ambos ciclos ensayados. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Finalmente, dentro de cada órgano puede verse que ambos ciclos presentan un rango de valores bastante similares (Fig. 3.32), excluyendo de dicha paridad a las raíces dado que presentan valores sumamente superiores en el 2018, mostrando una diferencia de 0,00833 mg/g para el estadio reproductivo viéndose la misma duplicada por la del final

(0,01572 mg/g) (valores $p < 0,0001$). Al mismo tiempo se observan diferencias dentro del estadio reproductivo entre los tallos (valor $p = 0,0010$) y las hojas (valor $p = 0,0391$), descendiendo entre ciclos 0,00301 mg/g y 0,00282 mg/g, ambos órganos respectivamente mencionados. Las concentraciones dentro de los tallos en el estadio vegetativo (valor $p = 0,0693$) y el estadio madurativo (valor $p = 0,1742$) se han incrementado en 0,00481 mg/g y en 0,00352 mg/g, respectivamente, mientras que lo detectado en las hojas para ambos estadios fue bastante estable, disminuyendo simplemente en 0,00011 mg/g dentro de estadio vegetativo (valor $p = 0,9586$) y aumentando en 0,00002 mg/g (valor $p = 0,9915$) en estadio madurativo. Respecto de las espigas puede verse que en estadio reproductivo disminuyen su contenido en 0,00239 mg/g (valor $p = 0,0881$) mientras que en estadio madurativo lo aumentan en 0,0014 mg/g (valor $p = 0,4935$).

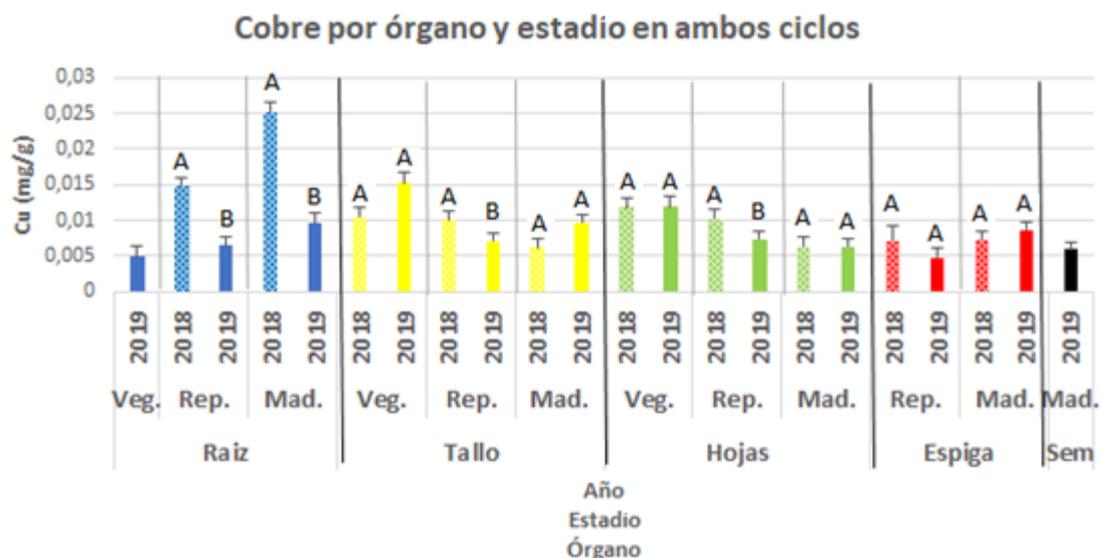


Figura 3.32: Concentración promedio de cobre (mg/g) agrupando todos los tratamientos en los distintos órganos a través de los distintos estadios raleados, comparándolos entre ambos ciclos ensayados. Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Puede verse que en ambos ciclos se presentan valores similares de acumulación de Cu dentro de cada órgano, encontrándose al considerar el promedio general de ambos, diferencias entre las raíces y el resto de los órganos (valor $p < 0,0001$) ya que dentro del

órgano subterráneo se registró el máximo contenido (0,01837mg/g), seguidos por los tallos (0,008054 mg/g), luego por las espigas (0,007982mg/g), escoltadas por las hojas (0,006320mg/g) y finalmente con el mínimo dentro de las semillas (0,005861 mg/g). Destacándose este último valor, dado que poseen cantidades menores a los valores límites permitidos para su consumo por la FAO-OMS (1999), ya que el mismo de 0,04 mg/g, Dichos valores de prevalencia en la disposición no responden de la misma manera que lo reportado por Frayssinet y colaboradores (2023), quienes registraron valores levemente mayores en promedio dentro de las espigas seguidas por las hojas con una diferencia entre ambos de 0,0009 mg/g y finalmente los tallos con una brecha de 0,0014 mg/g respecto de los tallos.

Respecto a los resultados de la combinación del Si y Cu, hay ciertos trabajos que demuestran que ambas varían dentro de los diversos órganos, como así también que el Cu parece estar encapsulado en las estructuras de los fitolitos, siendo entonces un compartimiento significativo de acumulación de metal, presumiblemente a través de la encapsulación de diversos metales, estando entre ellos el Cu (Nowakowski y Nowakowska, 1997; Hernández-Apaolaza, 2014; Tran et al., 2019, Delplace et al., 2020; Lux et al., 2020). Pudiendo explicar dicha dinámica el escaso contenido de ambos elementos encontrado dentro de las semillas y su mayor detección entre el resto de los órganos analizados.

3.3.3.4. Concentración de cadmio

3.3.3.4.1. Ciclo de cultivo 2018

Los análisis estadísticos no evidencian efecto sobre el contenido de Cd detectado en los distintos tratamientos entre los diferentes estadios evaluados (Cuadro 3.7 en el

Apéndice). Por otro lado, al observar el gráfico del contenido de Cd en la planta a lo largo del ciclo y discriminado por órgano (Fig. 3.33) puede verse que los máximos se dan en los casos donde se ha detectado contenido de Cd dentro de las raíces, siendo únicamente las que recibieron Si dentro del estadio madurativo y las de Cd en estadio reproductivo y estadio madurativo, mientras que el resto no ha presentado valor detectable con la metodología utilizada. Al mismo tiempo puede verse que en todos los órganos han detectado las mismas concentraciones, siendo de 0,0012 mg/g.

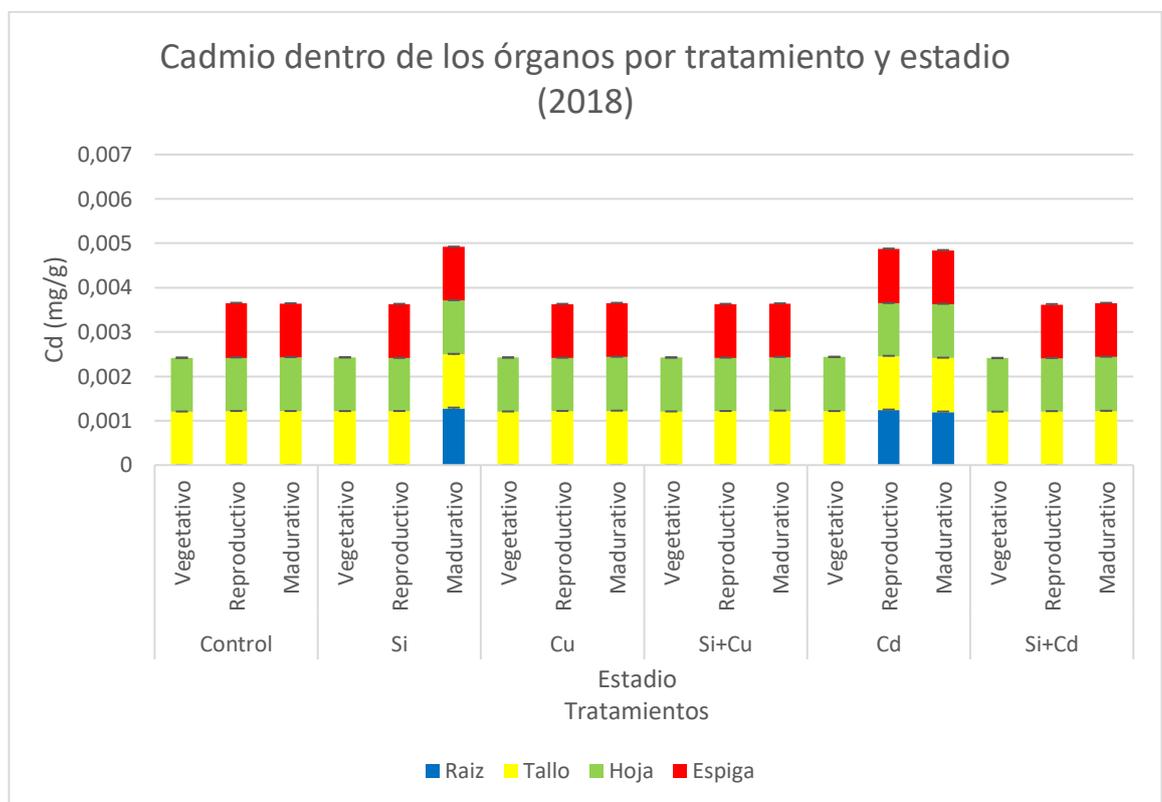


Figura 3.33: Concentración de cadmio (mg/g) por tratamiento en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Se observa que las concentraciones registradas en todos los órganos analizados a lo largo del ciclo completo rondan los 0,001 mg/g y que sus valores promedios para cada uno de los estadios evaluados han sido de 0,0012 mg/g, sin diferencia significativa alguna (valor $p = 0,0864$) (Fig. 3.34).

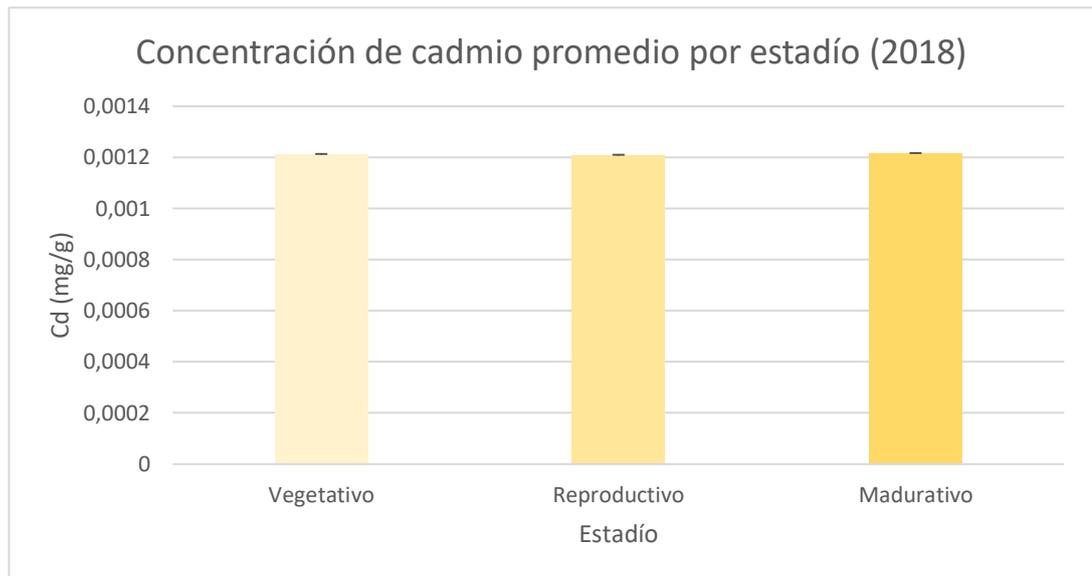


Figura 3.34: Concentración de cadmio (mg/g) promedio de todos los tratamiento en cada estadio analizado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Dado que la concentración de Cd no se vio afectada por los tratamientos aplicados (Fig. 3.33), procederemos a evaluar el patrón de deposición entre los órganos a través de los estadios donde se observa que son todos sumamente similares (Fig. 3.35).

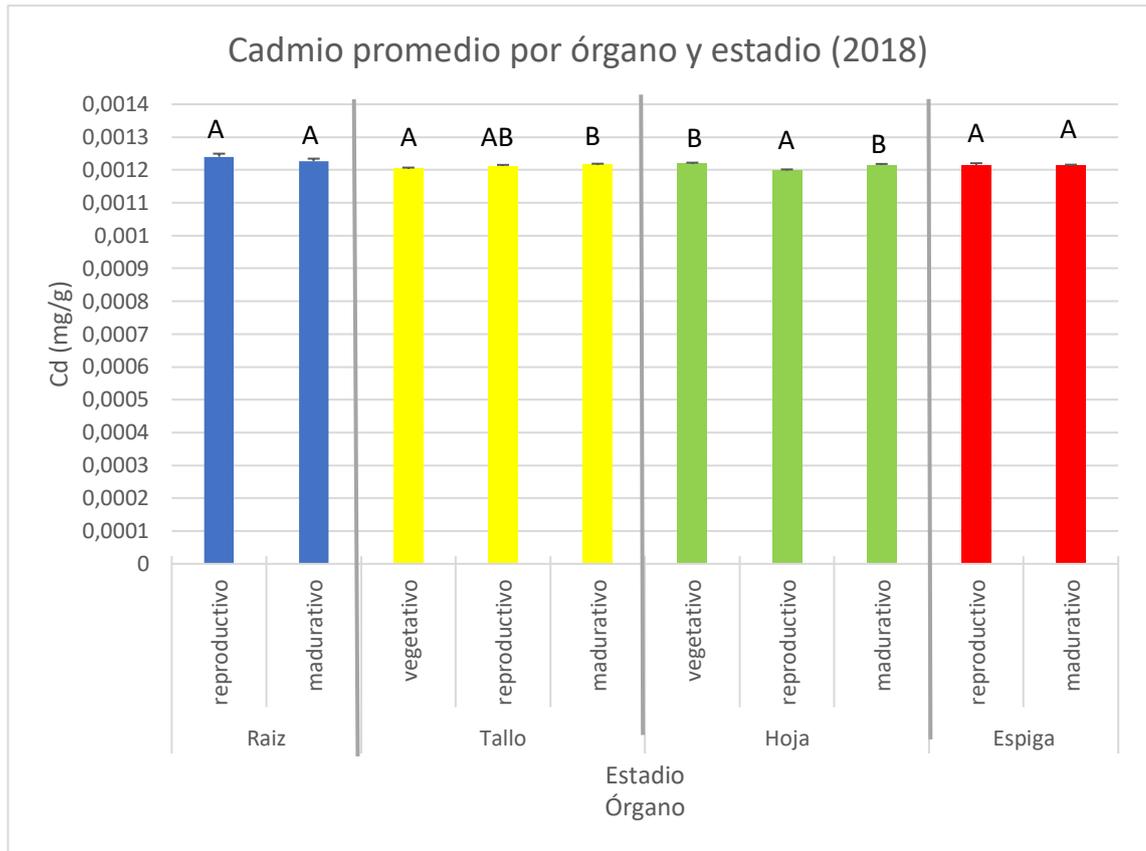


Figura 3.35: Concentración de cadmio (mg/g) agrupando todos los tratamientos en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018. Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Detallando en sus valores, dentro de las raíces se determinaron 0,00124 mg/g para el estadio reproductivo. y 0,00122 en estadio madurativo (valor $p = 0,8402$); mientras que los tallos han dado diferencias significativas (valor $p = 0,0055$) entre los estadios, siendo sus valores: 0,00120 mg/g en estadio vegetativo y luego 0,00121 mg/g para ambos restantes; por su parte las hojas se ha visto que presentan 0,00121 mg/g en estadio vegetativo y estadio madurativo, mientras que en estadio reproductivo lo hacen con 0,00119 mg/g (valor $p < 0,0001$); y finalmente las espigas conteniendo en ambos estadios 0,00121 mg/g (valor $p = 0,5477$).

3.3.3.4.1.2. Relación entre la concentración de silicio y cadmio

A continuación, evaluaremos si es que existe relación alguna entre la concentración promedio de Si y Cd, por órgano a lo largo de los distintos estadios muestreados dentro del 2018 (Fig. 3.36).

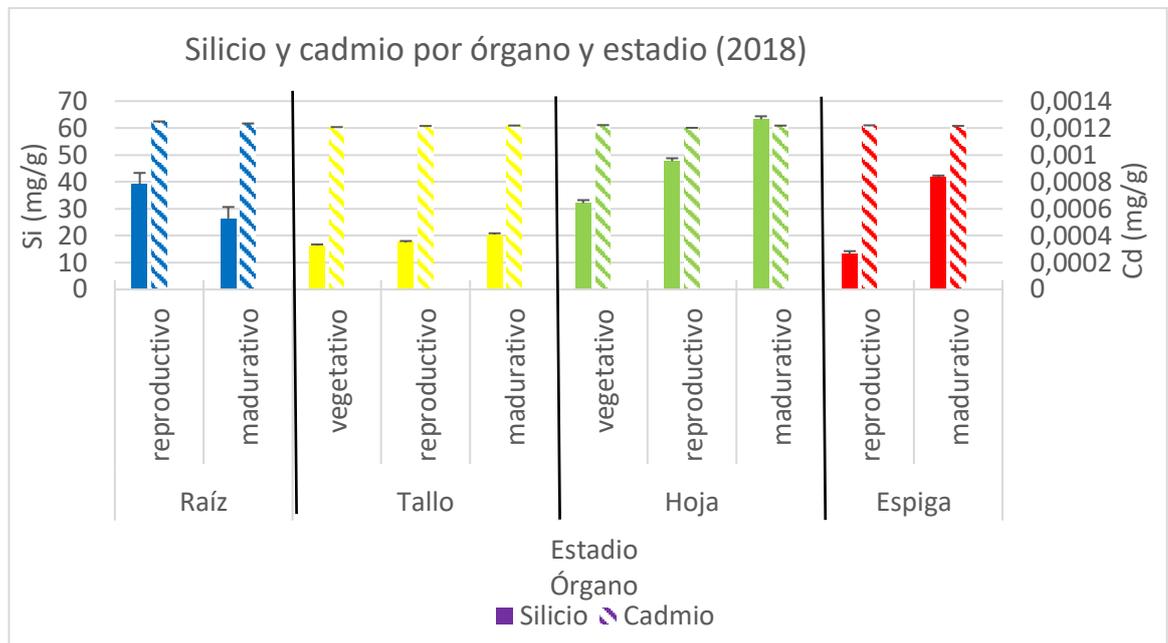


Figura 3.36: Concentraciones promedios de silicio (mg/g) y cadmio (mg/g) agrupando todos los tratamientos dentro de cada órgano evaluado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2018. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Puede verse que los valores de Cd han mostrado una variación prácticamente imperceptible a lo largo de este ciclo. Aun así, detallando en los valores previamente mencionados, se ha visto que las raíces disminuyen su contenido, al igual que las de Si; por su parte los tallos incrementan el contenido de ambos, mientras que las hojas acumulan más Si con el paso del tiempo mientras que respecto del Cd se han detectado los mismos valores para el estadio inicial y el final, pasando por una leve disminución en

el intermedio; y finalmente las espigas se han mantenido estables en su contenido por parte de Cd mientras que las de Si lo han incrementado.

Al observar los datos de Cd obtenidos durante el 2018 queda en claro que las cantidades registradas entre todos los órganos han sido las mínimas posibles con la metodología utilizada y quedando algunos por debajo de dicho límite de detección. Al observar la tendencia entre estadios queda claro que el aumento con el paso del tiempo ha sido lineal y producto de la suma de los órganos desarrollados con el correr del mismo. Al ver la acumulación por parte de estos, rondado los 0,0012 mg/g, las diferencias significativas encontradas con el test de Tukey, podrían ser despreciables al considerar la pequeñísima diferencia que los distingue, siendo seguramente imperceptibles sus efectos por parte de la fisiología vegetal del trigo.

3.3.3.4.1.3. Estadio madurativo

Al analizar los contenidos de Cd por gramo de planta analizado dentro de cada tratamiento en el estadio madurativo, puede verse que se encuentran dentro de un rango de 0,00121 mg/g a 0,00122 mg/g, sin diferencia significativa alguna (valor $p = 0,8644$) (Fig. 3.41).

Al analizar su deposición dentro de los órganos en este estadio final (Fig. 3.35) puede verse que sus valores disminuyen a medida que ascendemos a lo largo de la planta, mostrando valores de 0,0012267 mg/g para la raíz; 0,0012156 mg/g para los tallos; mientras que para las hojas 0,0012150 mg/g; y finalmente, 0,0012128 mg/g para las espigas, haciéndolo sin presentar diferencia significativa alguna (valor $p = 0,6238$).

3.3.3.4.2. Ciclo de cultivo 2019

Los análisis estadísticos no evidencian efecto sobre el contenido de Cd detectado en los distintos tratamientos entre los diferentes estadios evaluados (Cuadro 3.8 en el

Apéndice). Por otro lado, al observar la Fig. 3.37 puede verse la dinámica de acumulación de Cd para cada tratamiento por parte de los distintos órganos, donde se han detectado concentraciones superiores en el primer y último estadio respecto del intermedio, exceptuando únicamente al Control de dicho patrón. Al mismo tiempo se visualiza que el tratamiento de Cd es el único que no presenta su máximo en el estadio madurativo, sino que lo hace en el estadio vegetativo debido a las elevadas concentraciones detectadas dentro de su raíz para dicho momento. Por otro lado, puede verse que las espigas poseen más Cd en el último estadio respecto de su precedente y que las semillas son un órgano que ha acumulado cantidades importantes al finalizar el ciclo. Finalmente, las siguientes tendencias no responden de igual forma que el resto de todos los tratamientos: en raíces de los tratamientos que recibieron Cu y Cd presentan mayores a las del resto en estadio vegetativo; como así también los tallos de los tratamiento de Cd y Si+Cd al comparar con los restantes; y por último que las semillas del tratamiento de Si han mostrado cantidades menores de Cd, acumulación que también se ha visto disminuida en las plantas que recibieron Si+Cu, pero en este caso acercándose más a las cantidades mostradas por la mayoría de los tratamientos.

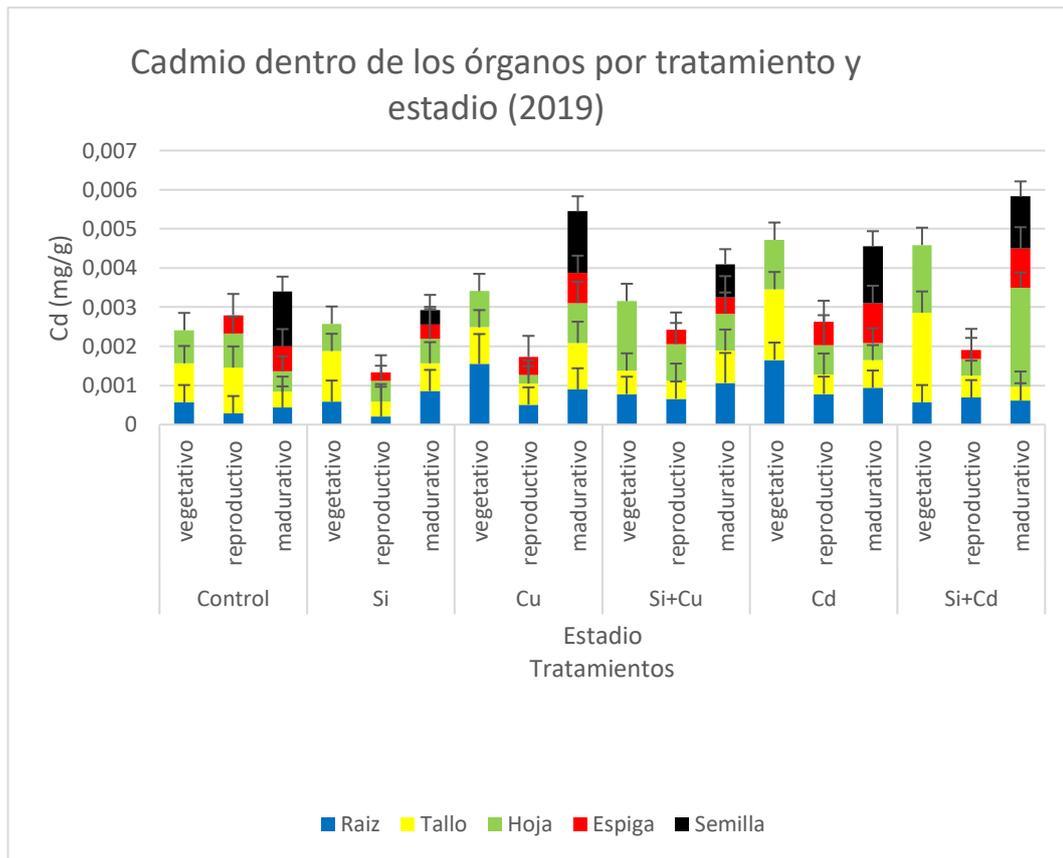


Figura 3.37: Concentraci3n de cadmio (mg/g) por tratamiento en cada estadio analizado y dentro de cada 6rgano evaluado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2019. Las barras verticales corresponden al error estandar de los valores medios obtenidos.

Al realizar el an6lisis estadístico respecto de la concentraci3n promedio del Cd entre estadios puede verse una diferencia significativa entre los estadios vegetativo (0,001132 mg/g) y estadio madurativo (0,000898 mg/g), respecto al reproductivo (0,000524 mg/g) (valor $p = 0,0001$ (Fig. 3.38)).

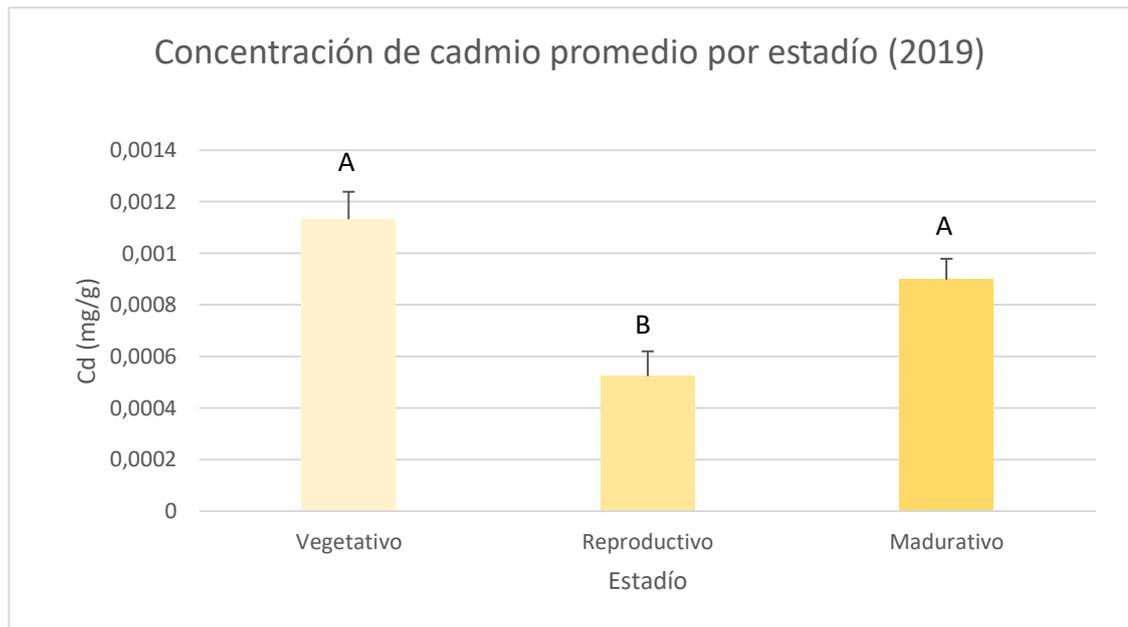


Figura 3.38: Concentración de cadmio (mg/g) promedio de todos los tratamientos en cada estadio analizados, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2019. Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

A continuación y con la finalidad de poder contar con información relevante acerca de la distribución del mismo en los distintos estadios se puede observar en la figura 3.39, que en 2 de todos los órganos analizados se han presentado diferencias significativas.

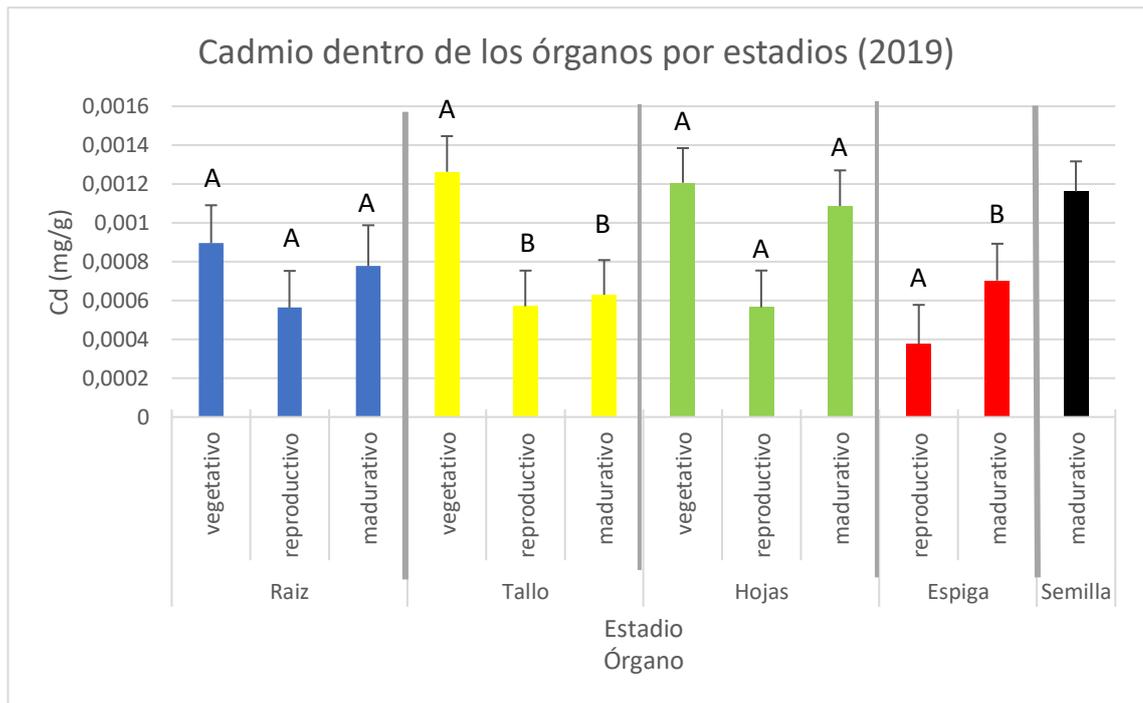


Figura 3.39: Concentración de cadmio (mg/g) agrupando todos los tratamientos en cada estadio analizado y dentro de cada órgano evaluado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2019. Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Puede verse que las raíces presentan su máximo en el estadio vegetativo su mínimo en estadio reproductivo y un valor intermedio en estadio madurativo (valor $p > 0,05$); luego los tallos presentan valores superiores en el primer estadio respecto de los dos siguientes (valor $p = 0,0059$); por su parte las hojas muestran valores máximos en estadio vegetativo, seguidos por estadio madurativo, habiendo disminuido a cerca de la mitad en el estadio reproductivo respecto de los anteriores (valor $p = 0,1931$); las espigas se ve que casi duplican su contenido (valor $p = 0,0134$); y finalmente tenemos las semillas con cantidades promedio de 0,001162 mg/g.

3.3.3.4.2.1. Relación entre la concentración de silicio y cadmio

A continuación, evaluaremos si es que existe relación alguna entre la concentración promedio de Si y Cd, por órgano a lo largo de los distintos estadios muestreados (Fig. 3.40).

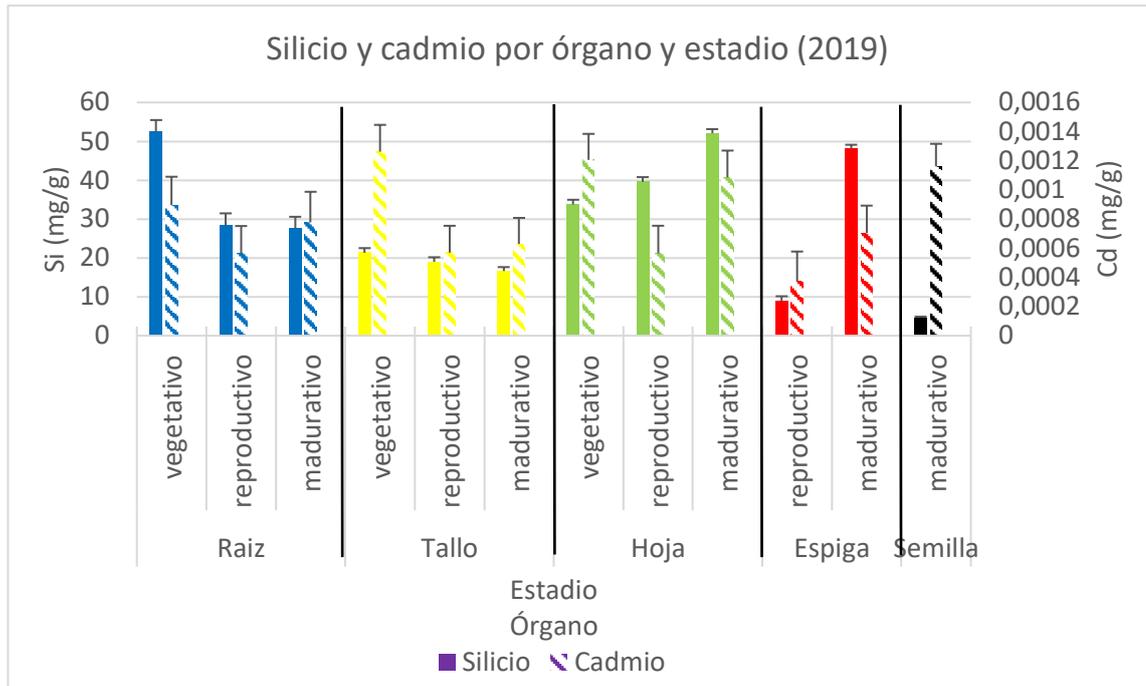


Figura 3.40: Concentraciones promedio de silicio (mg/g) y cadmio (mg/g) agrupando todos los tratamientos dentro de cada órgano evaluado, a lo largo del ciclo de cultivo desarrollado durante el 2019. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Se visualiza que en el órgano subterráneo y el tallo presentan similitudes entre las dinámicas de ambos elementos, finalizando quizás con un descenso un poco más marcados del Cd respecto del Si en el tallo. Las hojas presentan un incremento en la concentración de Si pero una disminución en el de Cd dentro del estadio reproductivo y finalizan el ciclo con contenidos menores en estadio madurativo respecto del vegetativo. Por su parte las espigas aumentan sus concentraciones de ambos elementos. Finalmente cabe destacar que las semillas presentan valores de Cd sumamente elevados y los menores de Si detectados. Esto puede tener relación con lo indicado por ciertos trabajos, que sugieren que la presencia de Si promueve la tolerancia de dicho elementos en por parte de las plantas (Liang et al., 2005; Shi et al., 2005; Guntzer et al., 2012; Greger et al., 2016; Naeem, 2018), proceso que en este caso se podría haber registrado de haber tenido mayores concentraciones de Si dentro de la semilla para que promuevan la distribución del Cd en otros órganos, con la finalidad de disminuir sus efectos negativos sobre las mismas.

3.3.3.4.2.2. Estadio madurativo

Al evaluar las concentraciones de Cd por tratamiento dentro del estadio final no se ha observado efecto significativo (valor $p = 0,2749$), mostrando valores en el rango de 0,000529 a 0,001218 mg/g (Fig. 3.41). Por otro lado, al ahondar en su patrón de alojamiento al momento de la cosecha, dentro de los órganos (Fig. 3.39) se ve que, sin presentar diferencia significativa alguna (valor $p = 0,2193$), son las semillas las que mayor contenido presentan (0,001162 mg/g), seguidas por las hojas (0,001086 mg/g), luego por las raíces y espigas (0,000777 y 0,000703 mg/g, respectivamente), finalizando con el menor contenido dentro de los tallos (0,000629 mg/g). Cabe destacarse que dicho contenido dentro de las semillas es elevado y estaría superando los valores límites establecidos para su consumo por la FAO y OMS (1999, siendo ellos 0,0002 y 0,0001 mg/g, respectivamente), impidiendo la deseada y correcta comercialización del mismo.

3.3.3.4.3. Comparación entre ambos ciclos

El evaluarse la concentración de Cd por parte de los tratamientos en el estadio madurativo entre ambos ciclos (Fig. 3.41), puede verse que los del ciclo 2018 presentaron valores mayores respecto del último ciclo ensayado, conteniendo 0,00121 mg/g y 0,00089 mg/g, respectivamente, pudiendo estar dichas diferencias explicadas por la menor superficie vegetal disponible, dado el menor crecimiento que han registrado las plantas del 2018, lo cual limita su capacidad de distribución dentro de la misma, quedando finalmente más concentradas las cantidades de Cd colectadas. Los valores aquí obtenidos se encuentran en cantidades similares a las registradas mundialmente (Huang et al., 2008; Gao y Grant, 2012; Corguinha et al., 2015; Payandeh et al., 2018; Lu et al., 2020), pero siendo ampliamente superiores a las halladas previamente en la zona (Frayssinet et al., 2023) donde se detectaron entre 0,00006 y 0,00008 mg/g. Dichas diferencias dentro de lo

registrado en el área, se deben a que en este trabajo se han aplicado concentraciones de dicho elemento, como así también, porque se ha considerado a las raíces, las cuales han presentado cantidades importantes de Cd en su interior.

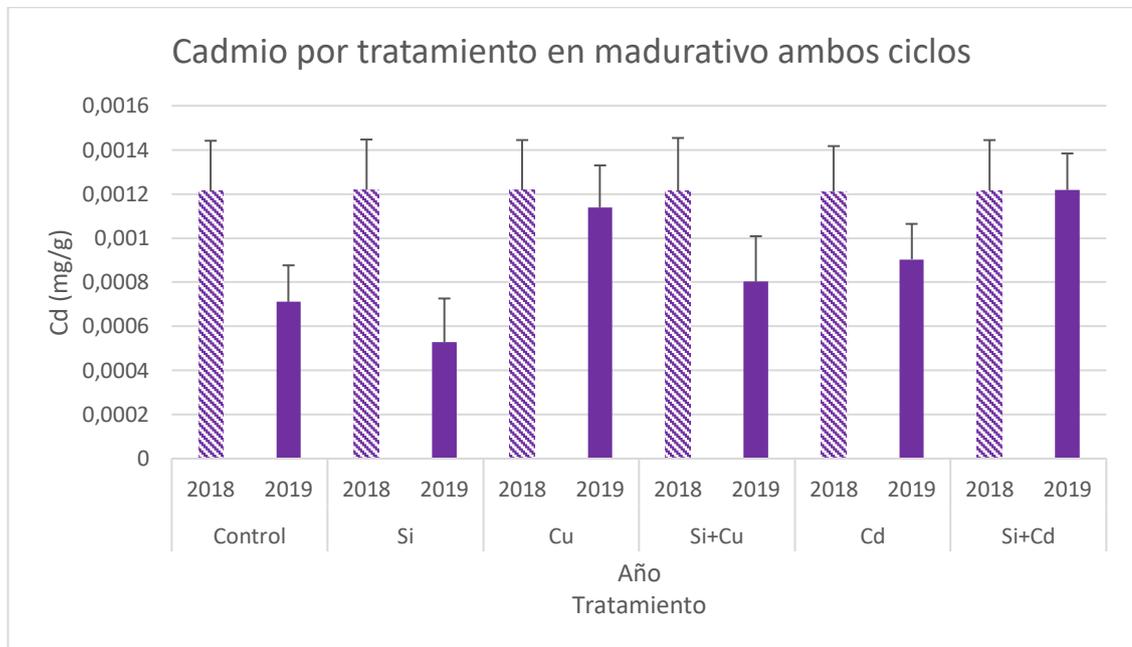


Figura 3.41: Concentración promedio de cadmio (mg/g) alojado en los distintos tratamientos dentro del estadio madurativo en ambos ciclos ensayados. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Al analizar la concentración dentro de los órganos a lo largo de ambos ciclos completos (Fig. 3.42) pueden verse ciertas diferencias y en algunos casos significativas.

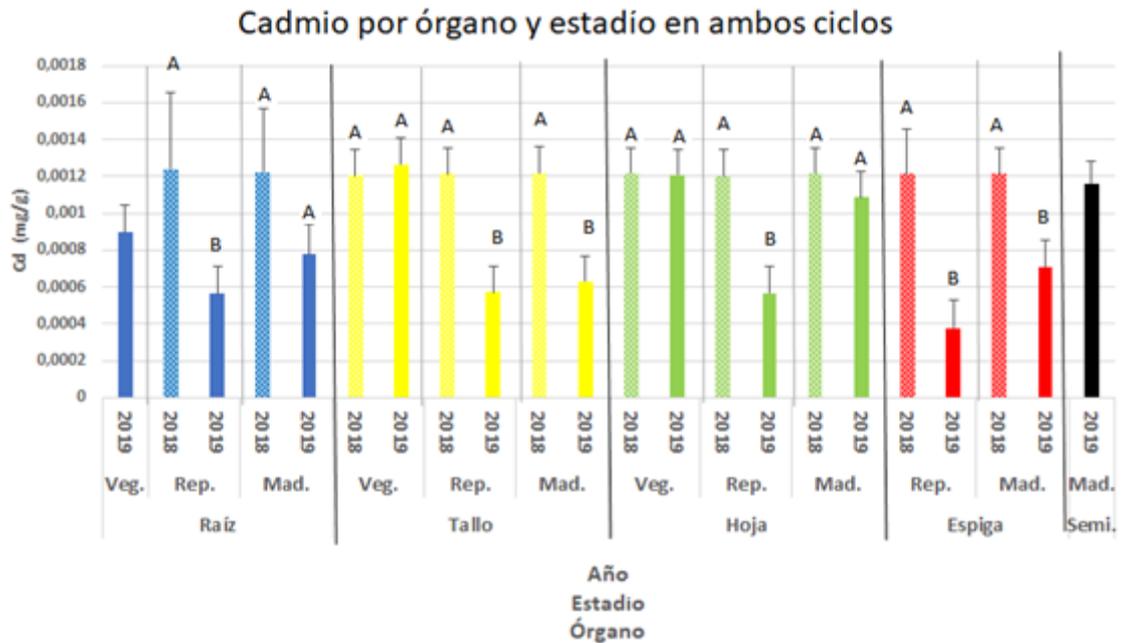


Figura 3.42: Concentración de cadmio (mg/g) agrupando todos los tratamientos en los distintos órganos analizados de la planta comparando ambos ciclos completos de desarrollo del cultivo. Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Las raíces han presentado cantidades considerables de Cd durante el estadio vegetativo del ciclo en que se han podido colectar (0,000895 mg/g); mientras que en los siguientes disminuyen su contenido, presentando mayores diferencias dentro del estadio reproductivo (valor $p=0,0216$) respecto del madurativo (valor $p = 0,1033$). Por su parte los tallos del estadio vegetativo son muy similares (valor $p = 0,7944$), pero las concentraciones de los siguientes caen, con diferencias significativas (valores $p < 0,0001$) siendo dicha brecha de 0,000642 mg/g para el estadio reproductivo y de 0,000587 mg/g en estadio madurativo. Las hojas en estadio vegetativo presentan valores similares (valor $p = 0,9519$), mientras que los del estadio reproductivo. caen de 0,001199 mg/g a 0,000565 mg/g (valor $p < 0,0001$) y las del estadio madurativo disminuyen levemente (valor $p=0,7337$); por su parte las espigas reducen en cantidades significativas (valores $p < 0,0001$), con diferencias de 0,000838 mg/g para el estadio reproductivo y de 0,000509 mg/g en estadio madurativo; y finalmente las semillas contienen cantidades importantes

(0,0011619 mg/g) en el ciclo en que se han desarrollado. Se destaca que los elementos detectados promedio en ambos ciclos al momento de la cosecha, son los determinados por lo detectado dentro del segundo, ya que fue el que presentó dinámica más variada, quedando el conjunto de los mismos con el siguiente orden creciente, raíz (0,00086 mg/g), tallo (0,00090 mg/g), espiga (0,00097 mg/g), hoja (0,00115 mg/g) y con el mayor contenido en las semillas (0,00116 mg/g), sin presentar diferencia significativa (valor $p = 0,3920$). Dichos valores de prevalencia en la disposición no responden de la misma manera que lo reportado por Frayssinet y colaboradores (2023), quienes han detectado valores levemente mayores en promedio dentro de las hojas seguida por los tallos con una diferencia entre ambos de 0,00000213 mg/g y finalmente las espigas con una brecha respecto de los tallos de: 0,00000687 mg/g.

Los resultados observados sustentan hipótesis que establecen relaciones con el Si pudiendo favorecer el proceso de rizofiltración. Se ha observado que las raíces de varias especies de plantas poseen una mayor proporción de Cd unido apoplásicamente y una menor simplásicamente debido a la aplicación de Si. Otros estudios, mencionan que el Si se deposita en la pared celular de la epidermis, exodermis, endodermis, periciclo y xilema, donde también ha sido localizado el Cd; como así también que existe una forma de Si que es responsable de la inhibición de la captación neta de Cd por un mecanismo de matriz de Si-hemicelulosa-complejación, y finalmente también por co-depositación (Feng et al., 2010; Colin, 2011; Rizwan, 2012; Rizwan et al., 2015; Wu et al., 2018; Delplace et al., 2020; Lux et al., 2020; Rahman et al., 2021; Wei et al., 2021) Por último y siendo sumamente importante, se debe considerar el elevado contenido detectado dentro de la semilla ya que a la hora de evaluar la calidad del grano para su comercialización, estaría superando los valores límites establecidos para su consumo por la FAO y OMS (1999,

siendo ellos 0,0002 y 0,0001mg/g, respectivamente), impidiendo la deseada y correcta comercialización del mismo.

3.3.4. Mineraloquímica, silicofitolitos y composición elemental

En todos los órganos analizado dentro del estadio madurativo de ambos ciclos se observó una considerable proporción de biomineralizaciones de sílice amorfo de restos de tejidos epidérmicos articulados, con una media del 35%, donde se destacan complejos estomáticos mayoritarios en hojas (Fig 3.43 a, e) y espigas (Fig 3.43 i, j, k); luego en tallos se hallaron en escasa cantidad (menor al 6%); los complejos estomáticos y elementos derivados del tejido de conducción articulados (Fig 3.43 b, o); y finalmente en raíces, se vieron placas perforadas de tejidos de conducción (Fig 3.43 m, n). Los morfotipos aislados estuvieron representados por células largas, como elongados crenados y lisos, abundantes en los tallos (30%), las hojas (24%) y las espigas (25%) (Fig 3.43 a, b, e). Dentro de las denominadas células cortas se hallaron los siguientes morfotipos: trapeziformes crenados y lisos, rondels, bilobados, tricomas y papilas. Los trapeziformes han sido preponderantes en hojas (> 20%,) que fueron seguidas por las espigas (7%);). Los rondels mostraron un rango de 5-14 % (Fig 3.43 a-e) y los bilobados fueron comunes (8% promedio), ambos en la epidermis de las hojas (Fig 3.43 g, h). Por últimos los tricomas prevalecieron en las espigas (15%,) mientras que las papilas se presentaron en promedio arrojando un 4% dentro de los diversos órganos analizados (Fig 3.43 c, d). Finalmente los tipos buliformes se observaron en hojas con porcentajes entre 3 y 5%, siendo esta morfología la única que se detectó en cantidades diferenciales entre ambos ciclos, estando los mayores contenidos presentes en las plantas del 2019. Este resultado, podría relacionarse con las menores precipitaciones en ese período dado que Meunier et al., (2017) han sugerido que las situaciones de estrés hídrico conducirían a un mayor desarrollo de estas biomineralizaciones.

Los resultados morfológicos previamente mencionados, se han presentado en todos los órganos analizados, exceptuando a las en semillas dado que ha sido imposible identificarlos debido a su disposición en agregados esféricos (Fig. 3.43 f). Dichos resultados coinciden en líneas generales con los morfotipos y cantidades definidos para el mismo cultivo por distintos autores a nivel internacional (Piperno, 2006; Meunier, 2008; Parr y Sullivan, 2011), así como también a nivel local (Benvenuto, 2017; Frayssinet et al., 2021).

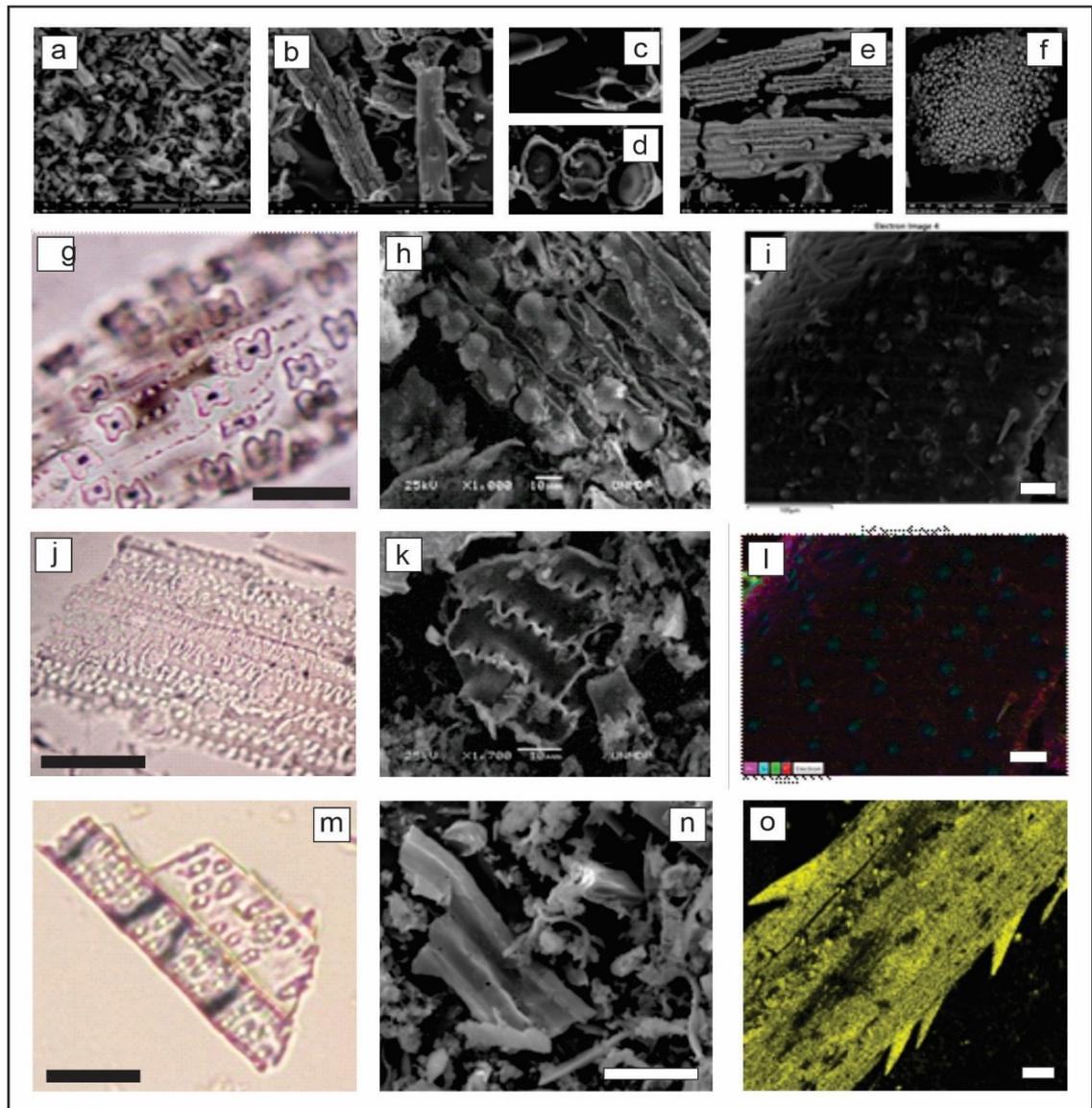


Figura 3.43: Imágenes de los SiF presentes en los distintos órganos de las plantas de trigo en estadio madurativo a) Cenizas de hoja calcinada (MEB), b) Cenizas de tallo calcinados (MEB), c-d) Espinas y papilas de espigas (MEB), e) Cenizas de epidermis de hoja calcinada (MEB), f) Semilla calcinada (MEB), g) SiF en epidermis de hoja (MOp), h) Detalle de g, con MEB, i) Epidermis de espiga (MEB), j) Epidermis de espiga (MOp) k) Detalle de j (MEB), l) Mapping de Si, O y C de i (MEB), m) Placas perforadas tejido de conducción de raíz (MOP), n) Detalle de m (MEB), o) Epidermis de tallo seco, mapping de Si (MEB).

Respecto de la caracterización elemental de los SiF analizados en los estadios madurativos de ambos ciclos, se definieron los elementos presentes en puntos específicos para el subsecuente análisis espectral a distintas magnificaciones (Fig. 3.43 i, l, o, y Fig. 3.44), obteniendo una estimación semicuantitativa, más detallada. Pudo estimarse un claro predominio de carbono (C), oxígeno (O) y Si, con porcentajes medios de los mismos entre 20 y 40% (Fig. 3.44 a-c). Además, se encontraron distintas proporciones Ca, sodio

(Na), cloro, potasio y Al con valores que oscilan entre 5 y 15 % (Fig. 3.44 d-f). Cabe destacar la presencia de P dentro de las semillas en altas proporciones, siendo cercanos al 10% (Fig. 3.44 h). Los MP encontrados fueron Fe, magnesio (Mg), Mn, Cu y Zn (Fig. 3.44 g, h)

Ahondando en los valores de Cu mediante el análisis mineraloquímico de los SiF para evaluar si es que existe relación alguna entre los mismos, se observaron valores sumamente escasos para todos los órganos, salvo para las raíces que han mostrado contenidos entre 1,5 y 6%, presentes en forma granular y compuestos por pequeños agregados irregulares a subsféricos (Fig. 3.44 g). Finalmente se detalla en el contenido detectado dentro de las semillas, dada su importancia como órgano consumible, donde se observaron distribuidos de modo aleatorio en la masa indefinida junto a los otros elementos como P, C, O, Si, entre otros (Fig. 3.44 h).

Respecto del Cd, puede decirse que no se detectó en ninguna de las más de 50 muestras analizadas mediante estas técnicas, aunque se estima que suele aparecer adosado o enmascarado por níquel. Dada la toxicidad de este elemento se consideró interesante ampliar los estudios con equipos y técnicas que puedan detectar pequeñas cantidades del elemento y su ubicación dentro de los órganos. Con tal objetivo se realizó de modo exploratorio un análisis de SiF en muestras de cenizas mediante espectroscopía Raman (Fig. 3.44 i-k). Exploración que arrojó resultados positivos según lo definido por Sócrates (2004), estando en general dichos resultados determinados por las frecuencias de bandas, las cuales se expresan en cm^{-1} , siendo los mismos para el Si de $562\text{-}1093\text{ cm}^{-1}$; para el Ca con un pico en 414 cm^{-1} ; para los residuos orgánicos con picos $1352\text{-}1602\text{ cm}^{-1}$; para el Cd con pico en 228 cm^{-1} y finalmente para el Cu en los 500 cm^{-1} . Como puede verse en la figura 3.44 k, dicha técnica de medición ha sido exitosa para determinar la presencia de los mismos en las muestras analizadas.

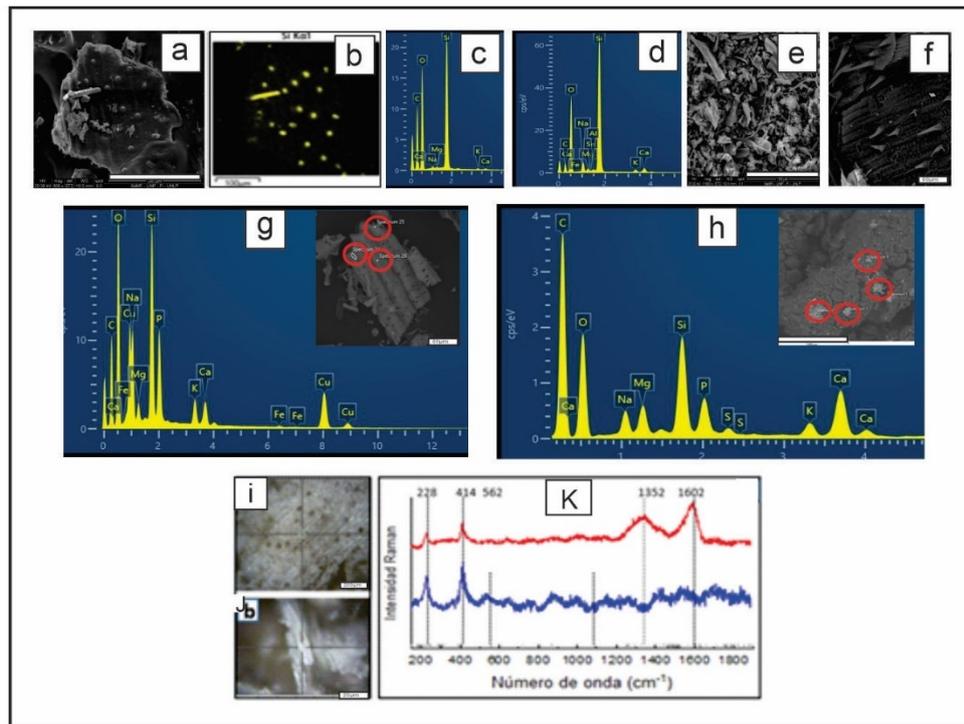


Figura 3.44: Análisis mineraloquímico de SiF, mediante MEB, EDS, y espectroscopía Raman. a) Mapping de tejido epidérmico de espiga (MEB), b) Detalle de a (MEB), c) Espectro de espiga de a y b (MEB), d) Espectro de epidermis de tallo (MEB), e) Tallo en muestra seca (MEB), f) Ceniza de semilla (MEB), g) Espectro e imagen de epidermis de raíz (EDS-MEB), h) Espectro e imagen de semilla (EDS-MEB), i) Tejido epidérmico de raíz (Espectro Raman), j) Silicofitolitos (SiF) epidermis de hoja (Espectro Raman), K) espectros Raman: línea roja de i) y línea azul de j).

Dichos resultados, sustentarían lo explicado por algunos autores acerca de la posibilidad que poseen los SiF de secuestrar MP, siendo relevante a la hora de considerar posibles fitorremediaciones (Zancajo et al., 2019; Vaculik et al 2020; Liu et al., 2022). Dicho proceso posibilitaría la venta del órgano de consumo dentro del mercado respetando los requisitos sanitarios correspondientes.

Utilizando la técnica Raman, se han podido obtener resultados promisorios a la hora de querer detectar cantidades de elementos traza, aportando al mismo tiempo a la ubicación más precisa de los mismos dentro de los diversos órganos analizados (Zancajo et al., 2019). Considerando que aún se conoce muy poco acerca de los procesos que consideran al Si y su eficiencia como elemento fitorremediador es evidente la necesidad

de realizar mayores experimentaciones con esta escala de análisis detallado, para verificar que los SiF realmente potenciarían dichos beneficios.

Finalmente y sabiendo la estrecha relación existente entre planta y suelo, se debe considerar su incorporación al suelo luego de finalizado el ciclo del cultivo que los contiene (Parr y Sullivan, 2011; Guntzer et al., 2012; Rizwan, 2012). En este aspecto debe tenerse en cuenta que los SiF más delgados son más susceptibles de degradarse rápidamente por los distintos procesos tafonómicos propios de los procesos pedológicos, los cuales disponibilizarían los contenidos de MP dentro del mismo (Osterrieth et al, 2009; Borrelli et al 2008, 2010; Thu et al., 2019; Schreck et al., 2020). Por lo tanto, sería muy útil realizar esfuerzos mediante estudios interdisciplinarios, dada la alta rotación dinámica de los elementos en la interacción planta-suelo, ya que pueden funcionar como factores que posibilitan la fitorremediación pero debiendo al mismo tiempo considerarse su efecto de liberación de los MP ante la degradación de los mismos para finalmente neutralizarla y que ejerza un rol netamente benéfico.

3.4. Conclusiones

La variedad de trigo Baguette 501 se ha desarrollado bajo condiciones climáticas adecuadas. Durante el primer ciclo no se han podido desarrollar las semillas debido a la elevada competencia entre las plantas desarrolladas, viéndose dicha situación revertida al disminuir en un 50% la densidad de siembra para el siguiente ciclo.

Comparando las alturas entre ciclos se observa que en 2019 las plantas midieron 10 cm más aproximadamente respecto de las analizadas en 2018, pudiendo deberse dichas diferencias a una disminución del 50% en la cantidad de semillas sembradas.

Los valores acumulados de Si se ve que aumentan con el paso del tiempo en ambos ciclos y su dinámica de deposición dentro de los diversos órganos ha mostrado ser similar

entre los dos años evaluados. Al mismo tiempo las plantas dentro del estadio final del primer ciclo han contenido mayores concentraciones de Si que las del segundo, pudiendo dicho resultado verse explicado por la menor altura y por ende, menor área disponible para su distribución. Finalmente, cabe desatacar que las semillas fueron el órgano que menor contenido de Si por gramo de planta arrojó.

Dentro del macronutriente evaluado (P), se visualizaron contenidos acumulados sumamente parejos entre el estadio vegetativo y madurativo dentro de ambos ciclos. Al mismo tiempo, presentó patrones de deposición similares entre los dos ciclos ensayados, siendo opuestos a los del Si en los órganos aéreos para ambos casos y destacándose que las semillas fueron el órgano que mayor contenido de P por gramo de planta arrojó. Continuando con dicha tendencia entre ambos elementos, puede verse que sus registros al finalizar el ciclo han sido mayores en el segundo ciclo respecto del primero. Dicho aumento puede deberse a que el cultivo absorbió más de este macronutriente necesario para su correcto desarrollo y depositándolo en las semillas. Finalmente, la relación opuesta entre el Si y el P, aquí encontrada sustenta la información provista por escasos trabajos a nivel mundial, acerca de su similitud en las propiedades químicas y los comportamientos contrapuestos registrados para ambos elementos.

Respecto de los valores del micronutriente Cu se visualizó un contenido total acumulado con aumentos desde el estadio vegetativo hasta el madurativo, presentando valores similares de concentración dentro de cada órgano y en ambos ciclos. Sus valores promedio en el estadio final del ciclo han sido mayores en 2018 respecto al 2019, pudiendo estar en este caso explicados por la modificación en la densidad de siembra y su consecuente distribución dentro de la superficie vegetal desarrollada. En cuanto a los patrones de acumulación del Cu y Si, se ha visto que durante el primer ciclo han mostrado ser inversos para todos los órganos, pero que dentro del segundo presentan dinámicas

variables. Por otro lado, cabe destacarse su elevado contenido dentro de las raíces, ejerciendo quizás un rol de rizofiltradoras para no superar los valores umbrales de dicho micronutriente y evitar consecuentemente los efectos tóxicos sobre el cultivo. Finalmente, se resalta que al considerar las semillas puede verse que responden de manera similar a lo observado con el Si, dado que son los valores más bajos detectados en los diversos órganos, implicando posibles efectos benéficos por parte del Si y logrando que los valores de Cu no superen los límites permitidos por la FAO y OMS (1999), posibilitando así su comercialización en el mercado mundial.

Considerando un elemento tóxico como el Cd se ha visto que el contenido total acumulado ha sido mayor en el estadio madurativo respecto del vegetativo. Al mismo tiempo, se han registrado concentraciones mayores al finalizar el primer ciclo respecto del segundo, estando probablemente explicado por la diferencia en la densidad de siembra previamente mencionada. Los patrones de acumulación fueron prácticamente similares en todos los órganos desarrollados en el primer ciclo, mientras que en el último la dinámica ha sido más variada, destacándose sus concentraciones dentro de las semillas en el madurativo. Respecto a su relación con el patrón de Si, se ha visto que raíces, tallos y espigas presentan dinámicas con valores elevados y similares, mientras que las hojas lo hacen a la inversa. Analizando el contenido de ambos dentro del órgano subterráneo puede decirse que se estaría favoreciendo el proceso de rizofiltración por parte del Si. Respecto a su contenido dentro de las semillas pudo detectarse el mínimo de Si y el máximo de Cd, lo cual podría estar explicado por procesos diversos fisiológicos. Cabe mencionar que dichos valores de Cd están superando las concentraciones permitidas para su consumo por la FAO-OMS (1999), dejando a los mismos fuera de la posibilidad de ser ofrecidos para satisfacer la importante demanda mundial.

Los SiF han presentado morfologías definidas robustas, bien mineralizadas y compactas, que al haber sido analizados a nivel submicroscópico y elemental han presentado predominio de C, Si, O como elementos mayoritarios. En algunos casos se han presentado también contenidos de P, Al, Ca, potasio, Na, y en menor proporción MP encontrándose dentro de ellos y de manera aleatoria al Fe, Zn, Mg, Mn, Cu, y níquel. Por su parte, el Cd no se halló mediante estudios submicroscópicos, pero si se detectó junto al Cu mediante espectroscopia Raman. Observando que los contenidos promedios de Si han sido de 35mg/g y estando dicha fracción formada esencialmente por silicofitolitos, arribamos a la idea del potencial aporte de sus efectos benéficos. Consecuentemente sería útil promover su aplicación a través de un manejo adecuado, considerando la posible fitorremediación a través de los mismos y más aún al considerar que los contenidos totales acumulados de Si, Cu y Cd han aumentado a lo largo de los estadios fenológicos evaluados.

Evaluando los posibles aumentos de Si, P, Cu y Cd en la biomasa vegetal puede verse que los resultados obtenidos, no nos han permitido sustentar que la adición de Si incrementa la concentración de los mismos al finalizar el ciclo.

Finalmente, cabe destacar que probar con mayores dosis y/o frecuencias de las aplicaciones, podría permitir que se visualicen más claramente algunos de los efectos positivos del Si con la regulación de los elementos evaluados, redundando en un mejor desarrollo del ciclo de cultivo de trigo que es de suma importancia a nivel nacional y mundial.

Capítulo 4. Efectos sobre el horizonte A de los Argiudoles de los distintos tratamientos: relaciones entre la concentración de silicio, fósforo y metales pesados, y sus posibles asociaciones con los silicofitolitos

4.1. Introducción

4.1.1. Silicio y su rol en los suelos

El Si se presenta formando parte del complejo sistema suelo y por ello sus contenidos y disponibilidad dependen de todos los procesos y características que lo generan. Entre ellos pueden mencionarse las adiciones, transformaciones, transferencias y pérdidas (Simonson, 1959); como así también las características físicas, químicas, mineralógicas y biológicas. Además, pueden influir en este elemento los diversos usos y manejos a los que estén sujetos los mismos por la actividad antrópica.

Las características físicas de los suelos son el resultado directo de la pedogénesis e interacción de los procesos biogeoquímicos superficiales y esenciales en todos los ambientes (Simonson, 1959). Particularmente, la textura, la densidad aparente (DAP) y la resistencia mecánica (RM) son condicionantes de la porosidad, infiltración, translocación y dinámica del agua, entre otros. Dichas propiedades, al combinarse con los componentes biogeoquímicos van a condicionar el desarrollo de agregados y consecuentemente de la estructura del suelo, teniendo efecto finalmente en la economía del agua y aire, el desarrollo y elongación de las raíces, la fertilidad, los procesos de migración, lixiviación y traslocación de los diversos componentes tanto en la solución como en la matriz del suelo, entre otros (Matichenkov et al., 1995; Matichenkov y

Bocharnikova, 2001; Ma y Takahashi, 2002; Fishkis et al., 2010; Struyf y Conley, 2012; Osterrieth et al., 2014, 2015; Liu et al., 2019).

En el capítulo anterior se detalló la importancia y esencialidad del Si dentro de las plantas, como así también de los SiF que las mismas producen, comenzando dicho proceso a través de la absorción del Si disponible en la solución del suelo, en forma de H_4SiO_4 , por parte de las raíces. Los estudios biogeoquímicos del Si han comenzado desde finales del siglo XX y se han profundizado en los ambientes continentales a lo largo de los últimos años (Bartoli y Wilding, 1980; Conley 2002; Sommer et al., 2006; Basile-Doelsch, 2006; Osterrieth, 2006; Struyf y Conley, 2009; Borrelli et al., 2010; Osterrieth et al., 2015). Se ha reportado que el mismo se encuentra presente en el suelo, no solo en sus variedades monosilícico o polisilícico, sino que también pueden polimerizarse para formar cadenas de alto peso molecular; formar parte de geles de sílice amorfo y/o compuestos organominerales y/o pasar a los sistemas ácuos (ríos, arroyos, mares y aguas subterráneas). Los mencionados compuestos de Si migran en el perfil del suelo, formando compuestos de variable solubilidad los cuales afectan las propiedades morfológicas, físicas y biogeoquímicas del mismo (Basile-Doelsch, 2006; Fraysse et al., 2006; Meunier et al., 2008; Osterrieth et al., 2014, 2015; Tubaña et al., 2016; Frayssinet et al., 2021; Borrelli et al., 2023).

En los suelos cultivados, se resalta el uso de agroquímicos para poder alcanzar los rendimientos esperados con la finalidad de satisfacer la demanda mundial de alimentos, pudiéndose mencionar entre ellos a los fertilizantes que se aplican con el objetivo de proveer macronutrientes (N, P, K, entre otros) como así también de los biocidas con el fin de eliminar microorganismos patógenos, insectos y malezas. Respecto a dichas aplicaciones cabe resaltar que han sido y continúan siendo, una de las principales fuentes de contaminación y deterioro de sus sistemas ácuos dado que aportan a los suelos tóxicos

orgánicos, metales pesados (Cu, Cd, Zn) y sólidos suspendidos, entre otros (Giuffrè de Lopez-Camelo et al., 1997; Tilman et al., 2002; Lavado et al., 2004; Furcal-Beriguete y Herrera-Barrantes, 2013; Grant et al., 2013). Los agroquímicos afectan el bienestar de los ecosistemas y la calidad de la biota, incluyendo a los grupos humanos, siendo sumamente necesario contar con buenas prácticas de manejo para evitar el arribo a las consecuencias negativas previamente mencionadas.

La aplicación del silicio podría ser una herramienta válida para mitigar algunos de los efectos no deseados, productos de la actividad agrícola. Muchos estudios han indicado que los beneficios logrados con el adecuado aporte de Si, en aquellos cultivos que lo requieren, permiten restaurar la fertilidad, elevar la capacidad de intercambio catiónica, interactuar con numerosos elementos como Al, P, Fe, Mg, Ca, Mn y diversos MP (Cd, Pb, Cu, Cr, etc.), mejorar y preservar las propiedades morfológicas y físicas de los suelos, entre otros (Pecorari et al., 1990; Epstein, 1999; Cosentino y Pecorari, 2002; Basile-Doelsch 2006; Osterrieth, 2006; Struyf y Conley, 2009, 2012; Furcal-Beriguete y Herrera-Barrantes, 2013; Heredia y Fernández Cirelli, 2008; Alvarez y Osterrieth, 2018). Por ejemplo, Matichenkov y Bocharnikova (2001), han detectado interacciones entre el Si y el P en el suelo, indicando que el anión del ácido monosilícico podría reemplazar al anión fosfato de los compuestos que se encuentran adsorbidos al complejo de cambio. De esta forma, el anión fosfato sería desorbido, incrementando la concentración de P en la solución del suelo, quedando disponible para ser tomado por las plantas sin haber sido necesaria la aplicación de dicho elemento como parte del paquete de agroquímicos.

Al considerar los efectos dentro de los agroecosistemas sobre la dinámica del Si dentro de los suelos, se ha reportado que la cosecha de los cultivos genera una extracción anual de dicho elemento de entre 200 a más de 500 millones de toneladas a escala global (Datnoff et al., 2001; Meunier et al 2008; Guntzer et al., 2012; Vandevenne et al., 2012;

Haynes, 2014; Tubaña et al., 2015). En este aspecto, debe destacarse que los SiF son una de las fuentes principales de Si a la solución del suelo. Los mismos se incorporan al suelo una vez que los órganos de las plantas senescen, pasando a ser constituyentes de la fracción esquelética y la matriz del mismo, teniendo un rol relevante los procesos tafonómicos y en la mineralogía total del suelo. Dicha relación ha dado lugar a estudios sumamente interesantes desde diversas áreas como paleobotánica, paleoecología, arqueología entre otras, en el marco de la interacción planta-suelo que las caracteriza (Rovner, 1971; Twiss et al., 1969; Bartoli y Souchier, 1978; Fredlund y Tieszen, 1997; Alexandre et al., 1997; Piperno, 2006; Osterrieth et al., 2016), permitiendo generar conocimientos a nivel paleoambiental. Como se ha mencionado acerca de la disponibilidad de Si en la solución del suelo los SiF cumple un rol preponderante ya que poseen una tasa de disolución tres a seis veces mayor que la de los minerales silíceos no biogénicos (Alexandre et al., 1997; Osterrieth, 2006; Borrelli et al., 2010; Osterrieth et al., 2009, 2015). En este aspecto, cabe resaltar que los SiF presentan en particular, una estructura interna nano esférica, de alta reactividad y que dicha superficie específica podría asociarse con los estudios que indican que los mismos permiten la adsorción de macro, micronutrientes y MP en su composición (Frayssinet et al., 2023). Dicha adsorción nos permite categorizarlos como fuente o sumidero de metales, contribuyendo así con la incorporación o extracción de los mismos dentro de los suelos (Greger et al., 2011; Ma y Takahashi, 2002; Liang et al., 2005; Guntzer et al., 2012; Greger y Landberg, 2015; Schreck et al., 2020; Vaculik et al., 2020; Frayssinet et al., 2021; Liu et al., 2019; 2022, 2023). Por ende, la pérdida de dichos volúmenes de Si es que torna sumamente relevante y debe planificarse el manejo equilibrado de los mismos, para no tener que lidiar con la ausencia de los beneficios tanto físicos como químicos que el Si y los SiF brindan a este sistema. Conociendo estos impactos benéficos, es que se lo ha reconocido como un

“elemento agronómicamente esencial”, debiendo el mismo ser considerado por parte de los productores para su aplicación dentro del agroecosistema (Datnoff et al., 2001; Korndorfer et al., 2004; Ma y Yamaji, 2006; Liang et al., 2007; Meunier et al., 2008; Heckman, 2013; Wuang et al., 2019; Manivannan et al., 2023). El uso de fertilizantes silicatados no es muy común a nivel mundial, aplicándose mayoritariamente en suelos generalmente muy meteorizados, ricos en óxidos y deficientes en su contenido de Si disponible en la solución del suelo, encontrándose entre ellos ciertos lugares de India, Brasil, Sudáfrica y Estados Unidos, entre otros (Datnoff et al., 2001; Korndorfer et al., 2004; Laing et al., 2006; Agostinho et al., 2017; Prakash et al., 2018). Por su parte, en los suelos de la Argentina son casi inexistentes las aplicaciones de Si, lo cual redundaría en una probable ausencia de los numerosos beneficios que se sabe el mismo puede brindar al complejo sistema suelo.

Como se ha mencionado, dentro del país existe muy poca información donde solo se destacan algunos trabajos que han abordado el contenido de Si o de SiF dentro de los suelos. Entre ellos pueden mencionarse los que han analizado el epipedón mólico de los Argiudoles de la Llanura pampeana, donde se definieron los contenidos de Si y SiF tanto en suelos prístinos como dentro de agroecosistemas. Para los primeros registraron valores promedio de 58 mg/L de Si y de 65 toneladas por hectárea (tn /ha) de SiF como parte de la biomasa vegetal producida, mientras que en los suelos cultivados los valores fueron de 42 mg/L y de 90 tn/ha, respectivamente (Frayssinet et al., 2021). Otros trabajos, observaron diferencias en los contenidos de Si en la solución del suelo en función de las variaciones texturales intraperfil al comparar los suelos predominantes de los agroecosistemas pampeanos (Chirkes et al., 2018; Erpelding, 2018). Por otro lado, y en estrecha relación con la presencia de Si en las fases sólidas y líquidas de los suelos, se destacan los contenidos de Si en aguas superficiales (Miretzky et al., 2001) y los altos

tenores en aguas subterráneas del acuífero pampeano relacionado a la mineralogía de las zonas saturadas y no saturadas, con sustanciales aportes de la sílice amorfa inorgánica y biogénica (Martínez y Osterrieth 1999; Borrelli et al., 2023). Estos procesos condicionados por la compleja biogeoquímica del ambiente, tendrán notable impacto en los agroecosistemas y más aún al considerar la vasta producción de cultivos desarrollados en el SE de la llanura pampeana. Dentro de esta área, es relevante el desplazamiento y/o intensificación de la actividad ganadera, consecuencia del explosivo crecimiento de la superficie destinada a la agricultura con simplificación de rotaciones. Dicho cambio en el uso de las tierras ha potenciado el nivel de degradación de los suelos de la región pampeana a lo largo de los últimos años, básicamente por incrementos en el contenido de MP, consecuencia de la aplicación tan intensa de agroquímicos; como así también por las disminuciones en los contenidos de nutrientes y materia orgánica, asociadas al deterioro de la estabilidad estructural, entre otros (Poblet et al., 1994; Quiroga et al., 1996; Alvarez et al., 2001; Bernardos et al., 2001; Hevia et al., 2003; Sparks, 2003; Sasal et al., 2006; Ciarlo et al., 2020).

Por lo expuesto, se debe considerar que las dinámicas del Si y los SiF condicionan y se ven condicionados por los procesos físicos, químicos y mineralógicos anteriormente mencionados, como así también por la mayoría de las actividades y distintos manejos que se realizan en los agroecosistemas de los suelos altamente productivos del país. Consecuentemente, es cada vez más relevante la realización de trabajos que busquen comprender las consecuencias de la aplicación de Si cuando es usado para remediar o disminuir los efectos negativos en dichos agroecosistemas. Se pretende abordar el déficit de información a lo largo de este capítulo, mediante el aporte de datos básicos para contribuir a su posible rol dentro de la conservación de los suelos, evaluando si es que el aumento en el contenido de Si en los suelos incrementa la disponibilidad de nutrientes y

metales pesados para ser capturados por la planta, disminuyendo así su contenido en solución al finalizar el ciclo.

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. Características generales del área de estudio

Los suelos analizados corresponden a la Serie Mar del Plata y son Argiudoles típicos formados a partir de sedimentos loésicos Pleistoceno tardío-Holoceno. Se caracterizan por ser muy oscuros, profundos, bien desarrollados, bien drenados, francos limosos a limosos, no salinos, no alcalinos, con escurrimiento medio, permeabilidad moderada, nivel freático profundo, con valores medios en su horizonte superficial de 5,2% de materia orgánica, 3% de C total, 0,25% nitrógeno total, 0,18% de P total; con pH levemente ácido (5,8 a 6,4) y desarrollados en pendientes de 1 a 3%. Sus características texturales poseen valores medios de 14% de arcillas, 56% de limos y 30% de arenas. Finalmente, su capacidad de uso es IIe con limitaciones debido a la pendiente, lo cual le otorga peligro ligero de erosión hídrica (INTA, 2020).

El ensayo se ubicó en la denominada “manzana Segura”, que en un principio fue parque de una quinta privada y luego fue adquirida por la UNMdP. Los suelos en estas parcelas, por encontrarse incluidos dentro del ejido urbano, se denominan como misceláneos, pudiendo considerarse prístinos, motivo por el cual fue seleccionado para realizar el ensayo. El sector elegido tenía cobertura de gramíneas y asteráceas al momento del iniciar el ensayo, propias de un parque natural. Esta vegetación fue eliminada previo a la siembra, dejándose el suelo desnudo al momento de la siembra en todos los tubos, con la finalidad de recrear las prácticas sustentables realizadas en la zona. Al ser estos suelos altamente productivos, es que se optó por estudiar el epipedón mólico (0-5cm; 5-

15cm y 15-23cm) (Fig. 4.1), dado que comprende el horizonte A completo y es un sector de relevancia en términos agrícolas.

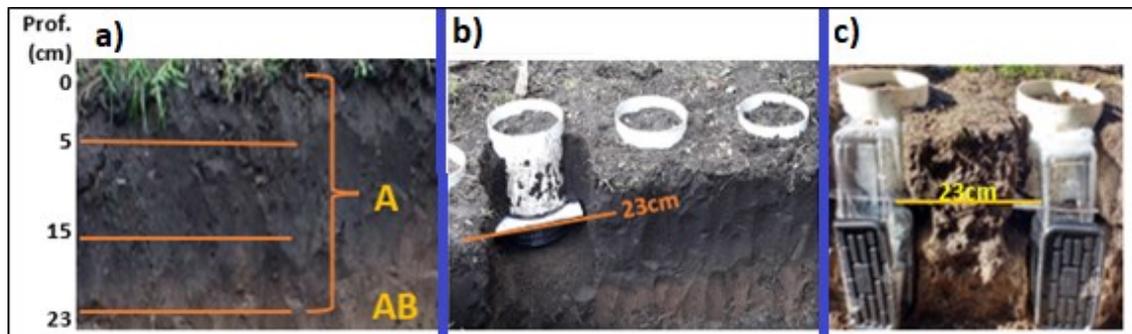


Figura 4.1: Imágenes del epipedón mólico. a) Se observa el perfil previo a la colocación de los tubos indicando los niveles de muestreo dentro del mismo, b) Se ve dicho perfil con los tubos incorporados y c) Se observa el perfil analizado con los tubos y las protecciones correspondientes para su muestreo.

4.2.2. Determinación de características morfológicas

Se realizó la caracterización morfológica de las muestras de epipedones mólicos de Argiúdoles típicos seleccionados según lo establecido por Soil Survey Staff (2014).

4.2.3. Metodologías de muestreo de las soluciones del suelo

En este trabajo se han utilizado dos metodologías distintas para la obtención de la solución del suelo a evaluar. La selección del método adecuado para un objetivo específico no es simple, ya que ninguno es universal y todos ellos presentan ventajas y limitaciones que hay que considerar al momento de tomar la decisión, sabiendo que existen hoy día muchos métodos y procedimientos para medir el contenido de agua en el suelo (directos e indirectos; destructivos y no destructivos) (Fares et al., 2009). La solución del suelo se limita al agua disponible para las plantas, estando retenida entre la capacidad de campo (-33 kPa) y el punto de marchitez (-1500 kPa). En este caso la misma fue obtenida con las dos metodologías explicadas a continuación:

- Metodología 1: La extracción de la solución del suelo mediante la succión activa se puede hacer por medio de extractores radiculares tipo *Rhizon* u otro tipo de

materiales porosos. Estos permiten extraer solución que está retenida entre 70 y 90 *kPa*. Este valor de tensión garantiza que el movimiento de solutos sea similar al que ocurre en condiciones naturales en la zona radicular. El volumen de la solución obtenida puede variar de acuerdo con la textura, conductividad hidráulica y contenido de humedad del suelo estudiado (Rhoades y Ester, 1986). Para los muestreos del ensayo, se ha utilizado el tipo Rizhon MOM, de ahora en adelante mencionado como rizometro que fue realizado para muestreo de metales dado que posee un diámetro de poro medio de 0,1 μm (máx. 0,2 μm) lo que permite la extracción de compuestos microbianos y libres de coloides ya listos para analizar la solución extraída (*Rhizon SMS, 2003*). Dichos rizometros, se colocaron a 5cm de la punta superior del tubo y otro a los 15cm, pasando por dos pequeñas perforaciones del diámetro del rizometro, que fueron adecuadamente selladas con polímero de silicona colocándose por el exterior del tubo. Finalmente, para conectar el extremo del mismo con la boca de la jeringa de 60 ml, se colocó una manguera de PVC con el diámetro adecuado con la finalidad de succionar la solución del suelo disponible. Dicho vacío fue posible al introducir una madera que se mantuvo estirando el embolo, ejerciendo la tensión necesaria durante el periodo entre muestreos realizados. También, se colocó una tabla de PVC perforada en la base del tubo, a los 23 cm, para que sirva de sostén del mismo y que funcione como filtro con el objetivo de poder recolectar en un recipiente plástico la cantidad restante de solución total que circuló a lo largo de todo el tubo, siendo extraída finalmente mediante rizometro (Fig. 4.2).

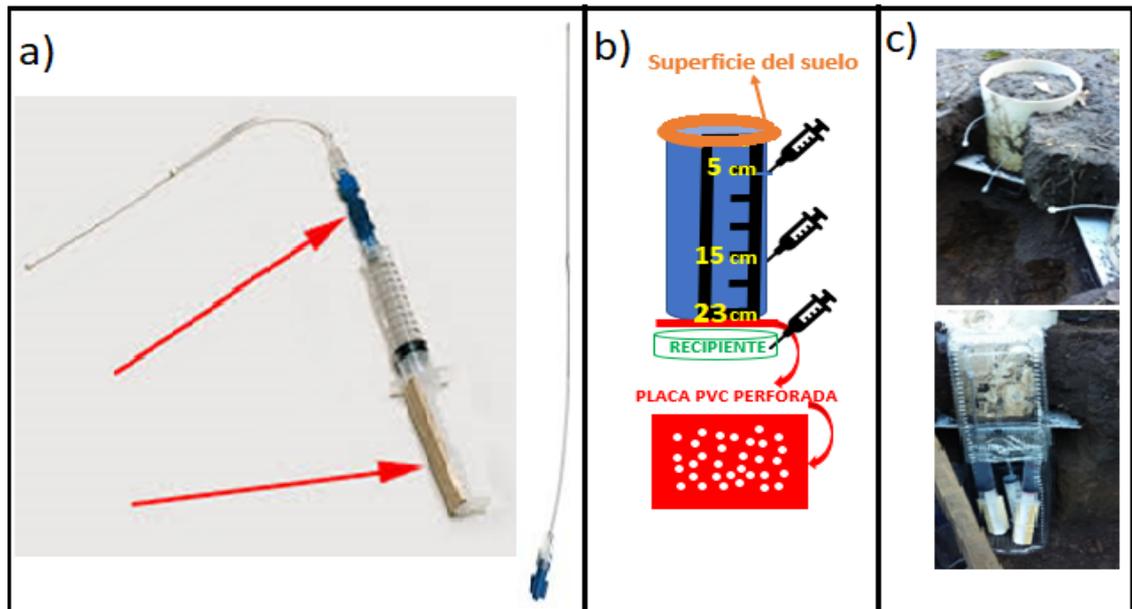


Figura 4.2: Imágenes de rizómetros y tubos. a) Detalles de rizómetro, b) Localización de los rizómetros como así también de la placa perforada colocado en el inferior de los tubos de PVC y c) imágenes del tubo colocado en el campo. Flechas rojas superior: indica adaptador para conectar la punta del rizómetro con la boca de la jeringa. Flecha roja inferior: indica la colocación de una madera para mantener a la jeringa ejerciendo el vacío necesario para la succión de la solución del suelo.

En este caso las cantidades de solución del suelo fueron muestreadas luego de eventos de lluvia, dado que tanto las jeringas como los colectores finales del tubo estarían más llenos. Se han agrupado los volúmenes obtenidos a lo largo de cada uno de los ciclos para poder alcanzar los mínimos requeridos por las diversas metodologías de laboratorio a aplicar, siguiendo los lapsos de tiempo establecidos para el muestreo de los estadios fenológicos del cultivo de trigo (vegetativo, reproductivo y madurativo, mencionados en el capítulo 3). Cabe destacar que dichas colectas no han sido suficientes para obtener el volumen necesario en todos los tratamientos en las distintas profundidades a lo largo de los estadios recientemente indicados. Lo obtenido ha posibilitado la realización de ciertos análisis que al requerir determinados volúmenes, iban agotando la disponibilidad de los contenidos de la solución del suelo para la determinación de los elementos aún pendientes. Finalmente, en el estadio vegetativo del 2019 no se ha podido coleccionar el mínimo volumen necesario para realizar análisis alguno, situación que podría deberse a

un menor volumen de precipitaciones recibidas durante el desarrollo inicial del cultivo, el cual combinado con la ausencia de cobertura vegetal, habría redundado en una disponibilidad hídrica limitada.

-Metodología 2: Finalmente, luego de la cosecha, se procedió a quitar el suelo contenido dentro de los tubos, siguiendo con las 3 profundidades en las que se colectaban las soluciones, es decir de: 0-5 de 6-15 y de 16-23 cm Dichas muestras se sometieron a las extracciones de la solución del suelo siguiendo los correspondientes procesos dentro del laboratorio y las mismas serán de ahora en adelante mencionadas como extractos. Asimismo, otra fracción de este material es la que se ha separado para las determinaciones morfológicas, físicas, químicas y mineraloquímicas que serán explicadas a continuación.

4.2.4. Análisis de laboratorio

4.2.4.1. Caracterización física de los suelos

4.2.4.1.1. Determinación de resistencia mecánica

Se determinó por el método del penetrómetro de cono (Bradford, 1986) según normas ASAE. S 313 (American Society of Agricultural Engineering, 1992), en cada uno de los distintos niveles del horizonte A evaluados.

4.2.4.1.2. Determinación de la densidad aparente

Se realizó por el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986), utilizándose para su extracción cilindros de acero de volumen 100cm^3 en cada uno de los distintos niveles del horizonte A evaluados.

4.2.4.1.3. Determinación de la textura o granulometría

Se realizó mediante el método de contador láser de partículas o sedígrafo, previa eliminación de agentes cementantes y aglutinantes, como materia orgánica, carbonato de

Ca, óxidos de Fe, etc. (Master Sizer 2000). Clasificadas según Escala granulométrica de Udden (1914) modificada por Wentworth (1922), Determinado en Universidad Nacional de La Pampa.

4.2.4.2. Determinación del pH

Determinación del pH en pasta 1:1 y en solución suelo:agua en una relación 1:2,5 con pHmetro digital Orion Research 501.

4.2.4.3. Determinaciones químicas:

Se analizaron las concentraciones de Si, P, Cd y Cu en las soluciones del suelo extraídas con ambas metodologías (rizometros y extractos), siguiendo las técnicas mencionadas a continuación:

4.2.4.3.1. Silicio en la solución del suelo

Para obtener los extractos, se tomaron 800 gramos de suelo y se utilizó la metodología de la pasta saturada según Richards (1954), la cual fue posteriormente centrifugada a 3000 rpm (Gerard et al., 2008) y por último filtrada a través de membranas de nitrocelulosa. Finalmente, se determinó la concentración de sílice de ambas soluciones del suelo por el método de silicomolibdato mediante espectrometría UV-VIS según APHA-AWWA-WPFC (1998).

4.2.4.3.2. Fósforo en la solución del suelo

Determinación de P extractable de los suelos sólidos (obtenidos con la metodología 2) por fluoruro de amonio, Bray & Kurtz Nro 1 (Kuo, 1996). Las soluciones de los rizometros (obtenidas con la metodología 1) se han determinado a través con un ICP-OES (ICAP PRO X Duo Spectrometer, Thermo Scientific, UK) (Facultad de Ciencias Exactas - UAM- España).

4.2.4.3.3. Cadmio y cobre en la solución del suelo

En este caso los extractos han sido los obtenidos aplicando la misma metodología mencionada previamente para el Si. La determinación de las concentraciones de Cd y Cu en ambas soluciones del suelo obtenidas se realizaron mediante la técnica de ICP-OES (ICAP PRO X Duo Spectrometer, Thermo Scientific, UK) en instalaciones de la Facultad de Ciencias Exactas de la UAM (España).

4.2.4.4. Caracterización cualitativa, cuantitativa y mineraloquímica de silicofitolitos

El suelo muestreado en las 3 profundidades fue cuarteado y homogeneizado, siendo una porción de las mismas (5 gramos) tratadas según lo definido por Alvarez et al., (2008), eliminando materia orgánica, sales, óxidos, y arcillas por centrifugaciones reiteradas. Una alícuota de estas muestras tratadas, se montaron en aceite de inmersión para determinar los morfotipos (ICPN, 2005), y los contenidos en porcentajes de silicofitolitos mediante el conteo de 400 granos bajo MOp (Zeiss Axiostar Plus) y petrográfico (MP, (Olympus BX51), respecto del total de los componentes mineralógicos del suelo. También una pequeña porción de las mismas muestras, se montaron en discos de Al, recubrieron con oro o paladio y se observaron los silicofitolitos al MEB, FEI (Quantas 200, LIMF-Universidad Nacional de la Plata-UNLP), se identificaron los elementos presentes mediante espectroscopia de dispersión de rayos X, (EDS Drift Detector LIMF-UNLP).

4.3 Resultados y discusión

4.3.1 Características morfológicas

Las características morfológicas (Cuadro 4.1) presentan similitud en los 3 niveles definidos. Únicamente se distingue el nivel 15-23 cm, donde se ve un leve incremento en arcillas, lo cual coincide con una consistencia levemente más firme y dura, ligeramente

adhesiva y ligeramente plástica, lo que permitiría definir la base del mismo al horizonte de transición AB.

Cuadro 4.1. Características morfológicas determinadas para los suelos de ambos ensayos

Horizonte	Profundidad (cm)	Color		Textura	Estructura	Consistencia S/H/MPa	Raíces
		Seco	Húmedo				
A	0-5	10YR 3/1	10YR 2/1	Limosa	Granular a bloques Finos Moderados	Lig. dura Friable No. plástica/ No adhesiva	X
A	5-15	10YR 3/1	10YR 2/1	Limosa	Granular a bloques Finos a medios Moderada	Lig. dura Friable No. plástica/ No adhesiva	XX
A AB	15-20 20-23	10YR 3/2	10YR 2/1	limoso a franco limoso	Bloque subangulares Finos a medios Moderados	Lig. dura Lig. firme Lig. Plástica/ Lig. adhesiva	XXX

4.3.2. Características físicas

4.3.2.1 Resistencia mecánica.

Los valores de resistencia mecánica (RM) fueron aumentando en profundidad para los 3 niveles dentro de los estadios madurativos de ambos ensayos (Cuadro 4.2). Este parámetro se midió en el suelo previo a la colocación de los tubos, por lo cual es una medida relativa que no puede usarse para interpretaciones de lo sucedido en el desarrollo de los cultivos. Sin embargo, y teniendo en cuenta los posibles efectos de la aplicación de los mismos como así también la densidad de plantas, se considera que podrían haber afectado la disponibilidad de agua en su interior, entre otros.

4.3.2.2. Densidad aparente

Los valores de densidad aparente (DAP) se ve que aumentan muy levemente en profundidad (Cuadro 4.2), incrementos que podrían relacionarse con la compactación, condicionada esencialmente por reducción de la porosidad. Lo cual podría deberse a las condiciones del parque privado que al no haber sido laboreado, podría no estar promoviendo la regeneración de la porosidad, proceso que si sucede en los agroecosistemas bien manejados. Esto coincide con los resultados obtenidos por otros

autores (Alvarez et al., 2008) que atribuyen el aumento de la DAP y porosidad, a la falta de remoción del horizonte superficial, como así también al contenido de materia orgánica y minerales de arcilla, que favorecen la agregación dentro de los suelos. También, se podría considerar el incremento de arcilla en el límite de los horizontes A/A, que podría explicar el incremento de la DAP con la profundidad aquí hallada.

4.3.3.3. Características texturales

La distribución granulométrica es preponderantemente limosa con valores porcentuales muy similares en todos los tubos (Cuadro 4.2). En general las fracciones granulométricas presentaron una distribución recurrente dentro de todo el epipedón con valores entre 64% y 58% de limos, donde predominan limos finos con valores cercanos al 40%. Las arenas presentan valores de 29-31%, con un marcado predominio de arenas muy finas. Las mismas han mostrado una leve disminución hacia la base, viéndose compensada con un leve incremento de arcillas que ronda el 5%. Estos datos confirman las características morfológicas del definido a campo horizonte AB, y los leves incrementos de RM y DAP hacia la base de los tubos.

Cuadro 4.2: Valores promedio de las propiedades físicas determinadas. Abreviaturas: DAP= Densidad aparente. RM= resistencia mecánica

Prof. (cm)	DAP (g/cm ³)	RM (Mpa)	Textura (%)					Prof. (cm)
			Arena fina (125-250 μm)	Arena muy fina (62,5-125 μm)	Limo Grueso (31-62,5 μm)	Limo Fino (3,9-31 μm)	Arcillas (< 3,9 μm)	
0-5	1,09	1,69	5,4	23,4	22,6	41,5	7,1	0-5
5-10	1,15	1,81						
10-15	1,25	1,97	6,0	24,7	21,1	39,2	9,0	5-15
15-20	1,31	2,28						
20-23	1,45	3,07	5,1	23,5	20,9	38,1	12,4	15-23

Las características morfológicas y físicas descriptas coinciden con las reportadas dentro de la zona (Benvenuto, 2017; Alvarez et al., 2018; Frayssinet et al., 2019) como

así también con las adecuadas para el desarrollo del cultivo de trigo que ha sido ensayado a lo largo del presente trabajo (Guanca et al., 2012; Sur, 2017; INTA, 2020).

4.3.4. Determinación del pH

Los valores obtenidos de pH con ambas evaluaciones (en pasta 1:1 y en solución suelo:agua en relación 1:2,5) han sido similares tanto para los rizometros como para los extractos, encontrándose en el rango comprendido entre 6,1 y 6,4 correspondiente a la categoría de levemente ácido (Berhongaray et al., 2013; INTA, 2020). Estos valores se consideran óptimos para el desarrollo de los cultivos y la disponibilidad de los elementos químicos en la solución del suelo aquí analizados.

4.3.5. Características químicas (Si, P, Cu y Cd):

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos para cada uno de los elementos analizados en ambas soluciones del suelo obtenidas (rizometros y extractos), con el formato que se explica a continuación. Primero se mostrará un cuadro con los resultados de los rizometros, dado que permiten poner a prueba la hipótesis planteada, de posible disminución de la concentración de Si y el resto de los elementos en la solución del suelo al finalizar el ciclo. Luego se incorporarán los resultados de los extractos que se obtuvieron al final del ciclo, siendo comparados con los obtenidos para el mismo estadio por parte de los rizometros permitiéndonos evaluar similitudes y/o diferencias entre ambas metodologías de extracción. Finalmente, se mostrarán las concentraciones de SiO₂ y su relación con cada uno del resto de los elementos analizados, como así también los resultados promedios considerando ambas metodologías utilizadas entre las distintas profundidades evaluadas, presentándose por último un gráfico con sus promedios generales obtenidos al finalizar el ciclo. Se detalla en el estadio madurativo, dado que es el momento en que se pueden comparar ambas metodologías, y al mismo tiempo, porque es cuando la planta ha completado su desarrollo, siendo el de mayor interés a fin de

evaluar los efectos de los distintos tratamientos sobre el sistema suelo, pudiéndose consecuentemente planificar un manejo sustentable de los mismos.

Cabe mencionarse que en lugar de la unidad comúnmente utilizada (mg/Kg) para dichos análisis químicos, en este caso se ha escogido la de mg/L. Dicha elección se realizó al considerar la metodología de extracción de rizometros, ya que la misma extrae la solución directamente del suelo para ser posteriormente analizada en el laboratorio. En este caso y considerando que no se sabe a qué área está afectando la succión ejercida por el rizometro, no nos es posible saber el número exacto en peso seco de la muestra de suelo a la que se hace referencia, sin poder consecuentemente precisarse los resultado en dichas unidades. Finalmente, como se comparan los resultados obtenidos con ambas metodologías de extracción de solución del suelo evaluadas, es que se han expresado todos en miligramos sobre litro para poder facilitar la comprensión de los mismos luego de su comparación.

Por otro lado, reiterar que este es el primer estudio realizado mediante un ensayo a campo y que se trató de abordar el mismo con la mayor información disponible, pero lamentablemente no se han encontrado antecedentes realizados bajo condiciones similares, es decir, que no posean características y manejos del suelo diferentes ni que hayan sido realizados dentro del laboratorio o en condiciones controladas y puedan, consecuentemente, considerarse como válidos para citar en la discusión de esta tesis (Sigfusson et al., 2006; Shotbolt, 2010; Murtaza et al., 2011; Mercl et al., 2017; Márquez Molina, 2020). Lo mencionado, no nos ha permitido realizar las comparaciones pertinentes de los resultados aquí evaluados, dado que a la fecha no hay trabajos que aborden y/o comparen los valores que se han obtenido mediante la utilización de las dos metodologías de extracción de solución del suelo (extractos y rizometros) previamente explicadas.

4.3.5.1. Concentración de dióxido de silicio en la solución del suelo

4.3.5.1.1. Ciclo de cultivo 2018

Analizado la concentración de SiO₂ mediante los rizómetros (Cuadro 4.3) se observó que dentro de los 3 estadios todos los tratamientos disminuyen sustancialmente desde los primeros 15 cm hacia la base del horizonte A. Los análisis estadísticos no evidencian efecto sobre el contenido de dióxido de silicio detectado en los distintos tratamientos entre los diferentes estadios evaluados como así tampoco entre las profundidades analizadas (valores $p > 0,05$). Por lo anteriormente expuesto, se evalúan los valores promedio en todo el epipedón para cada estadio, los cuales muestran que todos los tratamientos han arrojado valores mayores en el momento final del ciclo respecto del inicial, siendo el promedio de los mismos: 12,93 mg/L para el estadio vegetativo, 18,14 mg/L para el siguiente y 33,29 mg/L para el estadio madurativo, presentando diferencias significativas este último para con los dos anteriores (valor $p < 0,0001$). Dichos resultados, respaldan los visualizado al considerar los valores obtenidos, sobre el contenido de acumulación total detectado entre estadios.

Cuadro 4.3: Concentraciones de dióxido de silicio (mg/L) en las soluciones del suelo, extraídas con rizómetros, para cada uno de los estadios y a las diferentes profundidades de colecta en el ciclo de cultivo del 2018. Abreviatura: sm: sin muestra; nd: no detectable. Letras distintas indican diferencias significativas de las medias entre estadios (valor $p < 0,05$).

SiO ₂ (mg/L)	Profundidad	Control	Si	Cu	Si+Cu	Cd	Si+Cd
Vegetativo (a)	5cm	24,87	19,34	sm	23,64	13,97	12,28
	15cm	25,94	11,82	17,65	14,94	24,10	10,13
	23cm	1,84	5,06	4,60	5,83	13,81	2,30
Reproductivo (a)	5cm	16,94	9,03	21,70	23,02	25	21,65
	15cm	13,69	24,64	sm	17,39	18,30	18,91
	23cm	17,24	14,81	nd	10,85	16,94	18,30
Madurativo (b)	5cm	30,98	34,13	58,41	36,41	43,84	40,05
	15cm	35,80	30,11	35,1	43,79	43,55	41,33
	23cm	26,04	28,84	26,74	28,54	19,56	24,75

A continuación, se puede ver que el SiO₂ en el estadio madurativo registrado por ambas metodologías en ninguno de los casos han presentado diferencias significativas entre tratamientos (valores $p > 0,05$) (Fig. 4.3), pero si en la interacción de los mismos considerando las profundidades para con las soluciones obtenidas de los extractos (Cuadros 4.1 y 4.2 en el Apéndice). Donde puede verse que los tratamientos Control, Si y Si+Cd han mostrado valores mayores en el nivel superior al compararse con los niveles inferiores, mientras que el resto no presentan diferencia significativa alguna.

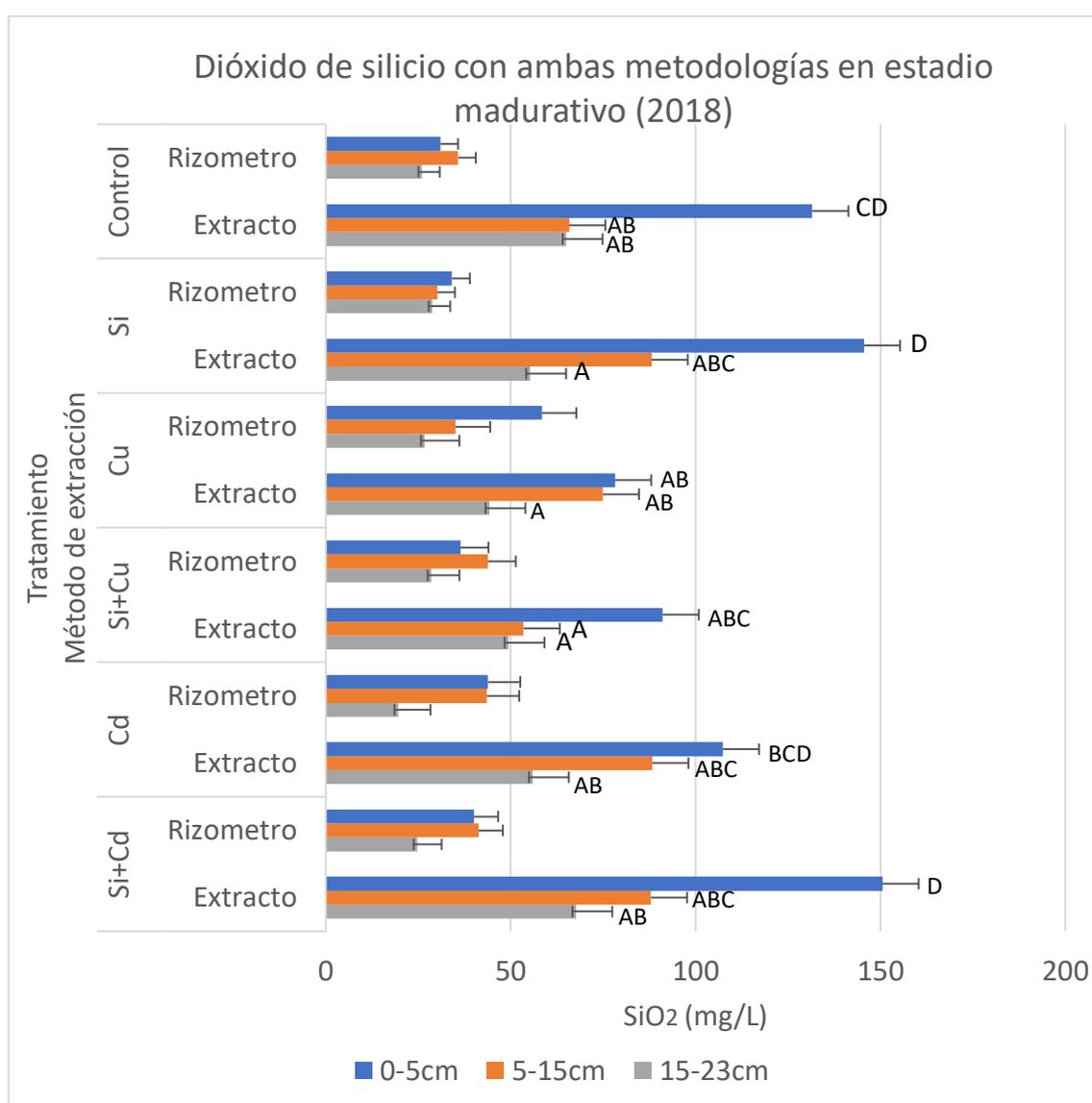


Figura 4.3: Concentración de dióxido de silicio (mg/L) obtenida con ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos) registradas en el estadio madurativo del ciclo de cultivo 2018, a lo largo de las distintas profundidades. Letras diferentes indican diferencias significativas (valores $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Se observa que la concentración de SiO_2 en los extractos disminuye con la profundidad (valor $p < 0,0001$) desde 116,84 mg/L en la fracción superior, pasando por 76,98 mg/L en el nivel medio y finalizando con 56,25 mg/L en el inferior; mientras que la solución de los rizometros presentó tenores similares a lo largo del epipedón, con valores promedios mayores en la profundidad media (37,48 mg/L), seguidas por la superficial (36,60 mg/L) y mostrando su mínimo en la base del mismo (26,34 mg/L), con diferencias significativas entre este último respecto de los dos primeros (Valor $p = 0,0063$). Comparando entre metodologías dentro de la misma profundidad se observó que han dado superiores las concentraciones de los extractos respecto de los rizometros, con diferencias significativas en cada uno de los niveles (Valores $p < 0,0001$), siéndolo en cantidades de 80,24 mg/L para el nivel superficial, mientras que en el medio fueron de 39,5 mg/L y finalmente en la base de 29.91 mg/L.

4.3.5.1.2. Ciclo de cultivo 2019

A continuación, se observarán los datos obtenidos por los rizometros durante este ciclo (Cuadro 4.4), donde se observa que los del estadio reproductivo han registrado concentraciones de SiO_2 bastante variables, viéndose que el único que colecto en dos profundidades (Si+Cd) ha disminuido con la profundidad. Finalmente, los valores del estadio madurativo son elevados y bastante parejos entre las distintas profundidades evaluadas. Se han realizado análisis estadísticos y no se ha detectado efecto sobre el contenido de dióxido de silicio detectado en los distintos tratamientos entre los diferentes momentos evaluados como así tampoco entre las profundidades analizadas (valores $p > 0,05$).

Cuadro 4.4: Concentraciones de dióxido de silicio (mg/L) presentes en las soluciones del suelo extraídas mediante rizómetros, para cada uno de los estadios (que han colectado volumen necesario) y en las distintas profundidades de colecta a lo largo del ciclo de cultivo del 2019. Abreviatura: sm: sin muestra; nd: no detectable.

SiO ₂ (mg/L)	Prof.	Control	Si	Cu	Si+Cu	Cd	Si+Cd
Reproductivo	5cm	sm	41,05	10,82	sm	sm	sm
	15cm	sm	sm	sm	sm	47,97	61,25
	23cm	13,99	sm	sm	sm	sm	39,44
Madurativo	5cm	27,97	52,37	46,85	44,75	46,15	5,41
	15cm	39,72	48,01	58,74	31,33	67,69	51,46
	23cm	50,35	sm	37,48	sm	sm	sm

Ahondando en los valores promedio de todo el epipedón mólico puede verse que todos los tratamientos han arrojado valores menores en estadio reproductivo respecto del madurativo, siendo los mismos: 43,22 mg/L y 47,48 mg/L, sin diferencias significativas (valor $p = 0,3802$). Dichos resultados, respaldan lo visualizado al considerar los valores obtenidos, sobre el contenido de acumulación total detectado entre estadios

A continuación, se presentarán los resultados del estadio madurativo (Fig. 4.4), donde se observa que la concentración de SiO₂ en la solución del suelo arrojado por ambas metodologías, no ha presentado diferencia significativa alguna entre los tratamientos aplicados (valores $p > 0,05$) como así tampoco en la interacción de los mismos considerando las profundidades (Cuadros 4.3 y 4.4 en el Apéndice).

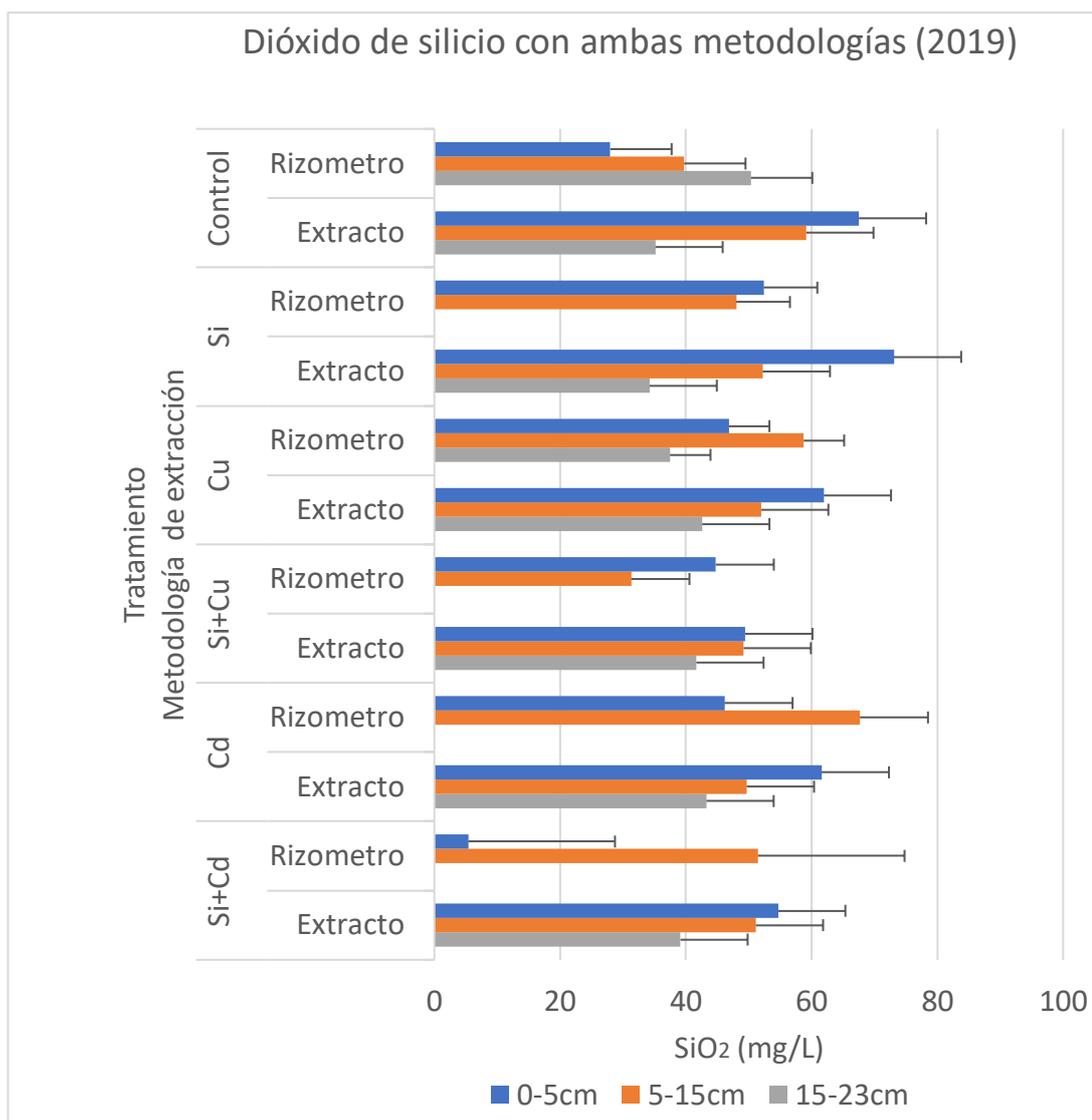


Figura 4.4: Concentración de dióxido de silicio (mg/L) obtenida con ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos), registradas en el estadio madurativo del ciclo de cultivo 2019, a lo largo de las distintas profundidades. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Asimismo, se observa nuevamente que los valores detectados de dióxido de silicio por los extractos disminuyen a medida que profundizamos en el horizonte A, desde 59,13 mg/L promedio en los primeros 5cm, pasando a 54,48mg/L en el nivel medio y finalizando con 39,35 mg/L, distinguiéndose el nivel inferior de los dos superiores (valor $p = 0,0024$). Por su parte, los rizometros han mostrado resultados similares dentro del horizonte, presentando nuevamente valores mayores en la profundidad media (50,97 mg/L) seguidos por el nivel superficial (44,26 mg/L), y tener similar registrado en la base

(43,92 mg/L), sin diferencia significativa entre ellos (valor $p= 0,3624$). Finalmente, al comparar las metodologías, se observó que dentro de los primeros 5 centímetros son significativamente superiores los extractos en 14,85 mg/L (valor $p = 0,0167$), siéndolo también para el nivel medio en 3,51 mg/L; mientras que para la profundidad mayor son los rizometros los que superan en 4,57 mg/L a los valores de los extractos, sin diferencia significativa en los dos últimos niveles (valores $p >0,05$).

4.3.5.1.3. Comparación de ambos ciclos

En el siguiente gráfico (Fig. 4.5) podrán verse los resultados de SiO_2 (mg/L) promedio obtenidos para cada tratamiento realizado.

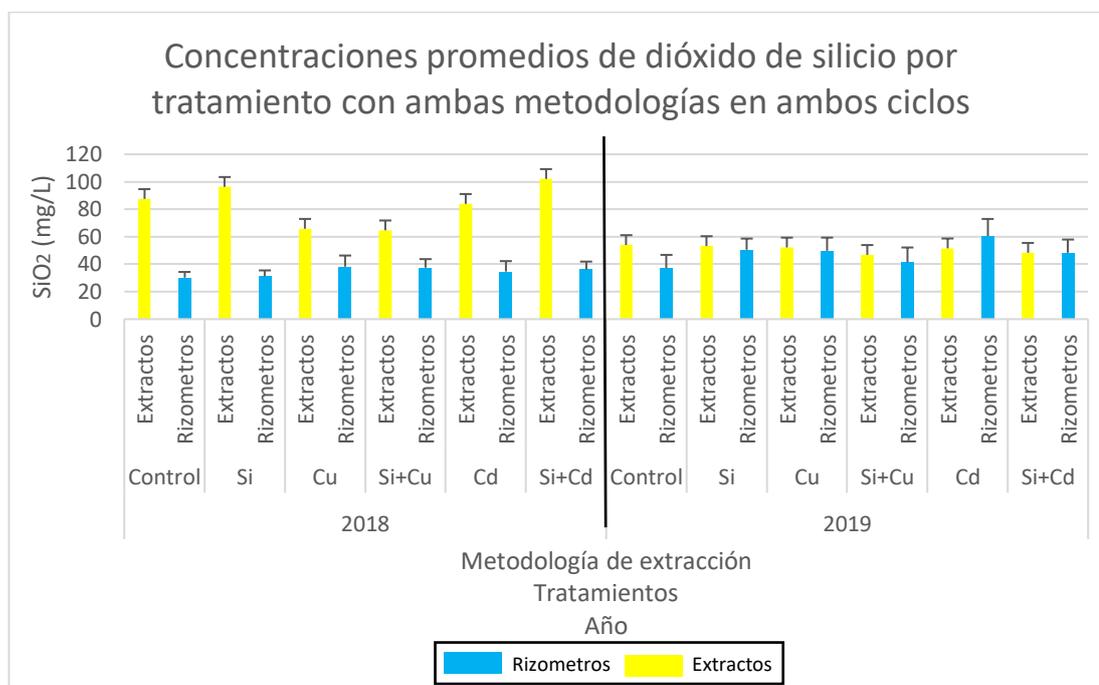


Figura 4.5: Concentraciones de SiO_2 (mg/L) promedio obtenidas, agrupando las 3 profundidades y comparando ambos ciclos para cada tratamiento, en el estadio madurativo, utilizando ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos). Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

En este gráfico puede visualizarse como todos los valores detectados por los extractos en el primer ciclo han sido significativamente mayores que los de rizometros, con promedios de 83,35 mg/L y 33,29 mg/L, respectivamente (valor $p < 0,0001$); mientras

que los del segundo entre ambas metodologías son más cercanos, arrojando promedios de 50,99 mg/L los extractos y 47,48 mg/L rizómetros sin poseer relevancia estadística alguna (valor $p = 0,3646$). Por otro lado, al analizar las cantidades registradas por los extractos se ve que los del primer ciclo han sido mayores que los del segundo (83,35 mg/L y 50,99 mg/L, respectivamente), mientras que los de los rizómetros han sido cercanos entre ambos ciclos, pero en este caso siendo un poco mayores en el segundo ciclo (47,48 mg/ y 33,29 mg/L, respectivamente), presentando ambas metodologías diferencias significativas entre sus promedios para cada año (valores $p < 0,0001$).

A continuación, procedernos a evaluar por profundidades los valores promedios de SiO_2 (mg/L) obtenidos utilizando ambas metodologías (Fig. 4.6). Los extractos muestran valores mayores para el primer ciclo respecto los del segundo, siendo dichas diferencias de 57,71 mg/L para el nivel más superficial; de 22,5 mg/L para el medio y de 16,9 mg/L para el más profundo. Por su parte las soluciones obtenidas de los rizómetros han mostrado diferencias superiores para el segundo ciclo, arrojando los siguientes valores diferenciales entre ambos años: 7,66 mg/L para los primeros 5cm, siendo el único no significativo (valor $p = 0,1429$); 13,49 mg/L para el nivel medio y finalmente de 17,58 mg/L para el nivel inferior del horizonte A/AB.

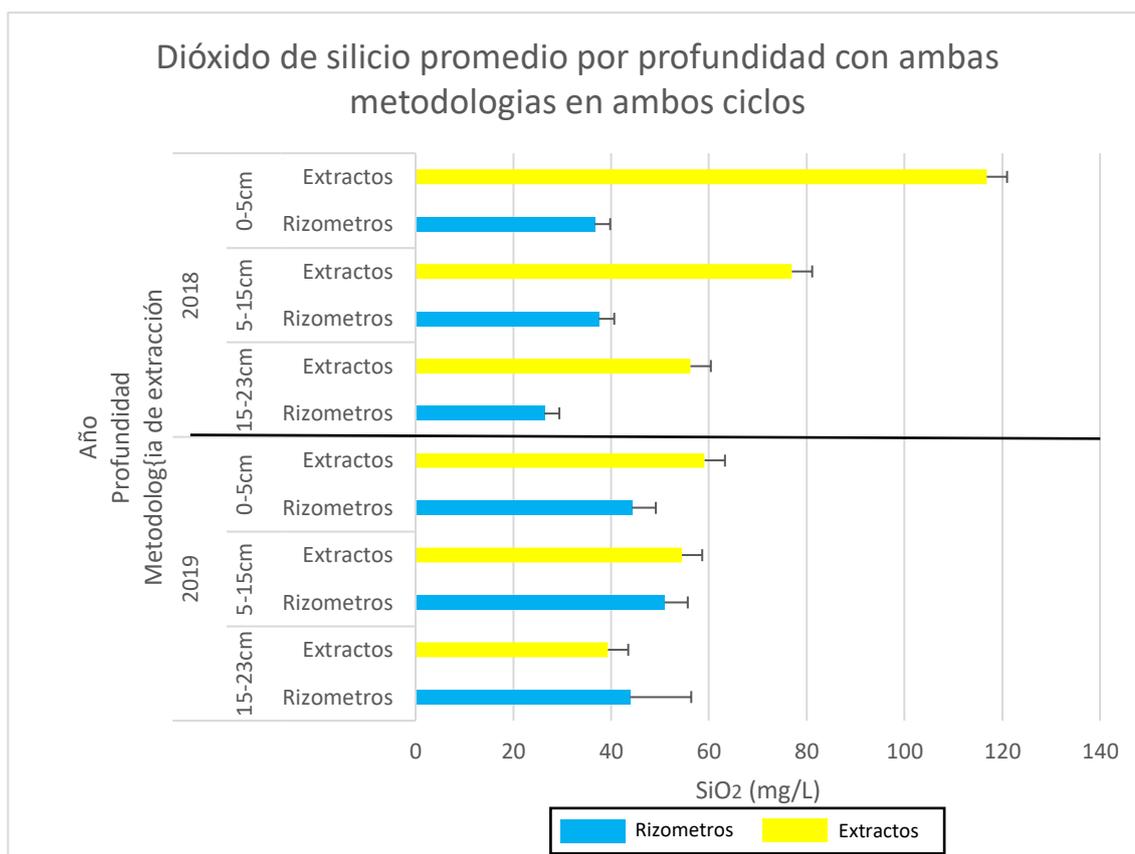


Figura 4.6: Concentraciones promedio de SiO₂ (mg/ L) obtenidas agrupando todos los tratamientos para el estadio madurativo, por profundidad para cada ciclo, aplicando ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos). Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Si bien en síntesis se puede apreciar que no hubo efecto significativo alguno de los tratamientos aplicados, para con ninguna metodología y en ninguno de los ciclos, se observaron resultados particulares de interés. Entre ellos, que los rizometros han presentado mayores valores al final de ambos ciclos. Adicionalmente, que los extractos en ambos ciclos han presentado valores que han ido descendiendo con la profundidad del horizonte A; comportándose de la misma manera los rizometros, pero con sus máximos en el nivel medio analizado. La diferencia detectada entre niveles de profundidad podría deberse a una mayor actividad radicular para la captación del Si, estando más cercana a la profundidad del horizonte A, como así también por posibles cambios texturales que favorecerían su complejación, lixiviación, gelificación, etc. quitándolo consecuentemente de la solución del suelo disponible. Asimismo, se aprecia que los valores promedio de

SiO₂ registrados para ambos ciclos han sido superiores para los extractos, presentando diferencias significativas durante el primer ciclo (valor $p < 0,0001$), y no significativas para el segundo (valor $p = 0,3646$) (Fig. 4.7). Pudiendo dicho efecto verse explicado por las mayores precipitaciones recibidas durante el 2018, que podrían haber incrementado la disponibilidad del Si dentro de la solución del suelo, facilitando su transferencia y no permitiendo su captura por parte de los espacios porosos que poseen los rizometros.

Para profundizar acerca de la posibilidad de los procesos aquí planteados, lamentablemente no se ha podido encontrar antecedente en condiciones similares, ni que aborden dichas profundidades dentro del horizonte A y menos aún con ambas metodologías, por lo que sería de suma utilidad realizar ensayos a campo para poder evaluar las mismas.

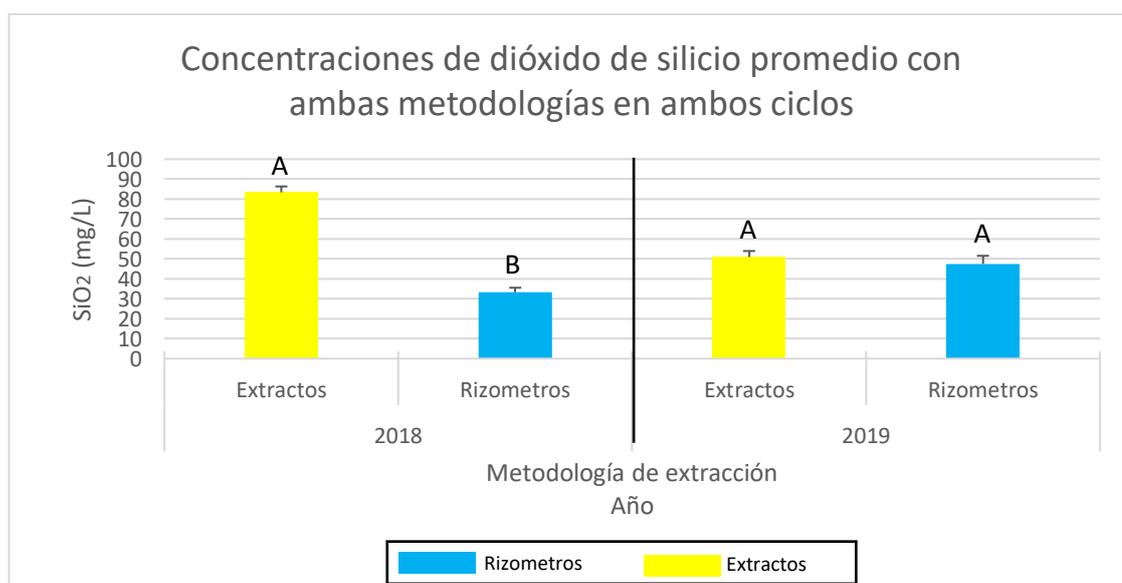


Figura 4.7: Concentraciones promedio de SiO₂ (mg/L), obtenidas para ambos ciclos, aplicando ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos). Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Finalmente, los promedios generales de ambos ciclos considerando ambas metodologías han dado valores sumamente similares, siendo para el primero de 51,55 mg/L y para el segundo de 49,76 mg/L (valor $p = 0,6544$). Las cantidades de dióxido de

Si en las soluciones del suelo dentro del horizonte A de los Argiudoles típicos del sudeste bonaerense, se corresponden con lo detectado por distintos autores (Borrelli et al., 2010; Osterrieth et al., 2014, 2015; Chirkes et al., 2016; Benvenuto, 2017; Conti, 2017; Frayssinet et al., 2019) y son suficientes para cumplir con la demanda de ambos ciclos de cultivo desarrollados, sin haber presentado diferencia significativa alguna luego de las cosechas.

4.3.5.2. Concentración de fosfatos en la solución del suelo

4.3.5.2.1. Ciclo de cultivo 2018

Analizado la concentración de H-PO₄ mediante los rizómetros (Cuadro 4.5) se observó que todos los tratamientos disminuyen con la profundidad. Los análisis estadísticos no evidencian efecto sobre el contenido de fosfatos detectado en los distintos tratamientos entre los diferentes momentos evaluados (valores $p > 0,05$).

Cuadro 4.5: Concentraciones de fosfatos (mg/L) en las soluciones del suelo, extraídas con rizómetros, para cada uno de los estadios y a las diferentes profundidades de colecta en el ciclo de cultivo del 2018. Abreviatura: sm: sin muestra; nd: no detectable.

H-PO ₄ (mg/L)	Profundidad	Control	Si	Cu	Si+Cu	Cd	Si+Cd
Vegetativo	5cm	2,93	4,03	sm	sm	2,33	2,39
	15cm	1,01	0,10	sm	sm	sm	sm
	23cm	sm	sm	sm	sm	sm	sm
Reproductivo	5cm	6,94	2,26	sm	3,19	2,52	sm
	15cm	2,36	1,82	sm	1,25	sm	sm
	23cm	sm	1,48	sm	sm	sm	sm
Madurativo	5cm	3,45	0,74	2,60	sm	0,54	2,42
	15cm	0,47	sm	sm	0,23	sm	sm
	23cm	4,17	3,03	3,97	3,03	1,52	2,42

Por lo anteriormente expuesto, se evalúan los valores promedio en todo el epipedón para cada estadio, los cuales no han presentado diferencias significativas (valor $p = 0,6518$), presentando valores de 2,14 mg/L en el estadio vegetativo, de 2,73 en el estadio reproductivo, finalizando con 2,58 en el madurativo. Dichos resultados, respaldan

los visualizado al considerar los valores obtenidos, sobre la similitud en los valores del contenido de acumulación total detectado entre estadios

Las concentraciones en el estadio madurativo utilizando ambas metodologías de extracción, (Fig. 4.8), nuevamente se han presentado sin diferencias significativas por parte de los distintos tratamientos aplicados (valores $p > 0,005$) como así tampoco en la interacción de los mismos considerando las profundidades (Cuadros 4.5 y 4.6 en el Apéndice).

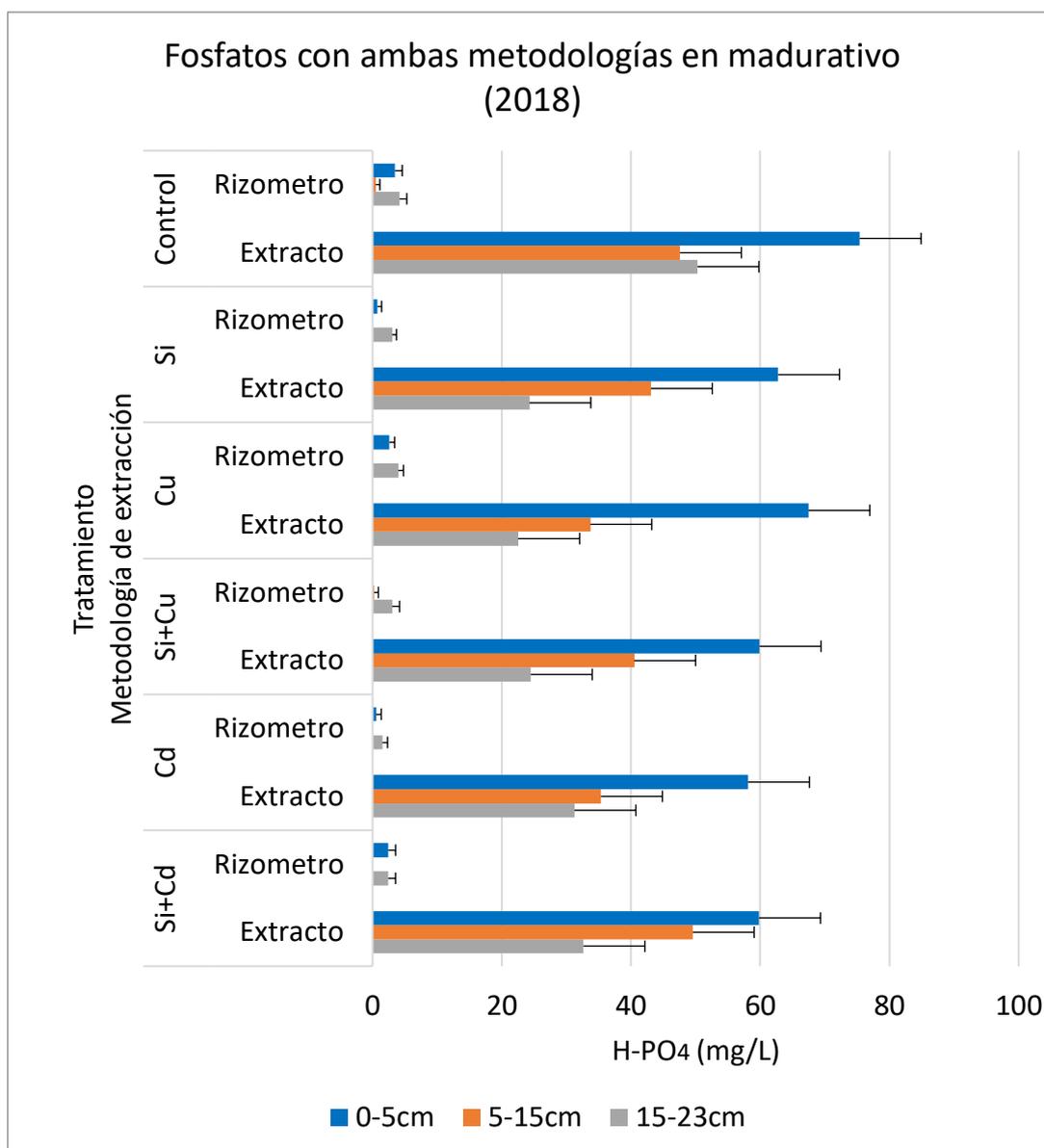


Figura 4.8: Concentración de fosfatos (mg/L) obtenida con ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos) registradas en el estadio madurativo del ciclo de cultivo 2018, a lo largo de las distintas profundidades. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Se observa que los valores promedio, registrados en todos los tratamientos evaluados por los rizometros ha sido mayor en profundidad (3,03 mg/L) respecto del nivel más superficial (2,12 mg/L), sin presentar diferencias significativas entre ellos, pero si entre los del nivel medio (0,36 mg/L) y la base del epipedón (valor $p = 0,0205$); mientras que los extractos han mostrado un patrón inverso, dado que van descendiendo en profundidad, presentando diferencias significativas los superficiales (63,92 mg/L),

respecto de los 2 niveles más profundos (41,64 mg/L y 30,92mg/L, respectivamente) (valor $p < 0,0001$). Comparando entre metodologías se observó que han dado superiores las concentraciones de los extractos respecto de los rizómetros, con diferencias significativas en cada uno de los niveles, siéndolo en cantidades de 61,8 mg/L para el nivel superficial (valor $p < 0,0001$), de 41,28 mg/L para el nivel medio (valor $p = 0,0044$) y finalmente en 27,89 mg/L para la base del epipedón (valor $p < 0,0001$).

4.3.5.2.2. Ciclo de cultivo 2019

A continuación, se observarán los datos obtenidos por los rizómetros (Cuadro 4.6), donde se observa que los del estadio reproductivo han registrado concentraciones de H-PO₄ bastante cercanas, viéndose que los únicos que poseían volumen para analizar fueron el Control a los 23cm y el Cd a los 15cm del epipedón. Finalmente, los valores del estadio madurativo son elevados y con resultados variables entre tratamientos para las distintas profundidades. Los análisis estadísticos no han detectado efecto sobre el contenido de fosfatos detectado en los distintos tratamientos entre los diferentes momentos evaluados como así tampoco entre las profundidades analizadas (valores $p > 0,05$).

Cuadro 4.6: Concentraciones de fosfatos (mg/L) presentes en las soluciones del suelo extraídas mediante rizómetros, para cada uno de los estadios (que han colectado volumen necesario) y en las distintas profundidades de colecta a lo largo del ciclo de cultivo del 2019. Abreviatura: sm: sin muestra; nd: no detectable.

H-PO ₄ (mg/L)	Profundidad	Control	Si	Cu	Si+Cu	Cd	Si+Cd
Reproductivo	5cm	sm	sm	sm	sm	sm	sm
	15cm	sm	sm	sm	sm	7,73	sm
	23cm	4,71	sm	sm	sm	sm	sm
Madurativo	5cm	3,42	5,19	15,48	13,03	15,32	2,92
	15cm	4,11	7,27	sm	9,86	9,64	3,71
	23cm	sm	sm	4,70	sm	sm	6,17

Ahondando es los valores promedio dentro de cada estadio puede verse que todos los tratamientos han arrojado valores mayores en estadio madurativo respecto al reproductivo, siendo los mismos: 6,23 mg/L y 7,79 mg/L, sin presentar diferencias

significativas (valor $p = 0,6406$). Dichos resultados, respaldan los visualizado al considerar los valores obtenidos, sobre el contenido de acumulación total detectado entre estadios.

En el siguiente grafico (Fig. 4.9), se observa que la concentración de $H-PO_4$ en la solución del suelo repite patrones entre lo detectado por los extractos, mientras que los rizómetros presentan dinámicas más variables, pero en ninguno de los casos se ha presentado diferencia significativa alguna entre los tratamientos evaluados (valores $p > 0,05$) como así tampoco en la interacción de los mismos considerando las profundidades (Cuadro 4.7 y 4.8 en el Apéndice).

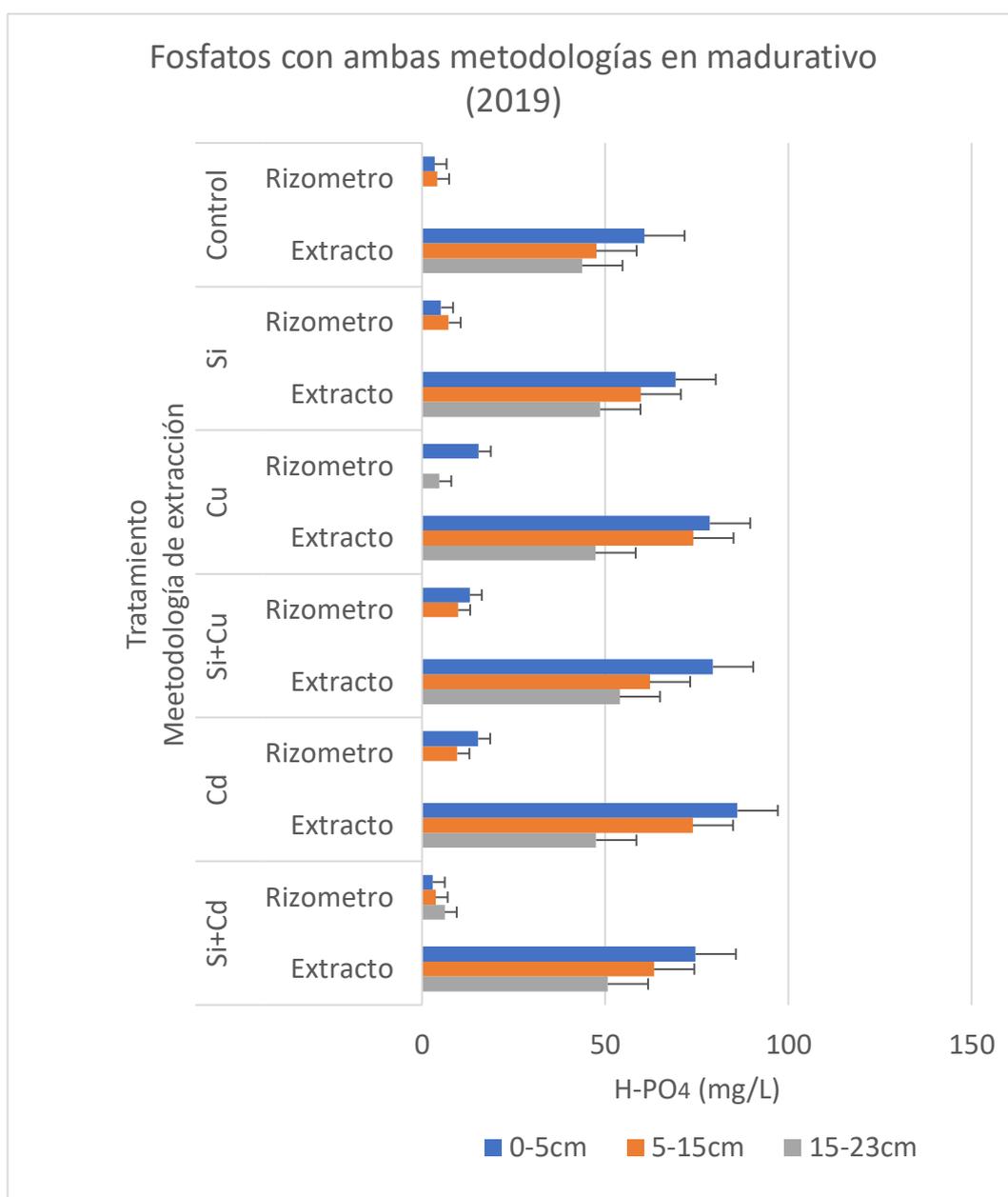


Figura 4.9: Concentración de fosfatos (mg/L) obtenida con ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos) registradas en el estadio madurativo del ciclo de cultivo 2019, a lo largo de las distintas profundidades. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Asimismo, se observa que los valores promedio detectados por los extractos y rizometros disminuyen a medida que profundizamos en el horizonte A. Respecto de los extractos, puede verse que presentan diferencias entre las medias de los más cercanos a la superficie (74,76 mg/L y 63,44 mg/L, respectivamente), respecto de los de la base del mismo (48,64mg/L) (valor $p = 0,0002$). En cuanto a los rizometros, cabe destacar que lo

hacen, pero pasando de 8,76 mg/L en el primer nivel a 7,38 mg/L en el segundo y finalizando con 5,69 mg/L en el más profundo (valores $p = 0,5996$). Finalmente, al comparar las metodologías se observó que nuevamente han dado superiores las concentraciones de los extractos respecto de los rizometros, con diferencias significativas en cada uno de los niveles (valores $p < 0,0001$), siéndolo en cantidades de 66 mg/L dentro de los primeros 5cm, de 56,06 mg/L en el nivel medio y finalmente de 27,89 mg/L en la base.

4.3.5.2.3. Comparación entre ambos ciclos

En el siguiente gráfico (Fig. 4.10) podrán verse los resultados de H-PO₄ (mg/L) promedio obtenidos con ambas metodologías para cada tratamiento realizado.

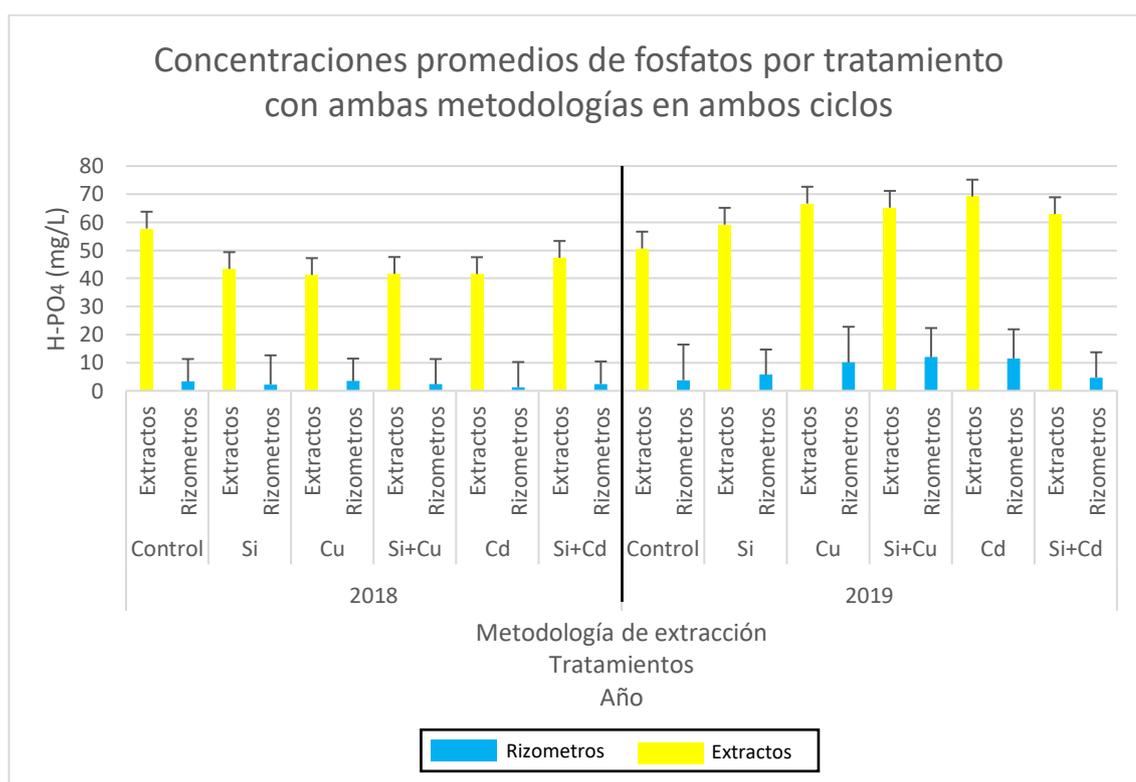


Figura 4.10: Concentraciones de H-PO₄ (mg/L) promedio obtenidas, agrupando las 3 profundidades y comparando ambos ciclos para cada tratamiento, en el estadio madurativo, utilizando ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos). Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

En este gráfico puede visualizarse como todos los valores detectados por los extractos en ambos ciclos han sido significativamente mayores que los de rizómetros (valores $p < 0,0001$). Por otro lado, al analizar las cantidades registradas por los extractos entre ciclos se ve que los del primero han sido inferiores a los del segundo (45,49 mg/L y 62,28 mg/L, respectivamente), mientras que los de los rizómetros han respondido de la misma manera (2,58 mg/L y 7,79 mg/L, respectivamente), presentando ambas metodologías diferencias significativas (valor $p < 0,0001$). Cabe destacar que ha sido sumamente mayor el valor registrado por los extractos al compararse con los rizómetros, probablemente porque han estado sujetas tanto a el filtro de poro más pequeño que posee el rizómetro como al proceso adicional de filtración más fino para ser medidos con el ICP, lo cual proporciona una solución con aún menos partículas, obteniendo una determinación más precisa de tal elemento al compararla con la del laboratorio que es comúnmente utilizada.

En el gráfico a continuación (Fig. 4.11), se muestran valores menores al comparar por profundidad las concentraciones en extractos detectados para el primer ciclo respecto los del segundo, siendo las diferencias superiores del año 2018 respecto al 2019 en: 10,84 mg/L (valor $p = 0,0506$) para el nivel más superficial; de 21,8 mg/L para el medio (valor $p = 0,0020$) y de 17,72 mg/L para el más profundo (valor $p = 0,0006$). Por su parte las soluciones del suelo de los rizómetros también han mostrado diferencias superiores para el segundo ciclo respecto del primero, arrojando las siguientes diferencias: 6,64 mg/L (valor $p = 0,0108$) para los primeros 5cm; 7,02mg/L para el nivel medio (valor $p = 0,0045$) y finalmente de 2,66mg/L para el nivel inferior del horizonte A/AB (valor $p = 0,0215$).

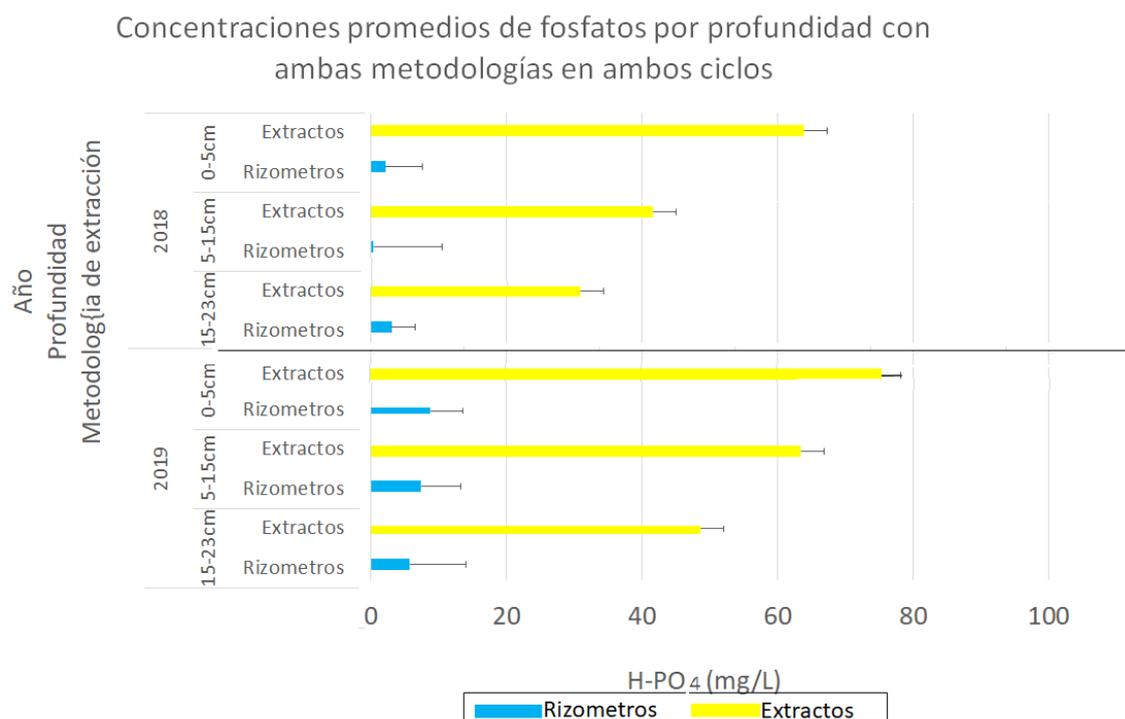


Figura 4.11: Concentraciones promedio de H-PO₄ (mg/ L) obtenidas agrupando todos los tratamientos para el estadio madurativo, por profundidad, para cada ciclo, aplicando ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos). Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

4.3.5.2.3.1. Relación entre las concentraciones de dióxido de silicio y fosfatos

A continuación, se verá un gráfico que combina los valores promedio obtenidos dentro del estadio madurativo por tratamiento de SiO₂ (mg/L) y H-PO₄ (mg/L) detectados con ambas metodologías en ambos ciclos (Fig. 4.12).

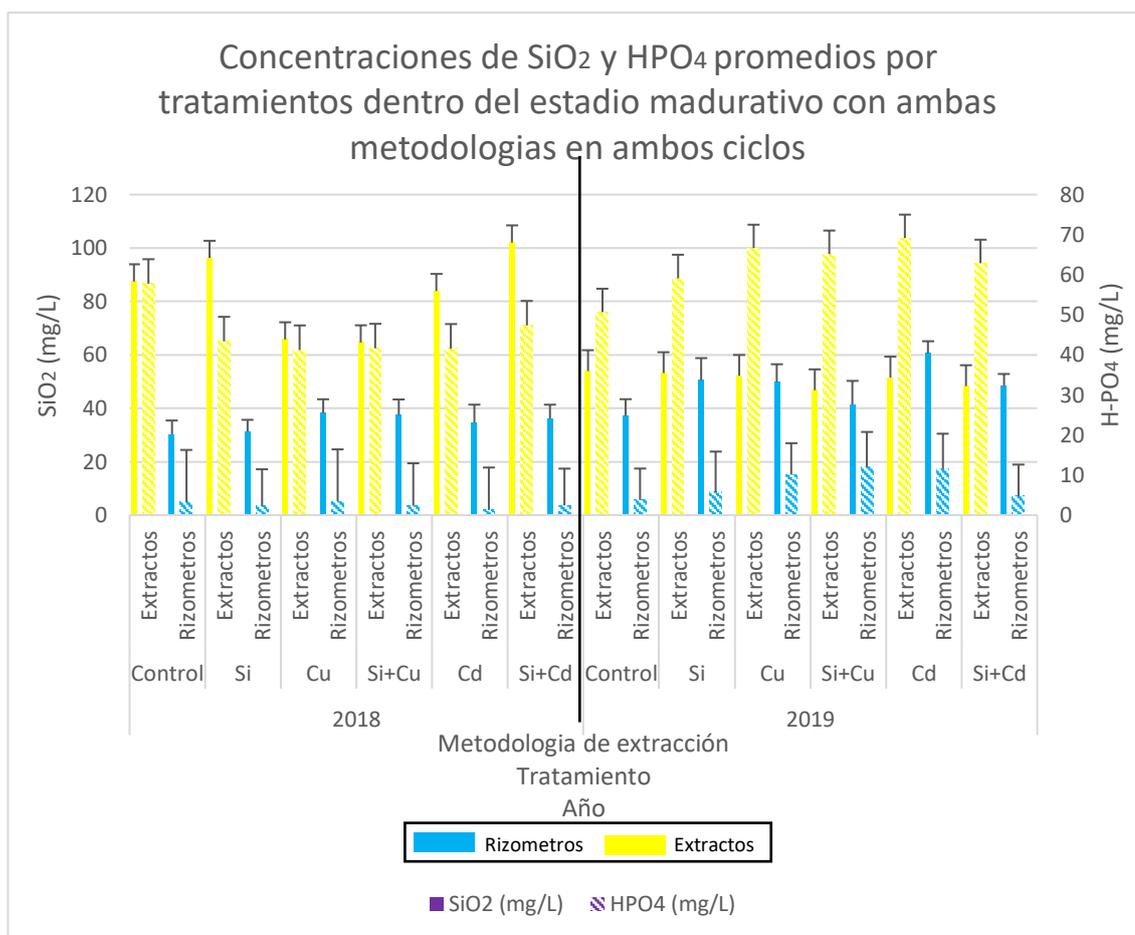


Figura 4.12: Concentraciones de SiO₂ (mg/L) y H-PO₄ (mg/L) promedio obtenidas, agrupando las 3 profundidades y comparando ambos ciclos para cada tratamiento, en el estadio madurativo, utilizando ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos). Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Comparando ambos ciclos, puede verse que los rizometros han detectado mayores cantidades de ambos elementos en el segundo ciclo respecto del primero, ascendiendo sus promedios de 2,58 mg/L a 7,78 mg/L para el H-PO₄ y de 33,29 a 47,48 mg/L para el SiO₂. Por su parte los extractos han detectado menores valores de dióxido de silicio (cayendo de 83,35 mg/L a 50,99 mg/L) y mayores de fosfatos (pasando de 45,49 mg/L a 62,28 mg/L) en el último ciclo respecto del primero. Siendo esta última relación opuesta sustentada por otros trabajos, que miden con la metodología de extracción del laboratorio mencionada e indican que el Si favorecería la liberación del P, resultado por ejemplo de una posible competencia entre los mismos en los sitios de adsorción, o bien a través de los sitios de intercambio en las partículas de arcilla, posiblemente a través de ligandos

(Caviglia et al., 2005; Liang et al., 2007; Chirkes et al., 2016, 2018; Agostinho et al., 2017; Conti, 2017; Frayssinet et al., 2019).

Si bien en síntesis se puede apreciar que no hubo efecto significativo de los tratamientos aplicados, se ha visto que los rizómetros han presentado una tendencia de aumento en las concentraciones de H-PO₄ registrados a lo largo de su desarrollo. También se ha observado, que los extractos y rizómetros en ambos ciclos han presentado valores mayores en superficie respecto de la base, exceptuando únicamente a los rizómetros del 2018 de dicho patrón y debiendo considerar que lo hacen sin diferencia significativa. La diferencia detectada entre niveles de profundidad podría deberse a una mayor actividad radicular para la captación del P, estando más cercana a la profundidad del horizonte A como así también por posibles cambios texturales que favorecerían su complejación, lixiviación, gelificación, etc. quitándolo consecuentemente de la solución del suelo disponible. Asimismo se aprecia que los valores promedio de H-PO₄ registrados para ambos ciclos han sido sumamente superiores para las soluciones del suelo de los extractos respecto de los rizómetros, presentando diferencias significativas (valores $p < 0,0001$) (Fig. 4.13), posiblemente explicado por los diversos filtros a los que estuvo expuesta con ambas metodologías (rizómetros y determinación con ICP) de manera previa a su determinación.

Nuevamente sería de suma utilidad realizar ensayos a campo para poder evaluar la posibilidad de los procesos aquí planteados.

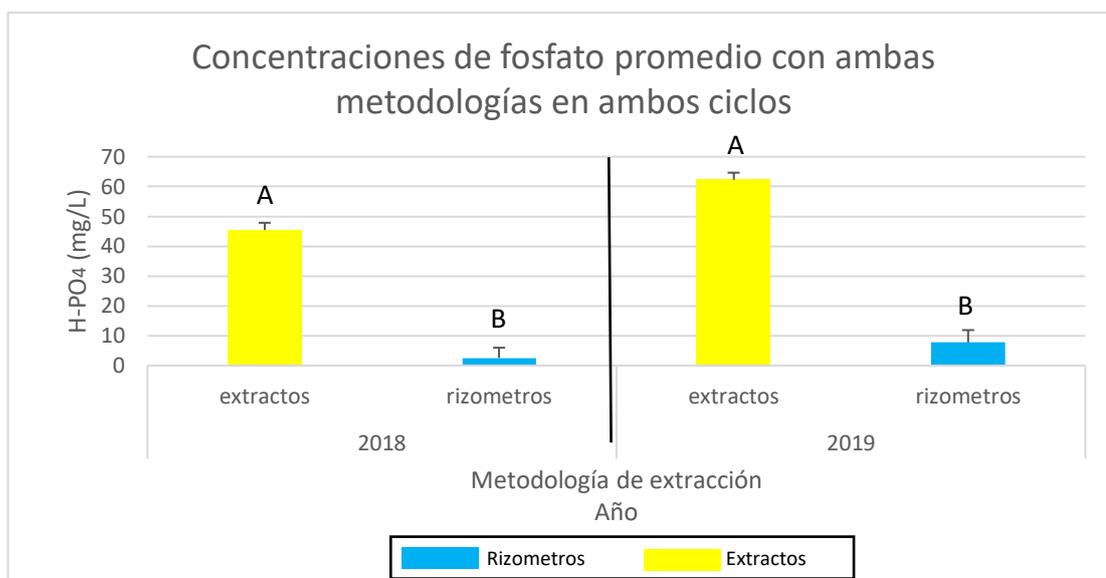


Figura 4.13: Concentraciones promedio de H-PO₄ (mg/L), obtenidas para ambos ciclos, aplicando ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos). Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Finalmente, los promedios generales de ambos ciclos considerando ambas metodologías han dado valores de 31,54 mg/L para el primero y 48,66 mg/L para el segundo, con diferencia significativa entre ambos (valor $p = 0,0002$). Dichos valores se encuentran rondando los valores del rango establecido para los suelos de la zona (entre 5 y 40 mg/L; Lloveras y Castro, 2008; Armentano, 2012; Rozas et al., 2012; Mazzilli et al., 2016; Berardo et al., 2019; Frayssinet et al., 2019), y a pesar de haber presentado diferencia significativa entre los mismos luego de cada cosecha, continuaron manteniendo valores para cubrir con suficiencia la demanda de P en ambos ciclos. Cabe resaltar que en este caso el menor contenido detectado durante el primer año de H-PO₄ coincide con la máxima de SiO₂, siendo explicado por los resultados obtenidos de los extractos, como puede apreciarse en el gráfico de combinación de ambos elementos (Fig. 4.12). Se destaca dicha relación opuesta observada, dado que la misma sustenta lo registrado por varios autores tanto a nivel mundial como local y su relación respecto de las concentraciones disponibles de cada uno dentro del suelos.

4.3.5.3 Concentración de cobre en la solución de los suelos

4.3.5.3.1. Ciclo de cultivo 2018

Analizado la concentración de Cu mediante los rizómetros (Cuadro 4.7) se observó que dentro de los dos primeros estadios los tratamientos disminuyen sustancialmente desde los 0-15 cm hacia la base del horizonte A, exceptuándose el tratamiento que recibió Si, que presenta valores cercanos en el estadio reproductivo pero que finalizan con su máximo en la mayor profundidad analizada. Por último, puede verse que en el estadio madurativo y al adentrarnos en profundidad los valores registrados aumentan dentro de todos los tratamientos, salvo para los que recibieron Si+Cu y Cd, que disminuyen. Los análisis estadísticos no evidencian efecto sobre el contenido de cobre detectado en los distintos tratamientos entre los diferentes momentos evaluados como así tampoco entre las profundidades analizadas (valores $p > 0,05$).

Cuadro 4.7: Concentraciones de cobre (mg/L) en las soluciones del suelo, extraídas con rizómetros, para cada uno de los estadios y a las diferentes profundidades de colecta en el ciclo de cultivo del 2018. Abreviatura: sm: sin muestra; nd: no detectable.

Cu (mg/L)	Profundidad	Control	Si	Cu	Si+Cu	Cd	Si+Cd
Vegetativo	5cm	0,106	0,056	sm	nd	0,037	0,049
	15cm	0,056	0,091	nd	nd	0,038	0,026
	23cm	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Reproductivo	5cm	0,054	0,036	nd	0,074	0,041	nd
	15cm	0,019	0,022	sm	0,042	0,065	0,023
	23cm	nd	0,046	nd	nd	nd	nd
Madurativo	5cm	0,037	0,024	0,062	0,112	0,058	0,043
	15cm	0,027	0,038	0,109	0,051	0,034	0,042
	23cm	0,062	0,051	0,056	0,062	0,049	0,05

Por lo anteriormente expuesto, se evalúan los valores promedio en todo el epipedón para cada estadio, los cuales han sido mayores en el momento inicial del ciclo respecto del final, siendo los mismos: 0,0577 mg/L para el estadio vegetativo 0,0424

mg/L para el estadio reproductivo y 0,0544 mg/L para el madurativo (valor $p = 0,2427$). Dichos resultados, no respaldan los visualizado al considerar los valores obtenidos, sobre el contenido de acumulación total detectado entre estadios, ya que los primeros no han podido detectar cantidades en todas las muestras analizadas, mientras que en el último estadio si lo han hecho.

Las concentraciones de Cu dentro del estadio madurativo evaluado por profundidades (Fig. 4.14) han registrado con ambas metodologías patrones similares entre los tratamientos, sin presentar diferencias significativa alguna (valores $p > 0,05$) pero sí en la interacción de los mismos considerando los profundidades, proveniente de la solución de los rizometros (valores p en Cuadro 4.9 y 4.10 en el Apéndice). En este caso puede verse que los tratamientos Si y Si+Cu han mostrado valores diferentes entre sí al considerar el nivel superior, poseyendo valores similares con el tratamiento control en el nivel medio con lo registrado para el nivel superior del Si, pero sin poseer diferencia significativa alguna para con el resto de los niveles evaluados.

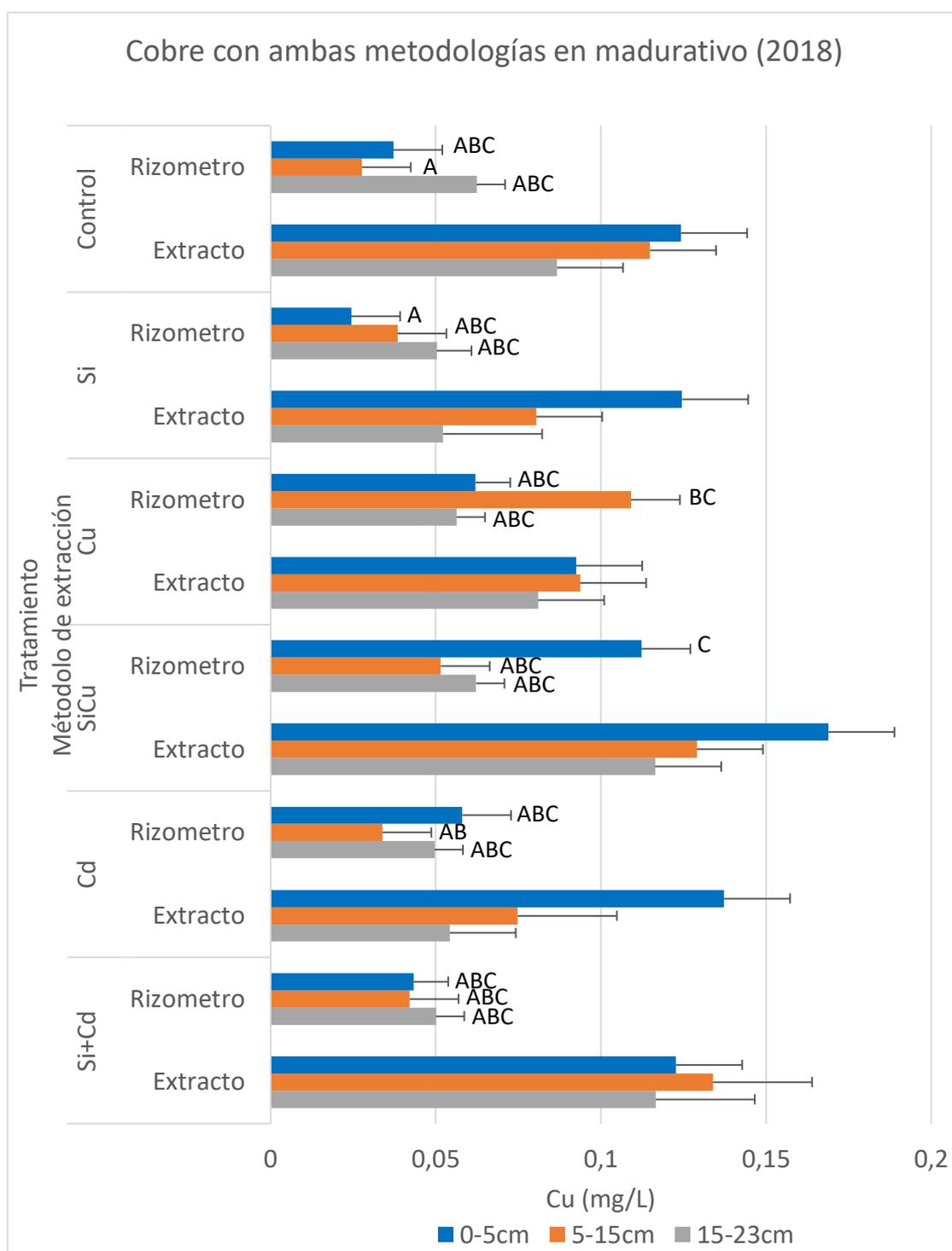


Figura 4.14: Concentración de cobre (mg/L) obtenida con ambas metodologías de extracción (rizómetros y extractos) registradas en el estadio madurativo del ciclo de cultivo 2018, a lo largo de las distintas profundidades. Letras diferentes indican diferencias significativas (valores $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Los extractos disminuyen la concentración de Cu detectado a medida que profundizamos en el horizonte A, siendo sus promedios de 0,128 mg/L en superficie,

seguido por el medio con 0,104 mg/L y finalmente en la base con 0,084 mg/L presentando diferencias significativas este último respecto del inicial (valor $p = 0,0054$). Los rizometros presentaron tenores similares a lo largo del epipedón, con valores promedios que rondan en las 3 profundidades los 0,05 mg/L (siendo los mismos: 0,0553 mg/L para el más superficial, de 0,0504 para el medio y finalmente de 0,0554 mg/L para el más profundo) (valor $p = 0,8782$). Comparando entre metodologías dentro de la misma profundidad se observó que han dado siempre superiores las concentraciones de los extractos respecto de los rizometros, con diferencias significativas en cada uno de los niveles (valores $p < 0,05$), siéndolo en cantidades de 0,0732 mg/L para el nivel superficial, mientras que en el medio fueron de 0,0541 mg/L más y finalmente en la base del horizonte de 0,0291 mg/L.

4.3.5.3.2. Ciclo de cultivo 2019

A continuación, se observa que los datos de Cu obtenidos por los rizometros en 2019 (Cuadro 4.8) el tratamiento Control fue el único que arrojó valores en estadio reproductivo, presentado concentraciones sumamente similares entre profundidades. Por su parte, los del estadio madurativo se ve que son menores dentro de cada nivel a los del estadio reproductivo registrados, viéndose que disminuye de los 5 cm hacia las mayores profundidades, exceptuando al Si+Cd, que se casi se duplica en la base del epipedón al compararse con sus valores más superficiales. Se han realizado análisis estadísticos y no se ha detectado efecto sobre el contenido de cobre detectado en los distintos tratamientos entre los diferentes momentos y profundidades evaluados (valor $p = 0,3934$).

Cuadro 4.8: Concentraciones de cobre (mg/L) presentes en las soluciones del suelo extraídas mediante rizometros, para cada uno de los estadios (que han colectado volumen necesario) y en las distintas profundidades de colecta a lo largo del ciclo de cultivo del 2019. Abreviatura: nd: no detectable. Letras distintas indican diferencias significativas de las medias entre estadios (valor $p < 0,05$).

Cu (mg/L)	Profundidad	Control	Si	Cu	Si+Cu	Cd	Si+Cd
Reproductivo (a)	5cm	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	15cm	0,142	nd	nd	nd	nd	nd
	23cm	0,131	nd	nd	nd	nd	nd
Madurativo (b)	5cm	0,048	0,041	0,073	0,055	0,048	0,065
	15cm	0,037	0,037	nd	0,041	0,067	0,043
	23cm	nd	nd	0,069	nd	nd	0,103

Ahondando en los valores promedio puede verse que todos los tratamientos han arrojado valores mayores en estadio reproductivo respecto del madurativo, siendo los mismos: 0,136 mg/L y 0,057 mg/L, y presentando diferencias significativas (valor $p = 0,0005$). Dichos resultados, no respaldan lo visualizado al considerar los valores obtenidos, sobre el contenido de acumulación total detectado entre estadios, ya que en el estadio reproductivo no se han podido detectar cantidades en todas las muestras analizadas, mientras que en el último estadio lo han hecho en mayor medida.

A continuación, se presentarán los resultados del estadio madurativo (Fig. 4.15), donde se observa que la concentración de Cu en la solución del suelo presenta valores muy similares entre lo detectado por los rizometros y los extractos y que en ninguno de los casos se ha presentado diferencia significativa alguna (valores $p > 0,05$) como así tampoco en la interacción de los mismos considerando las profundidades (Cuadro 4.11 y 4.12 en el Apéndice).

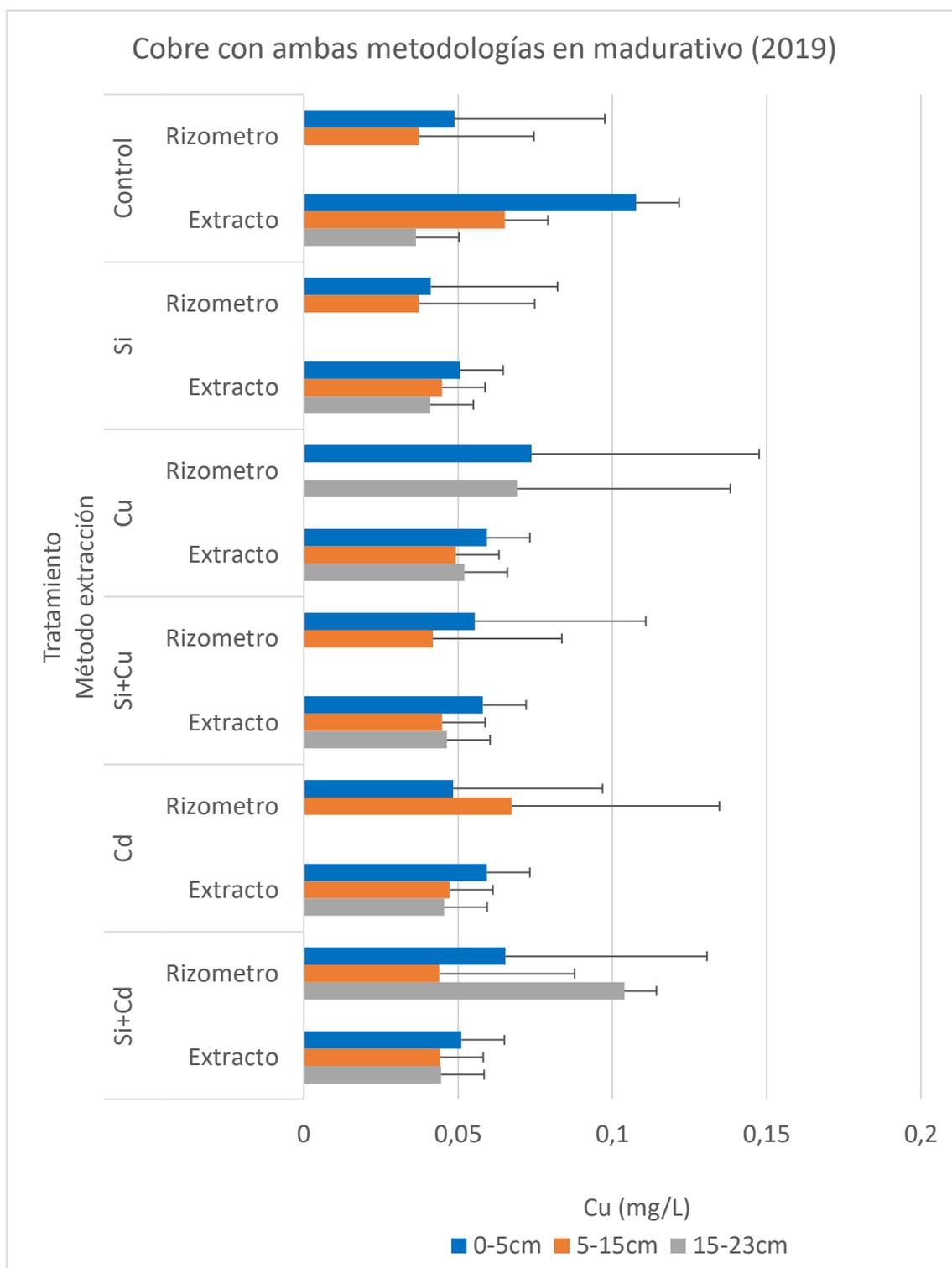


Figura 4.15: Concentración de cobre (mg/L) obtenida con ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos), registradas en el estadio madurativo del ciclo de cultivo 2019, a lo largo de las distintas profundidades. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Asimismo, se observa nuevamente que los valores detectados por los extractos disminuyen a medida que profundizamos en el horizonte A cayendo de 0,064 mg/L en

los primeros 5 cm, a 0,044 mg/L en la base del mismo con diferencias significativas entre ambos niveles (valor $p = 0,041$), habiendo pasado por 0,049 mg/L en la profundidad media. Por su parte, los rizómetros han mostrado resultados similares a lo largo de todo el horizonte, presentando nuevamente valores promedios mayores en el último nivel (0,092 mg/L) con diferencias significativas respecto de los dos superiores (valor $p = 0,0288$), con concentraciones de 0,049 mg/L en el nivel medio y de 0,052 mg/L en el más superficial. Finalmente, al comparar las metodologías usadas dentro de la misma profundidad se observó que dentro de los dos niveles superiores. los extractos no superan significativamente a los rizómetros, presentando diferencias de 0,012 mg/L y 0,0002 mg/L, respectivamente (valores $p > 0,05$), mientras que para la base son los rizómetros los que superan en 0,048 mg/L a los extractos, con diferencias significativas (valor $p < 0,0001$).

4.3.5.3.3. Comparación entre ambos ciclos

En el siguiente gráfico (Fig. 4.16) podrán verse los resultados de Cu (mg/L) promedio obtenidos para cada tratamiento realizado.

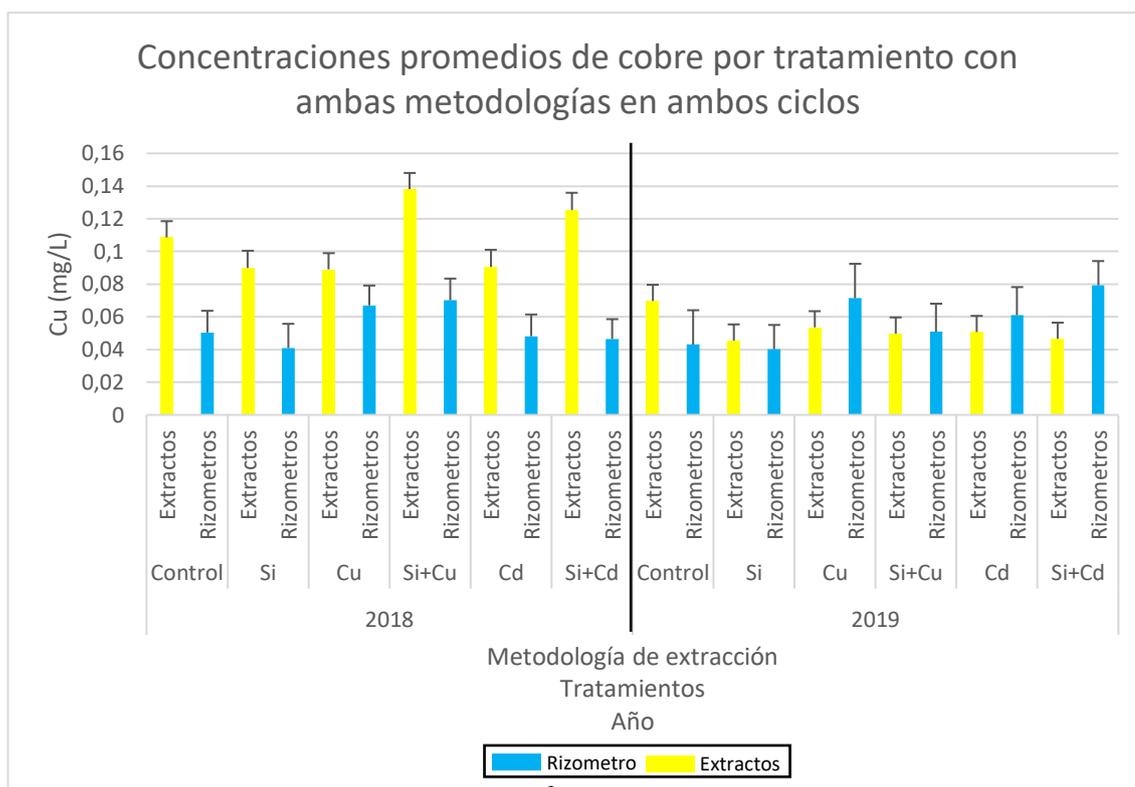


Figura 4.16: Concentraciones de Cu (mg/L) promedio obtenidas, agrupando las 3 profundidades y comparando ambos ciclos para cada tratamiento, en el estadio madurativo, utilizando ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos). Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

En este gráfico puede visualizarse como todos los valores detectados por los extractos en el primer ciclo han sido significativamente mayores que los de rizometros (valor $p < 0,0001$), mientras que los del segundo entre ambas metodologías son más cercanos (valor $p = 0,4440$). Por otro lado, al analizar las cantidades registradas por los extractos se ve que los del primer ciclo han duplicado a los del segundo (0,107 mg/L y 0,052 mg/L, respectivamente) (valor $p < 0,0001$), mientras que los de los rizometros han sido cercanos entre ambos ciclos, teniendo valores de (0,0544 mg/ y 0,0579 mg/L, respectivamente), (valor $p = 0,6085$). Cabe destacar que los extractos han detectado más en el primer ciclo probablemente porque han recibido mayores volúmenes de precipitación durante el mismo, lo que pudo haber favorecido una mayor disponibilidad del Cu en la solución del suelo.

Los promedios de Cu (mg/L) obtenidos por cada profundidad (Fig. 4.17), muestran valores mayores en los extractos detectados en el primer ciclo respecto los del segundo (valores $p < 0,0001$), siendo de 0,064 mg/L para el nivel más superficial; de 0,055 mg/L para el medio y de 0,04 mg/L para el más profundo. Por su parte los rizometros han mostrado diferencias superiores para el primer ciclo respecto del segundo en los niveles más superficiales, arrojando diferencias de: 0,003 mg/L para los primeros 5cm y de 0,001 mg/L para el nivel medio; mientras que para el nivel inferior del horizonte A, se detectaron valores significativamente más elevados en el 2019 respecto del 2018 siendo dicha diferencia de 0,037 mg/L (valor $p = 0,0013$).

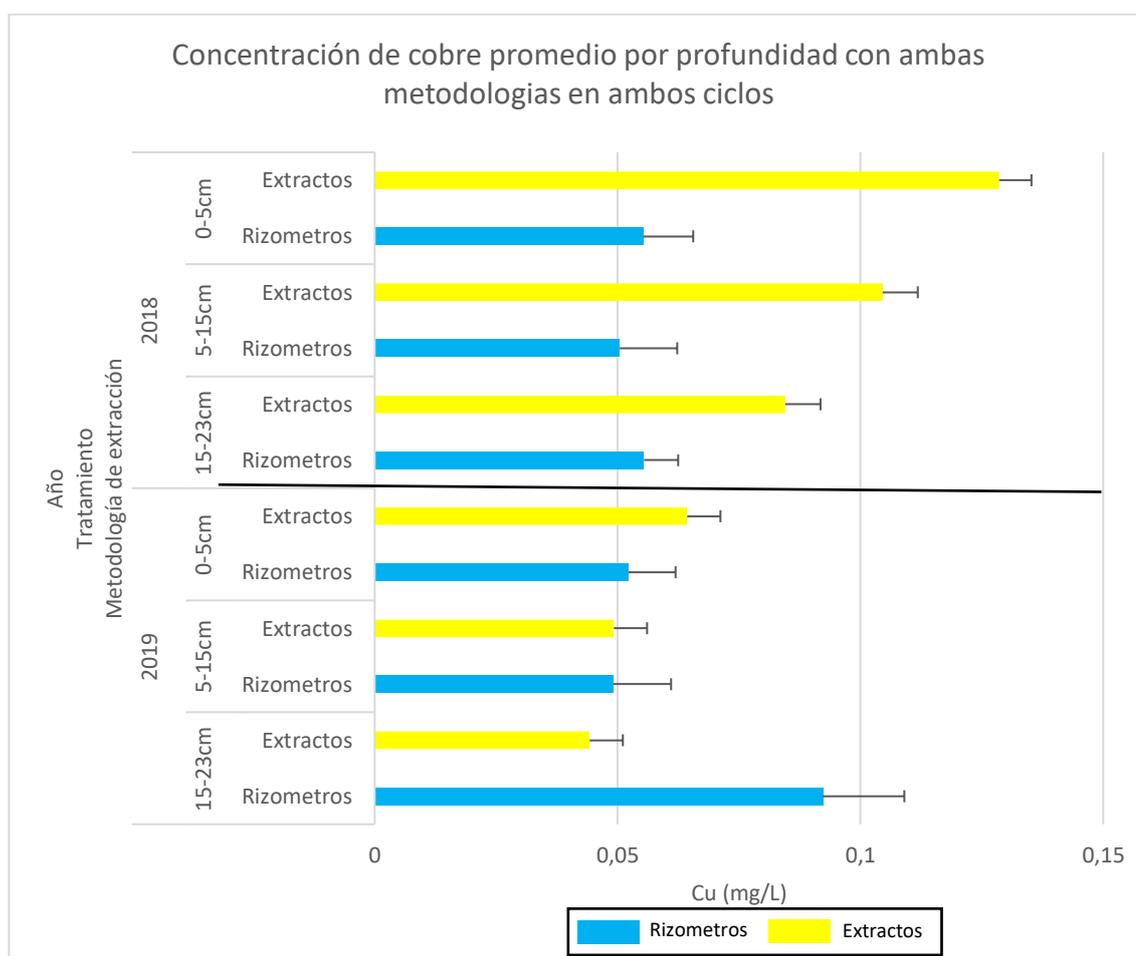


Figura 4.17: Concentraciones promedios de Cu (mg/ L) obtenidas agrupando todos los tratamientos para el estadio madurativo, por profundidad, para cada ciclo, aplicando ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos). Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

4.3.5.3.3.1. Relación entre las concentraciones de dióxido de silicio y cobre

A continuación, se verá un gráfico que combina los valores promedio obtenidos dentro del estadio madurativo por tratamiento de SiO₂ (mg/L) y Cu (mg/L) detectados con ambas metodologías en ambos ciclos (Fig. 4.18).

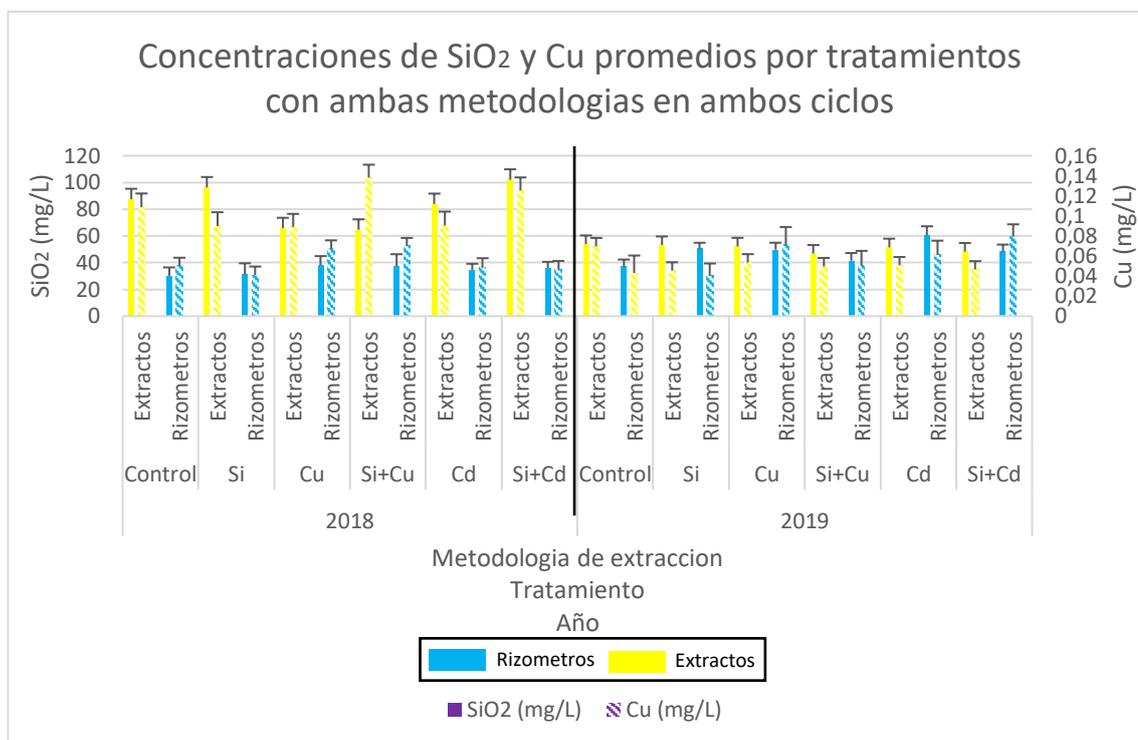


Figura 4.18: Concentraciones de SiO₂ (mg/L) y Cu (mg/L) promedio obtenidas, agrupando las 3 profundidades y comparando ambos ciclos para cada tratamiento, en el estadio madurativo, utilizando ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos). Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Puede verse que los valores arrojados SiO₂ y Cu tanto por los rizometros como por extractos demuestran patrones de acumulación similares en términos proporcionales para ambos ciclos. Se exceptúan de dichos patrones, los extractos de los tratamientos Si y Si+Cu del 2018 dado que presentan valores más distantes entre sí, pero lo hacen siguiendo una lógica comprensible, donde el contenido de SiO₂ registrado supera al de Cu en el tratamiento que recibió Si, mientras que el contenido de Cu supera al de SiO₂ en el tratamiento de Si+Cu. Pudiéndose en este último inferir que la adición cobre junto con el silicio estaría favoreciendo la permanencia del micronutriente en la solución del suelo

y consecuentemente, la posible captura por parte de la planta en caso de necesitarlo. Al mismo tiempo puede verse que al comparar ambos ciclos, los rizómetros han detectado mayores cantidades de ambos elementos en la solución del suelo del segundo ciclo respecto del primero, ascendiendo las mismas de 0,0544 mg/L a 0,0579 mg/L para el Cu y de 33,29 a 47,48 mg/L de SiO₂. Por su parte los extractos han detectado menores valores en el último ciclo respecto del primero tanto de dióxido de Si (cayendo de 83,35 mg/L a 50,99 mg/L) como de Cu (pasando de 0,107 mg/L a 0,052 mg/L).

Si bien en síntesis se puede apreciar que no hubo efecto significativo de los tratamientos aplicados, se observaron ciertos resultados interesantes. Entre ellos, que los rizómetros han presentado una tendencia al descenso en las concentraciones de Cu registrados en ambos ciclos a lo largo de su desarrollo. Por otra parte, los rizómetros en ambos ciclos han presentado valores mayores en profundidad respecto de la superficie mientras que los extractos lo hicieron a la inversa. Esta dinámica encontrada podría explicarse nuevamente por una mayor actividad radicular o bien por los cambios texturales, los cuales podrían estar teniendo implicancia sobre la captura por parte de los rizómetros pero no sobre la metodología más invasiva que se realiza en el laboratorio. Asimismo, se aprecia que los valores promedio de Cu registrados para el primer ciclo fueron siempre significativamente mayores en los extractos respecto de los rizómetros (valor $p < 0,0001$), mientras que para el 2019 se comportaron de manera inversa, pero sin presentar diferencia significativa (valor $p = 0,4440$) (Fig. 4.19).

Nuevamente se destaca la necesidad de realizar ensayos a campo para poder evaluar la posibilidad de los procesos aquí planteados.

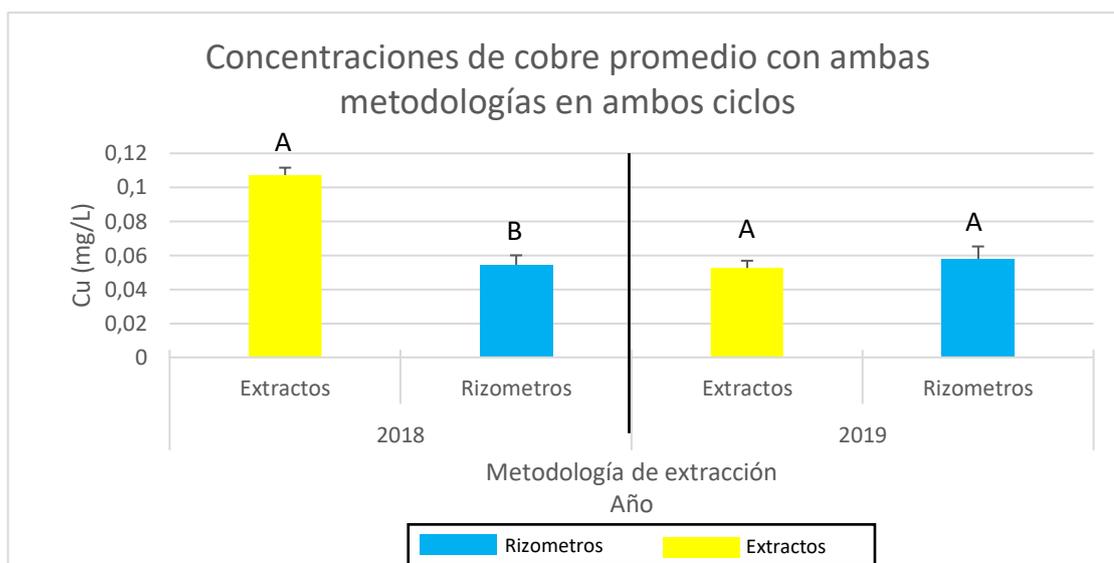


Figura 4.19: Concentraciones promedio de Cu (mg/L), obtenidas para ambos ciclos, aplicando ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos). Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Finalmente, los promedios generales de ambos ciclos considerando ambas metodologías han dado valores superiores para el primero 0,0873 mg/L respecto del segundo de 0,0539 mg/L, presentado diferencia significativa (valor $p < 0,0001$), dando la idea de que las cantidades de Cu en las soluciones del horizonte A de los Argiúoles típicos del sudeste bonaerense, se podrían haber visto modificadas por la posible mayor demanda de las plantas en dicho ciclo. Considerando que el Cu es un micronutriente y que durante el 2019 se ha presentado un desarrollo superior respecto del 2018, la necesidad de mayores concentraciones de Cu por parte de la planta para poder cubrir los procesos fisiológicos necesarios puede haber sido la causante de la disminución del mismo en la solución del suelo generando una diferencia estadísticamente relevante entre ambos ciclos luego de la cosecha. Finalmente, cabe destacar que los mencionados valores promedios son inferiores a los establecidos a nivel mundial y dentro del área (Almaroai et al., 2012; Frayssinet et al., 2023), considerando los trabajos que no han sido realizados en suelos afectados por minería o bien por aplicaciones elevadas de Cu, dado que no son

útiles para establecer comparaciones con los ensayos aquí realizados ni se asemejan a las situaciones de los campos cultivados del sudeste bonaerense. Pudiendo entre ellas mencionarse las publicaciones de Lavado y colaboradores (2004), Manassero y colaboradores (2013), Roca (2015), entre otras.

4.3.5.4 Concentración de cadmio en la solución del suelo

4.3.5.4.1. Ciclo de cultivo 2018

Analizado la concentración de Cd mediante los rizómetros se han podido detectar algunos valores de Si+Cd y uno del Control (Cuadro 4.9). Puede verse que los mismos disminuyen sustancialmente desde los primeros 5 cm hacia la base del epipedón. En este caso no se ha detectado efecto significativo sobre el contenido cadmio detectado en los distintos estadios y profundidades analizadas (valores $p > 0,05$).

Cuadro 4.9: Concentraciones de cadmio (mg/L) en las soluciones del suelo, extraídas con rizómetros, para cada uno de los estadios y a las diferentes profundidades de colecta en el ciclo de cultivo del 2018. Abreviatura: sm: sin muestra; nd: no detectable.

Cd (mg/L)	Profundidad	Control	Si	Cu	Si+Cu	Cd	Si+Cd
Vegetativo	5cm	nd	nd	sm	sm	nd	0,0154
	15cm	nd	nd	sm	sm	nd	0,0239
	23cm	sm	sm	sm	sm	sm	sm
Reproductivo	5cm	nd	nd	sm	nd	nd	sm
	15cm	nd	nd	sm	nd	nd	0,0065
	23cm	sm	nd	sm	sm	sm	sm
Madurativo	5cm	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	15cm	nd	nd	nd	nd	nd	0,0009
	23cm	0,0015	nd	nd	nd	nd	nd

Analizado los valores promedio, se observa que decrecen entre estadios, pasando de 0,01961 mg/L en estadio vegetativo a 0,00649 mg/L en estadio reproductivo y finalizando con 0,00119 mg/L en el estadio madurativo (valor $p = 0,0926$). Dichos resultados, respaldan los visualizado al considerar los valores obtenidos, sobre el contenido de acumulación total detectado entre estadios Cabe resaltar que la presencia del Cd ha sido detectada mayormente en el tratamiento que recibió Si+Cd, dando una idea

de posible efecto del agregado de Cd que al estar en presencia de Si se quedaría en la solución del suelo evaluado.

Las concentraciones de Cd detectados por los extractos en el estadio madurativo (Fig. 4.20), han presentado valores menores en el nivel medio respecto de los dos restantes, exceptuando de dicho patrón a los tratamientos Si y Si+Cu, dado que presentan sus mínimos en el nivel más profundo. Con esta metodología los tratamientos evaluados no han presentado diferencia significativa alguna (valor $p = 0,1351$) como así tampoco en la interacción de los mismos considerando las profundidades, para las soluciones provenientes de los extractos (Cuadro 4.13 en el Apéndice y sin datos para realizar el ANAVA correspondiente a las soluciones de los rizometros).

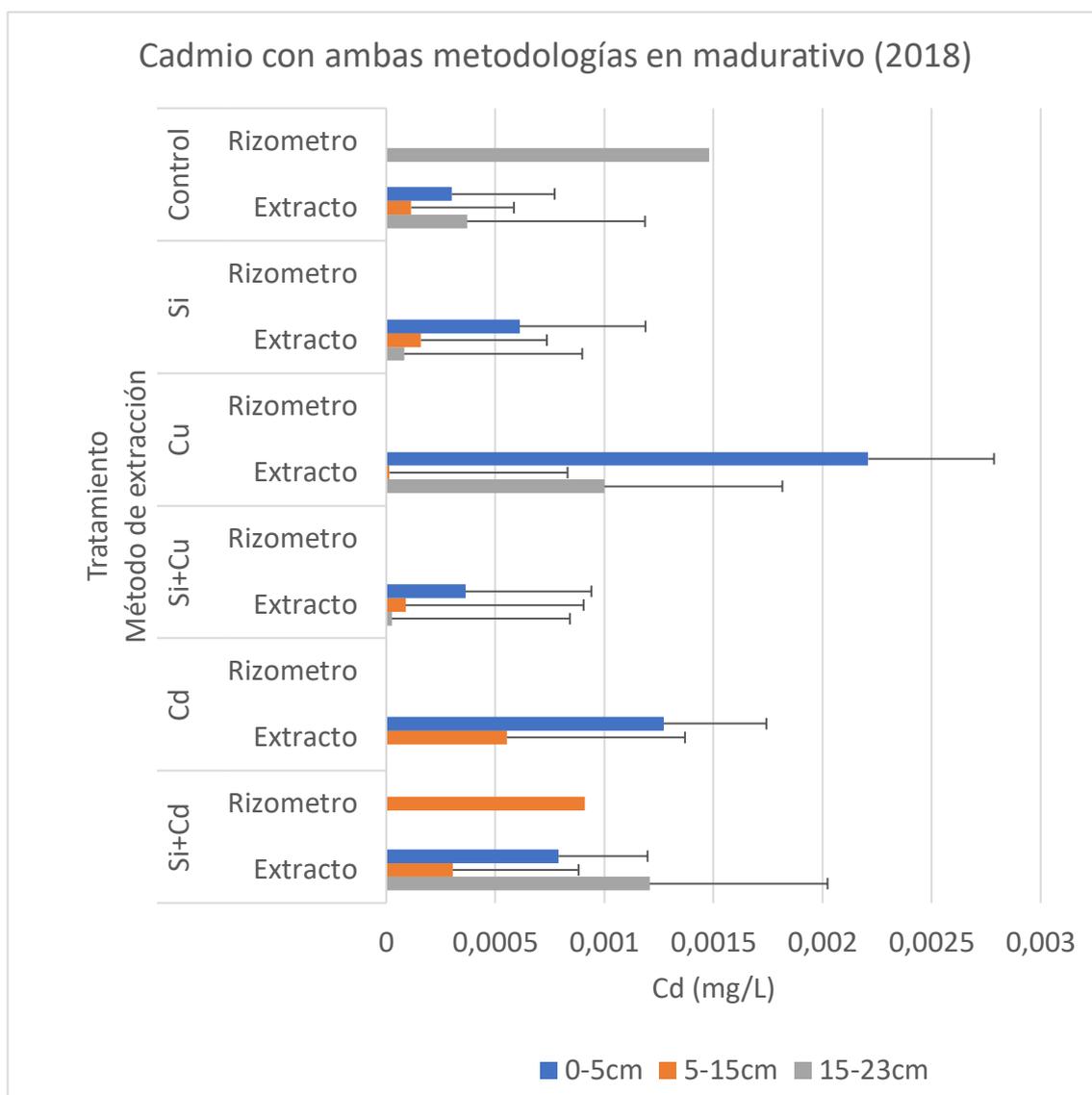


Figura 4.20: Concentración de cadmio (mg/L) obtenida con ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos) registradas en el estadio madurativo del ciclo de cultivo 2018, a lo largo de las distintas profundidades. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Lo valores promedio de los extractos son superiores en el nivel superficial (0,00089 mg/L), seguidos por la base (0,000537 mg/L) y con el nivel medio presentando el mínimo (0,000193 mg/L) (valor $p = 0,0935$). Respecto a los rizometros se ha visto que los valores detectados en el nivel medio fueron casi duplicados por lo detectado en el de mayor profundidad. Comparando entre metodologías dentro de la misma profundidad se observó que han dado superiores las concentraciones de los rizometros respecto de lo extractos, siéndolo en cantidades de 0,000717 mg/L para el nivel medio (valor $p =$

0,0065), mientras que en la base fue de 0,000943 mg/L (valor $p= 0,1832$), no habiendo comparado el más superficial dado que no hay datos de rizómetros para dicho nivel.

4.3.5.4.2. Ciclo de cultivo 2019

A continuación, se observarán los datos de los rizómetros, donde nuevamente se han obtenido escasos resultados, siendo los tratamientos anteriores (Control y Si+Cd) y en este caso incorporándose el de Cd (Cuadro 4.10), los que han presentado alguna concentración. Se observa que los del Control aumentan con el paso del tiempo, mientras que dentro del estadio madurativo son variables. Nuevamente no se ha detectado alguna diferencia destacable sobre el contenido de cadmio detectado en los distintos estadios y profundidades analizadas (valores $p > 0,05$).

Cuadro 4.10: Concentraciones de cadmio (mg/L) en las soluciones del suelo, extraídas con rizómetros, para cada uno de los estadios y a las diferentes profundidades de colecta en el ciclo de cultivo del 2019. Abreviatura: sm: sin muestra; nd: no detectable.

Cd (mg/L)	profundidad	Control	Si	Cu	Si+Cu	Cd	Si+Cd
Reproductivo	5cm	sm	sm	sm	sm	sm	sm
	15cm	0,00069	sm	sm	sm	nd	sm
	23cm	nd	sm	sm	sm	sm	sm
Madurativo	5cm	0,00141	nd	nd	nd	nd	0,00014
	15cm	nd	nd	nd	nd	0,00038	nd
	23cm	sm	sm	nd	nd	sm	nd

Los valores promedio muestran una disminución entre ambos estadios, pasando de 0,0006857 mg/L en estadio reproductivo a 0,0005754 mg/L en estadio madurativo (valor $p = 0,8742$). Dichos resultados, respaldan los visualizado al considerar los valores obtenidos, sobre el contenido de acumulación total detectado entre estadios Nuevamente cabe destacar que en este caso además del Control, presentaron contenido los tratamientos que han recibido Cd solo o bien combinado.

A continuación, se observa que la concentración de Cd en la solución del suelo de los extractos dentro del estadio madurativo no se ha podido detectar en todas las profundidades (Fig. 4.21), habiendo presentado 1 o 2 valores por tratamiento analizado. En este caso lamentablemente tampoco es posible realizar análisis estadístico completo, dada la escasez de datos de que poseemos durante este último ciclo. De todos modos, se han realizado los promedios y se ha observado que los tratamientos no presentan diferencias importantes entre si (valor $p = 0,8451$) como así tampoco en la interacción de los mismos considerando las profundidades (Cuadro 4.14 en el Apéndice y sin datos para realizar el ANAVA correspondiente a las soluciones de los rizometros).

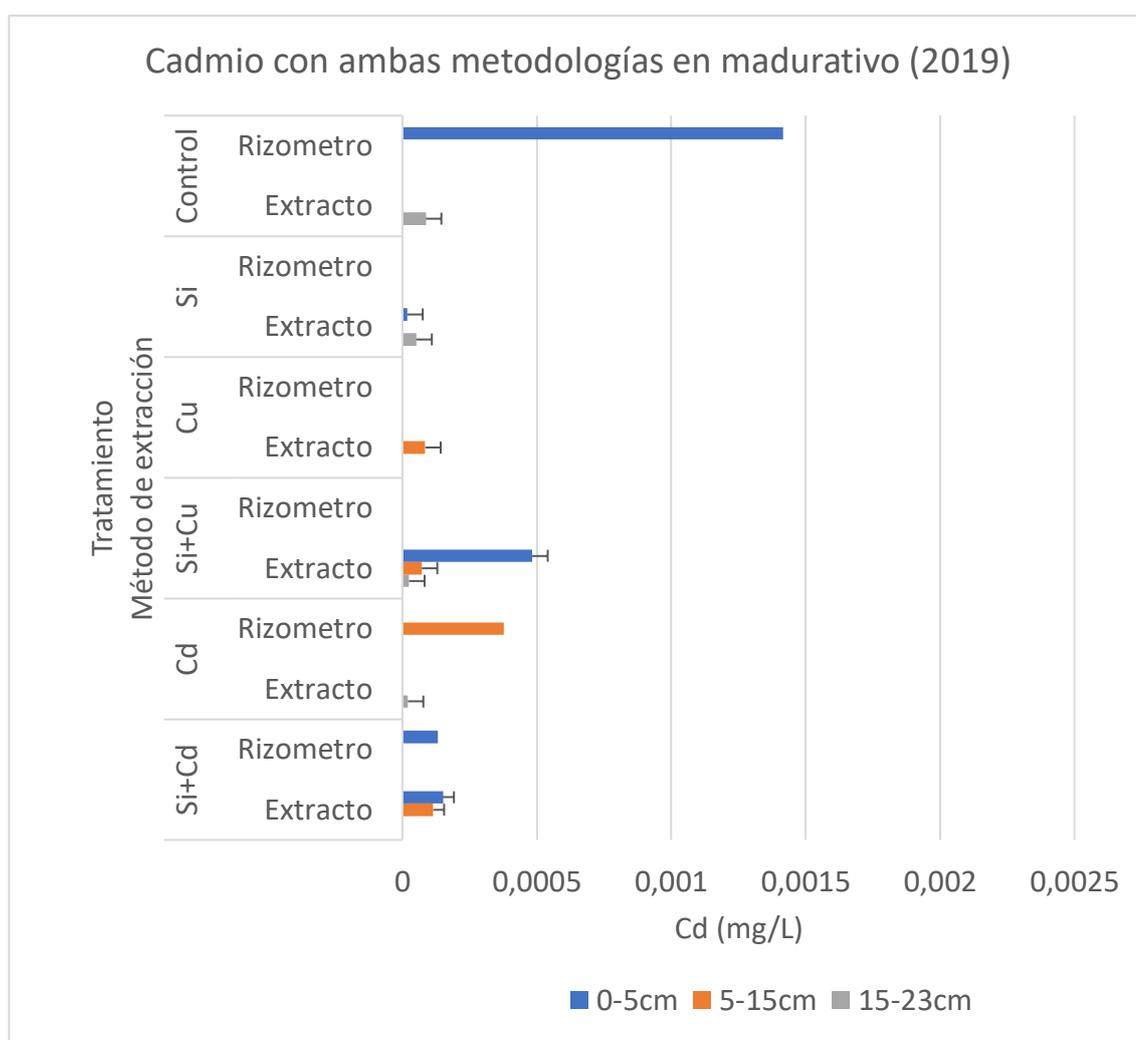


Figura 4.21: Concentración de cadmio (mg/L) obtenida con ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos) registradas en el estadio madurativo del ciclo de cultivo 2019, a lo largo de las distintas profundidades. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

En este caso los valores de los rizómetros han sido superiores a los determinados por los extractos, salvo para el caso del nivel superficial de Si+Cd, ya que es el único de los extractos que supera al menor valor detectado por el rizómetro. En este ciclo se observan valores muy variables, pero ambas metodologías presentan valores promedio decrecientes al descender en las profundidades. Los extractos han registrado valores de 0,0002 mg/L en los primeros 5 cm, luego 0,000096 mg/L en el intermedio y finalmente 0,000046 mg/L en el final (valor $p = 0,2301$), mientras que los rizómetros lo han hecho con 0,00077 mg/L para el nivel más superficial y 0,00037mg/L para el intermedio, sin haber detectado en las profundidades (valor $p = 0,5998$). Finalmente, al comparar las metodologías usadas dentro de la misma profundidad se observó que los rizómetros han detectado más que los extractos, dentro de los primeros 5cm se distinguen en 0,00057 mg/L (valor $p = 0,2449$), mientras que para la profundidad intermedia lo hacen en 0,000274 mg/L (valor $p = 0.0019$).

4.3.5.4.3. Comparación entre ambos ciclos

En el siguiente gráfico (Fig. 4.22) podrán verse los resultados de Cd (mg/L) promedio obtenidos para cada tratamiento realizado.

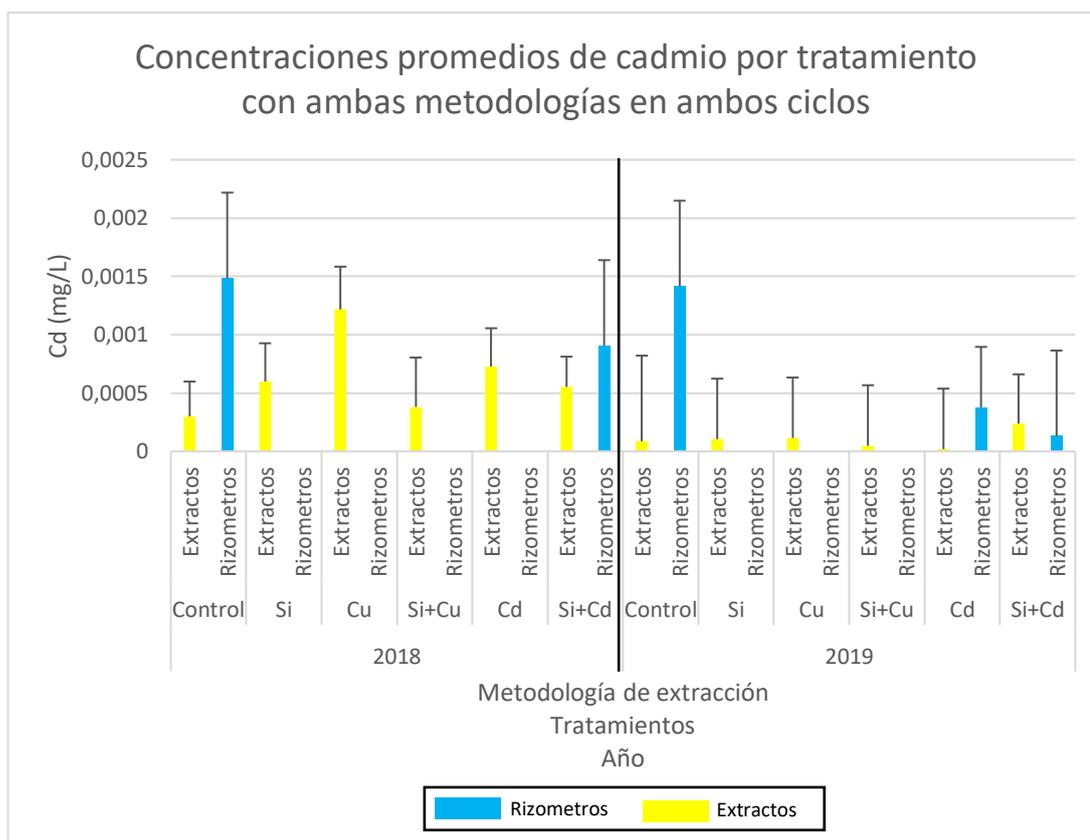


Figura 4.22: Concentraciones de Cd (mg/L) promedio obtenidas, agrupando las 3 profundidades y comparando ambos ciclos para cada tratamiento, en el estadio madurativo, utilizando ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos). Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Dentro de las cantidades registradas por los extractos y los rizometros, se ve que los del primer ciclo han sido mayores que los del segundo, habiendo detectado los de extractos 0,0006 mg/L y 0,0001 mg/L, respectivamente (valor $p = 0,0418$), mientras que los de los rizometros han sido 0,0012 mg/L y 0,00057 mg/L, respectivamente (valor $p = 0,2527$). Dichos valores pueden deberse a las lluvias registradas durante el primer ciclo, que al haber sido mayores que las del segundo pueden haber promovido la disponibilidad de este elemento en la solución del suelo, sin haber sido captado por las plantas, permitiendo entonces su determinación dentro del laboratorio.

Al evaluar por profundidad los promedios de Cd (mg/L) obtenidos con ambas metodologías (Fig. 4.23), se observan valores mayores en los extractos detectados para el primer ciclo respecto del segundo (valores $p > 0,05$) siendo sus diferencias de 0,00069

mg/L para el nivel más superficial; de 0,000097 mg/L para el medio y de 0,000551 mg/L para el más profundo. Por su parte, los rizometros han mostrado valores dentro de ambos ciclos únicamente para el nivel medio, siendo nuevamente superiores las del primero respecto del segundo en cantidades de 0,000347 mg/L.

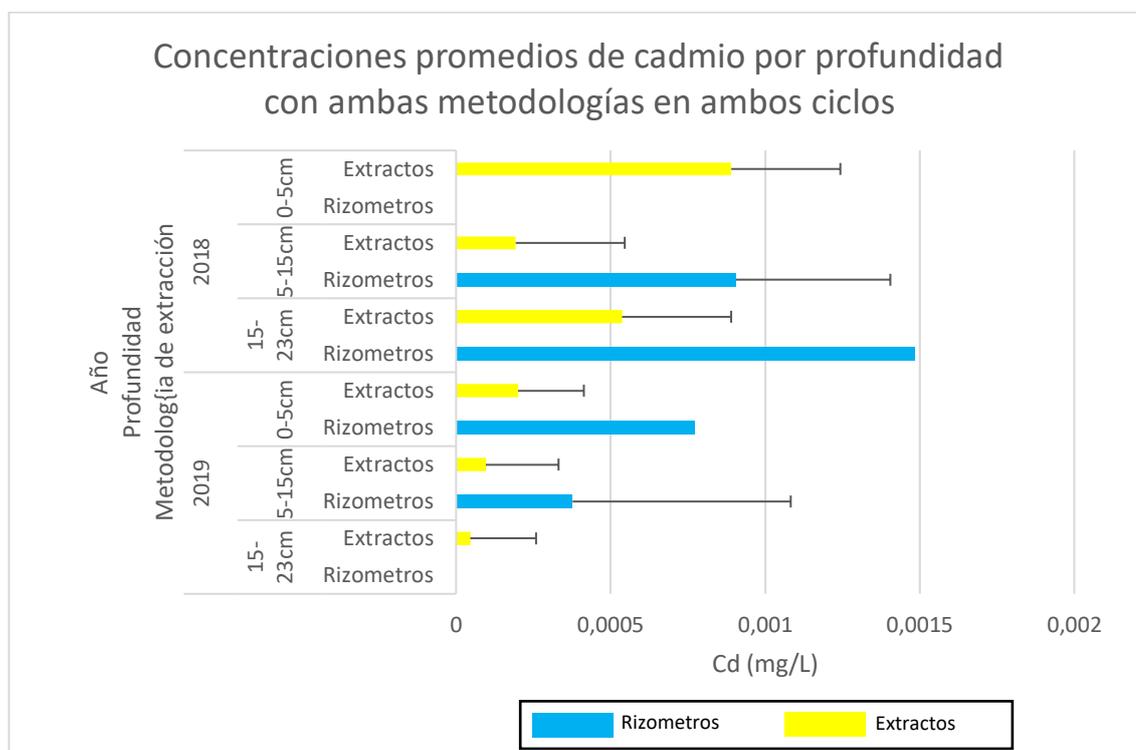


Figura 4.23: Concentraciones promedios de Cd (mg/ L) obtenidas agrupando todos los tratamientos para el estadio madurativo, por profundidad, para cada ciclo, aplicando ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos). Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

4.3.5.4.3.1. Relación entre las concentraciones de dióxido de silicio y cadmio

A continuación, se verá un gráfico que combina los valores promedio obtenidos dentro del estadio madurativo por tratamiento de SiO₂ (mg/L) y Cd (mg/L) detectados con ambas metodologías en ambos ciclos (Fig. 4.24).

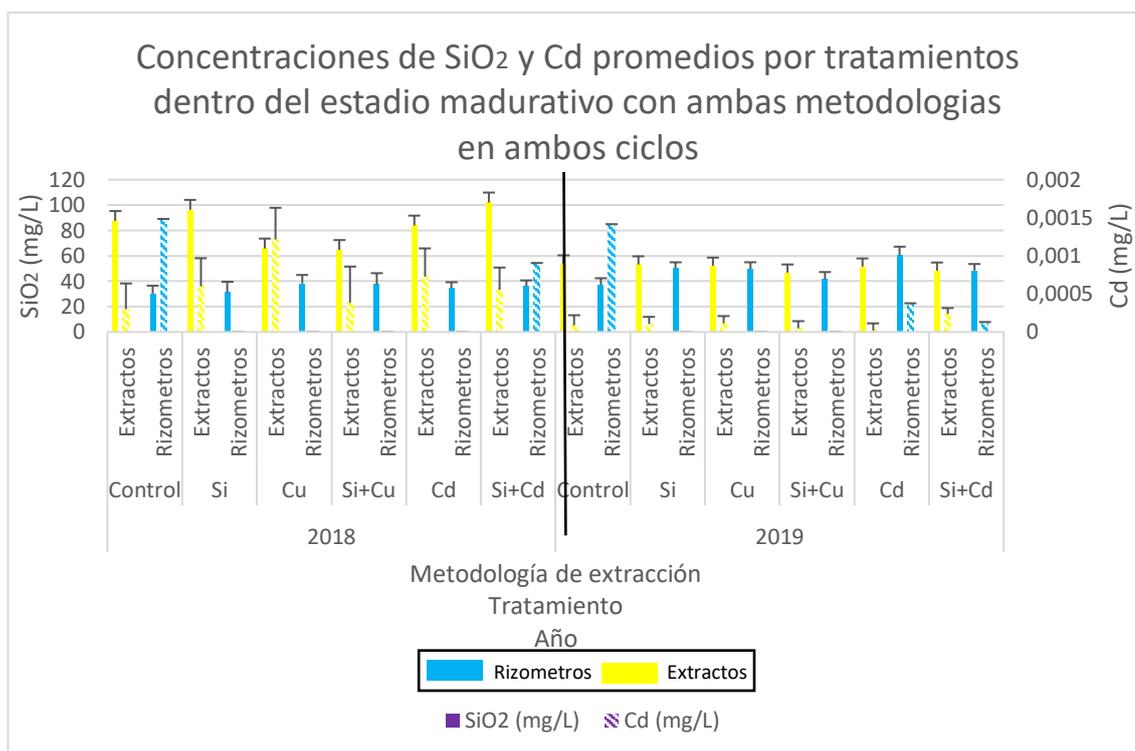


Figura 4.24: Concentración de SiO₂ (mg/L) y Cd (mg/L) promedio obtenidas, agrupando las 3 profundidades y comparando ambos ciclos para cada tratamiento, en el estadio madurativo, utilizando ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos). Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Puede verse que los pocos valores arrojados SiO₂ y Cd para ambas metodologías y en ambos ciclos no muestran tendencia alguna. Sin embargo, al comparar ambos ciclos, los rizometros han presentado relaciones inversas de ambos elementos en la solución del suelo, es decir el contenido de SiO₂ ascendió desde el primer ciclo hacia el segundo (de 33,29 a 47,48 mg/L de SiO₂), mientras que el de Cd disminuyó (de 0,0012 mg/L a 0,00057 mg/L de Cd). Por su parte, los extractos han detectado menores valores tanto de dióxido de Si (cayendo de 83,35 mg/L a 50,99 mg/L) como así también de Cd (pasando de 0,0006 mg/L a 0,0001 mg/L) en el último ciclo respecto del primero.

Si bien en síntesis se puede apreciar que no hubo efecto significativo de los tratamientos aplicados, si se han observado resultados interesantes. Uno de ellos, es que los rizometros han presentado una tendencia al descenso en las concentraciones de Cd registrados en ambos ciclos. Otro dato relevante es que en ambos ciclos se han registrado

con ambas metodologías sus mayores concentraciones en la superficie, excluyéndose únicamente los rizómetros del primer ciclo que lo han hecho a la inversa. La diferencia detectada entre niveles de profundidad podría deberse a posibles procesos de adsorción o precipitación como así también a cambios texturales que favorecerían su complejación, lixiviación, etc., quitándolo consecuentemente de la solución del suelo disponible o bien por una mayor actividad radicular para la captación del Cd estando más cercana a la profundidad del epipedón mólico. Asimismo, se aprecia que los valores promedio de Cd registrados para ambos ciclos han sido superiores para los rizómetros respecto de los extractos, presentando diferencias mayores y significativas para el segundo ciclo (valor $p = 0,0150$) respecto del primero (valor $p = 0,3192$) (Fig. 4.25). Cabe destacar que dichos resultados, podrían verse explicados por el tipo de rizómetros utilizados (MOM), que ha sido particularmente diseñados para contar con mediciones más precisas de los metales pesados dentro de la solución del suelo adquirida por los mismos.

Cabe reiterarse que sería importante realizar ensayos a campo para poder evaluar la posibilidad de los procesos aquí planteados.

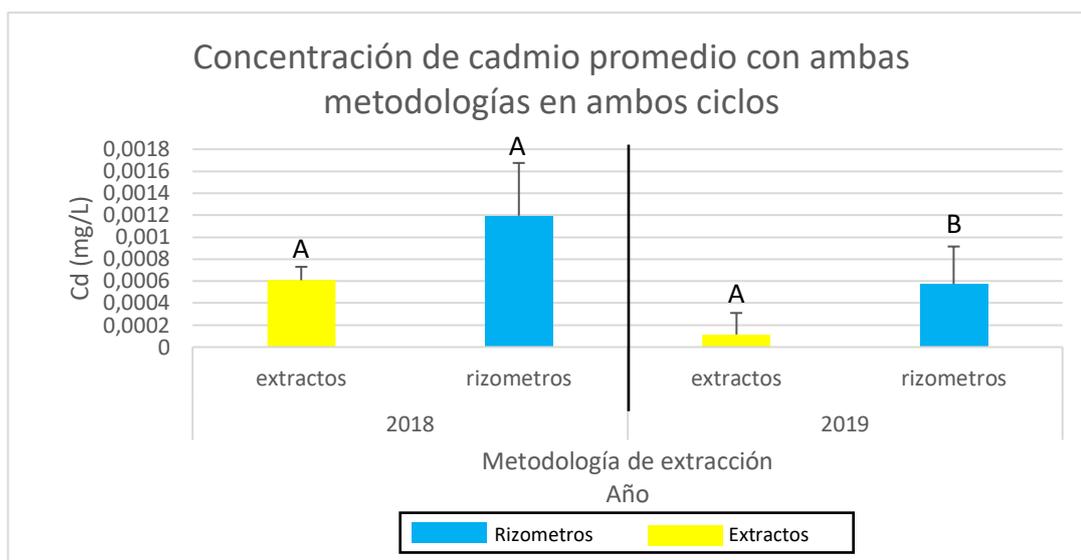


Figura 4.25: Concentración promedio de Cd (mg/L), obtenidas para ambos ciclos, aplicando ambas metodologías de extracción (rizometros y extractos). Letras distintas indican diferencias significativas (valor $p < 0,05$) y las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Finalmente, los promedios generales de ambos ciclos considerando ambas metodologías han dado valores similares, siendo para el primero de 0,00064 mg/L y para el segundo de 0,00022 mg/L, sin presentar diferencia significativa (valor $p = 0,0528$). Dichos resultados son menores tanto a los detectados a nivel mundial como dentro del área de estudio (Lavado et al., 2004; Huang et al., 2008; Gao y Grant, 2012; Corguinha et al., 2015; Roca, 2015; Payandeh et al., 2018; Lu et al., 2020; Frayssinet et al., 2023), confirmando que las cantidades promedio de Cd disponibles en las soluciones de suelos de los Argiudoles típicos del sudeste bonaerense, son escasas y que los cambios observados lo han hecho sin presentar una diferencia relevante entre los mismos luego de cada cosecha realizada.

4.3.6. Caracterización mineraloquímicas de silicofitolitos

Los valores obtenidos en suelo en el estadio madurativo del cultivo (Cuadro 4.11) muestran que más del 50% de la fracción mineral son SiF, respecto del resto de los componentes minerales del nivel más superficial del epipedón mólico, los cuales van

disminuyendo levemente en profundidad. Dichos contenidos coinciden con los datos obtenidos de trabajos previos en la zona (Borrelli et al., 2008, 2010; Benvenuto, 2017; Osterrieth et al., 2015; Frayssinet et al., 2021).

Cuadro 4.11: Contenido de silicofitolitos y morfotipos predominantes en los niveles estudiados de ambos ensayos. AR: articulados. EL: elongado liso. EC: Elongado crenado R: rondel. B: bilobado. T: trapezoides. BU: buliforme. S: saddle. A: agujones. NI: no identificados.

	Hz	Prof. (cm)	SiF %	Morfotipos predominantes (ICPN, 2005)									
				AR	EL	EC	R	B	T	BU	S	A	NI
Ensayo 2018	A	0-5	59	3	21	8	17	10	15	4	2	1	19
	A	5-15	57	2	22	7	16	9	14	5	3	2	20
	AB	15-23	29	1	21	5	14	6	17	6	4	2	24
Ensayo 2019	A	0-5	62	2	21	8	17	8	15	7	3	2	17
	A	5-15	56	0	20	9	18	8	13	6	4	3	19
	AB	15-23	30	0	22	7	15	7	12	8	3	4	22

Los SiF presentan contenidos entre 12% y 22% para los morfotipos: elongados lisos, rondels, y trapeziformes lisos (Fig. 4.26 a, b, c). Continúan en abundancia los elongados crenados presentando entre 6% y 9%; luego hallamos los bilobados con valores cercanos al 8%, mostrándose una importante proporción fracturados y alterados (Fig. 4.26 d-g, k-l). Buliformes y saddles se observaron en menor cantidad, no superando el 7% y finalmente tenemos a los tricomas y agujones, mayormente alterados, y con valores menores al 3%. Por su parte, los SiF articulados son escasos y pasan a inexistentes hacia la base de los tubos. Los SiF no identificados, los que por la elevada alteración química y/o fragmentación no permitieron asignar una morfología precisa, fueron abundantes (20%), y con máximos hacia la base del epipedón (Fig. 4.26 b, h, g, p).

Si bien los morfotipos de silicofitolitos son múltiples y redundantes, es decir, que se presentan distintas formas en una misma planta y mismos morfotipos en distintas plantas, puede decirse que se han visto los de bordes crenados y papilas de las inflorescencias como los más característicos de trigo (Piperno, 2006), las cuales no se hallaron en las muestras analizadas de estos epipedones. Dicha ausencia, responde a que como ya se ha explicado, los suelos utilizados para el ensayo nunca fueron laboreados y los SiF generados por la planta de trigo o sus restos, no se incorporaron en el suelo por el escaso tiempo transcurrido y la cosecha realizada de todas las plantas. De todos modos, si hay SiF con los morfotipos característicos de gramíneas, mayoritariamente asignados a pooides. Por último, se hallaron otras morfologías no diagnósticas, como: elongados, rondels, buliformes y aguzados, y finalmente una elevada proporción de SiF no identificados, por haber sido alterados a través de procesos físicos y químicos propios de un ambiente natural.

Considerando los trabajos de porosidad y microestructura realizados previamente en Argiudoles de la zona (Alvarez et al., 2018; Alvarez y Osterrieth, 2018), como así también las características morfológicas y las físicas definidas en el presente trabajo, donde hay una elevada proporción de partículas menores a 30 μm con predominancia de SiF, avalando la migración de los mismos dentro el horizonte A (Osterrieth et al., 2009, 2014; Frishkis et al., 2010; Liu et al., 2019).

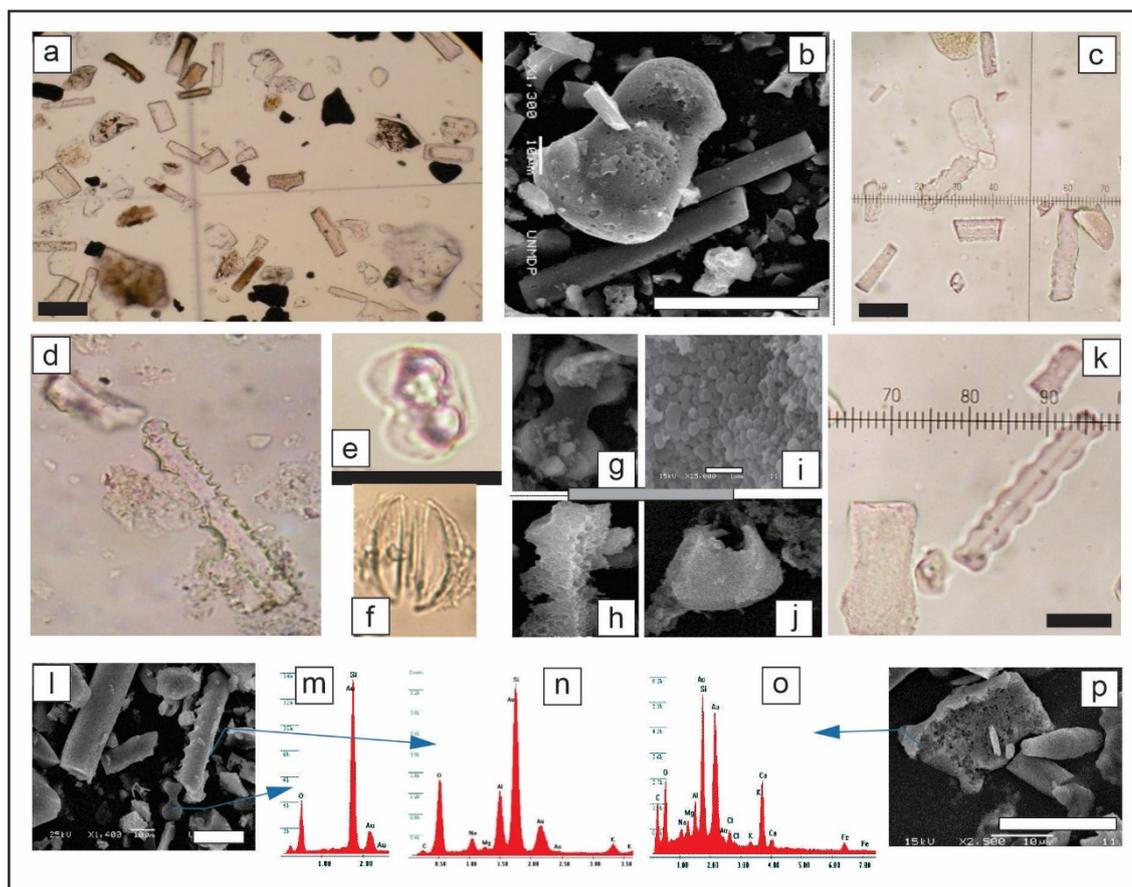


Figura 4.26: Silicofitolitos en suelos. Morfotipos predominantes en los niveles pedológicos estudiados. a) Silicofitolitos (SiF) en suelos vista al microscopio petrográfico (MOp), b) Detalle de SiF buliforme y elongados lisos (MEB), c) SiF en suelos elongados lisos, crenados y agujones (MOp), d) Detalle de SiF elongado crenado, articulado y bilobado (MOp), e) Bilobado, f) estoma silicificado (MOp), g) bilobado no alterado (MEB), h) Bilobado alterado (MEB), i) Nano esferas de SiF (MEB), j) Bilobado fracturado y alterado (MEB), k) Polilobado, rondel y buliforme poco alterado (MOp), l) Elongados, bilobados y no identificados (MEB), m) Espectro EDS de l, n) Espectro EDS de l (MEB), o) Espectro EDS de p, p) SiF elongado y otro muy alterado (MEB). Escala: 20 μm .

Recordando, los SiF surgen de la depositación de Si en la matriz de forma inter y extracelular (Ma y Yamaji 2006, 2008, 2015), proceso que puede incluir la encapsulación de muchos elementos, tanto principales (C, O, Al y Fe), como trazas (Pb, As, Zn y Cu) lo que refleja el papel crucial de los mismos en la regulación del ciclo biogeoquímico de los mismos (Osterrieth, 2006; Meunier et al., 2008; Struyf y Conley, 2009; Borrelli et al., 2010; Tran et al., 2019). En este sentido se analizaron algunos de estos SiF mediante MEB-EDS, donde se pudo ver en ciertos ejemplares su estructura interna formada por microesferas nanométricas, como ha sido definido en trabajos recientes (Fig. 4.26 i)

(Frayssinet et al., 2023). Las mismas permitirían inferir la capacidad de adsorción y desorción de elementos según las condiciones biogeoquímicas de los suelos analizados. Los resultados mineraloquímicos han arrojado picos de Si y O en bilobados (Fig. 4.26 l, m), mientras que en rondels y elongados han mostrado espectros de C, O, Al, Ca, Na, Cl y K y únicamente Mg y Fe correspondientes a la categoría de los MP (Fig. 4.26 l, n). Dentro de los SiF muy alterados, se vio que tenían, además de los elementos previamente mencionados, Cr y Zn (Fig 4.26 o, p). Al analizar morfologías tan alteradas debe considerarse la posibilidad de que algunos de esos elementos se hayan adherido desde las soluciones del suelo sin haber sido adsorbidos durante la consolidación de los SiF. No se hallaron otros MP como Cu y Cd, pero debe considerarse que es ínfima la proporción de SiF mineraloquímicamente analizados en relación con la gran abundancia de SiF que poseen los suelos, siendo las mismas de decenas de millones por gramo de suelo (Borrelli et al., 2010). Siendo estos valores estimativos aunque recurrentes, hay trabajos recientes que definen que los SiF que contienen elementos (Osterrieth, 2004; Kameník et al., 2013; Osterrieth et al., 2014; Delplace et al., 2020; Frayssinet et al., 2023; Liu et al., 2023), al alterarse los incorporan al suelo, debiendo considerarse que los mismos pueden ser micronutrientes (Cu, Zn, etc.), o tóxicos (Cd, Pb, As, entre otros) y contemplándose sus efectos posteriores luego de incorporados (Tran et al., 2019; Zancajo et al., 2019; Vaculik et al., 2020; Liu et al 2022). Son necesarios más estudios mineraloquímicos para avanzar en este tema; en plantas se pueden realizar análisis con aplicaciones controladas en ensayos, hidropónicos o a campo, que prueban la incorporación de MP en los SiF, mientras que en suelos se pueden realizar determinaciones en SiF, estando concentrados especialmente para la aplicación de un estudio mineraloquímico adecuado. Estos trabajos serán aportes básicos para un avance sustancial en el tema y esencialmente para poder avanzar en posibles estudios de fitorremediación que permitirán planear manejos más

sustentables, dentro de los agroecosistemas, como así también de recuperación de áreas mineras, de deposición de residuos, entre muchos otros.

En síntesis, podemos decir que los SiF tienen impacto directo en las características morfológicas, físicas y biogeoquímicas de los suelos en general y de la Llanura pampeana en particular. Si bien hay estudios que mostraron menor estabilidad estructural ante mayor contenido de SiF, cabe mencionar que dichos trabajos se han basado en la construcción de agregados dentro del laboratorio y que han combinado los componentes texturales de Argiudoles típicos de Pergamino (Buenos Aires) y la denominada fracción “limo liviana”, la cual está esencialmente formada por silicofitolitos (Pecorari et al., 1990; Cosentino y Pecorari, 2002). Al mismo tiempo, cabe considerarse que según bibliografía el ácido mono y polisilícico puede interactuar con numerosos elementos químicos para formar compuestos de variada solubilidad y que los mismos asociados a procesos de transferencia dentro del epipedón mólico, han redundado en beneficios estructurales de los suelos del SE bonaerense (Snyder et al., 2007; Osterrieth et al., 2014; Alvarez et al., 2018; Alvarez y Osterrieth, 2018). Particularmente, en esta tesis la referencia a la estabilidad estructural es en relación a la composición mineraloquímica de los agregados, evaluándose a nivel mega, meso, micro y submicroscopicos en base a trabajos previos (Osterrieth et al., 2014; Alvarez et al., 2018; Alvarez y Osterrieth, 2018). En los mismos se encontró una relación entre tipo, tamaño, forma y rugosidad de los agregados en relación con los distintos tipos de usos agrícolas y la presencia de matrices de sílice amorfa hidratada precipitada, donde se vio que a mayor uso de los suelos se registra un menor contenido de materia orgánica, arcillas, cationes etc, dentro de los mismos pero mayor contenido de sílice amorfa dando lugar a mayor estabilidad de los agregados en los epipedones de los agroecosistemas (Osterrieth et al., 2014; Alvarez et al., 2018; Alvarez y Osterrieth, 2018). Por lo cual, se considera que ambos tipos de trabajos

son complementarios y que son necesarios mas estudios que integuen y combinen ambas metodologías para avanzar en el rol de los SiF en las propiedades físicas de los suelos. Respecto de las modificaciones químicas de los mismos, podría resaltarse su rol para con la contaminación de los suelos cultivados. Como es bien sabido, los MP son una grave amenaza para la calidad de los cultivos y la salud humana (Vandevenne et al; 2012; Farooq y Dietz., 2015; Vaculik et al., 2020) y como se ha mencionado, los SiF pueden ejercer un rol benéfico para la mitigación del estrés por parte de los mismos (Liu et al., 2022). Sin embargo, la relación entre la estructura silícea de los SiF y los MP, como así también sus implicancias ambientales no están claramente definidas al día de la fecha (Huang et al., 2019).

Finalmente, cabe mencionar la diferencia respecto del capítulo anterior, acerca de la relación entre el contenido de SiF para con el de Si detectado. Si bien en el capítulo 3 se relacionaron ambos, la misma dentro de los suelos no es aplicable dado que, como se ha explicado anteriormente, los contenidos de SiF hallados dentro el epipedón analizado deben pasar por procesos pedológicos que conllevan cientos a miles de años para poder aportar contenido de Si a la solución del suelo del suelo.

4.4. Conclusiones

Las características morfológicas y físicas del epipedón mólico del suelo analizado han arrojado valores que cumplen con los requisitos para el correcto desarrollo de un cultivo.

Se ha visto que la reducción de las disponibilidades de los elementos analizados a lo largo de ambos ciclos, no se ha podido abordar de la manera en la que estaba planeada, dado que se respetaron las condiciones naturales a campo, no habiéndose podido coleccionar a través de los rizómetros el mínimo volumen necesario para todas las determinaciones previstas. De todos modos, al analizar los valores obtenidos con dicha metodología, la

disminución de las concentraciones de SiO_2 , H-PO_4 , Cu y Cd al finalizar el ciclo no se ha visto sustentada. Posteriormente, al no haber tenido efecto alguno y analizar los valores promedio obtenidos dentro del epipedón mólico por estadios con la solución del suelo extraída por los rizometros, se ha registrado que las concentraciones de dióxido de silicio y de fosfatos no han presentado tendencias que indiquen disminución de sus contenidos a lo largo del ciclo del cultivo, mientras que Cu y Cd si lo harían. Luego, al comparar dichos promedios con sus acumulaciones totales dentro de cada ciclo, se ha notado que los valores de SiO_2 , H-PO_4 y Cd se sustentan mutuamente, mientras que con Cu no sucede lo mismo, viéndose dicha dinámica explicada por la gran cantidad de valores no detectables obtenidos tras la utilización de la técnica aplicada. Esta situación nos deja finalmente con el Cd siendo el único elemento que podría cumplir con dicha tendencia de disminuir su contenido a lo largo del desarrollo del cultivo evaluado, sin considerar los tratamientos ni las profundidades en este ensayo establecidas.

Tampoco se ha encontrado efecto significativo de los tratamientos aplicados al analizar las soluciones extraídas a través de la segunda metodología (extractos) sobre la disponibilidad de los elementos en este trabajo abordados. Por ello, es que se ha decidido agrupar lo extraído por ambas metodologías en las distintas profundidades dentro del estadio madurativo de cada año ensayado, donde se ha visto lo siguiente: el único que ha presentado valores para ambos ciclos mayores en la superficie con ambas técnicas ha sido el SiO_2 , mientras que el H-PO_4 , Cu y Cd han compartido el mismo patrón en ambos ciclos únicamente para los extractos. Por su parte, los rizometros para los fosfatos y el Cd , han detectado más contenido en las profundidades durante el primer ciclo y en superficie durante el segundo ciclo, mientras que finalmente el Cu en ambos ciclos ha sido mayormente detectado en la base del epipedón mólico.

Al comparar entre metodologías, se ha visto que las determinaciones de SiO₂ y H-PO₄, han sido mayores con los extractos respecto de los rizómetros para ambos ciclos, mientras que los de Cd lo han hecho a la inversa. Respecto al Cu se ha visto que durante el primer ciclo han mostrado mayores concentraciones los extractos, mientras que en el segundo lo hicieron en cantidades levemente superiores los rizómetros.

Analizando las relaciones entre el Si y cada uno de los elementos evaluados al momento de la cosecha, se ha podido percibir que las concentraciones promedio de fosfatos registrados por los rizómetros han presentado dinámicas similares a los de dióxido de silicio, pero inversos en los resultados arrojados por los extractos. Por su parte, el Cu ha mostrado comportamientos sumamente similares con ambas metodologías de extracción utilizadas. Finalmente, el Cd ha presentado resultados de los rizómetros que se comportan a la inversa respecto del SiO₂ mientras que con los extractos han tenido dinámicas similares.

Dichas variaciones en la determinación de las variables observadas con las distintas metodologías no nos permiten llegar a conclusiones certeras acerca de la prevalencia de uno sobre otro. Lo que sí puede aseverarse es que la inversión que requieren los rizómetros sería provechosa en ambientes donde la distribución de las precipitaciones o bien el manejo del riego sea equilibrado, con la finalidad de evitar momentos donde el suelo se encuentre sin agua disponible, lo cual redundaría en rizómetros ejerciendo vacío, pero sin la posibilidad de haber colectado el mínimo volumen necesario para su posterior análisis. Al mismo tiempo y como fue pensado al aplicarlos en estos ensayos, lograr dicha situación dentro de un agroecosistema proveería de información sumamente útil acerca de los análisis químicos de la solución del suelo a lo largo del desarrollo del cultivo con una técnica no invasiva y que permite reflejar las

condiciones más reales de disponibilidad de los distintos elementos para su captura por parte de las raíces a lo largo de los distintos estadios de desarrollo analizados.

Por último, respecto de los promedios generales registrados al momento de la cosecha entre ciclos, se ha visto que los de dióxido de Si, Cu y Cd han descendido en sus concentraciones registradas, mientras que los de fosfatos han aumentado en el segundo ciclo respecto del primero.

Las morfologías de los SiF encontrados en los suelos no coinciden con las asociaciones típicas del cultivo de trigo, pero sí con las correspondientes a las gramíneas en general. Dentro de las halladas, se han presentado mayormente células largas como elongadas y células cortas como rondels, trapeziformes y bilobados. Estas últimas, presentan un tamaño favorable para los procesos de su transferencia como parte de la fracción esquelética dentro del perfil. Por otra parte, cabe destacar la abundancia de SiF no identificados, que podrían participar en la transferencia y lixiviación de los ácidos mono y polisilícicos, lo cual generaría matrices enriquecidas en sílice amorfo que favorecerían la formación de agregados más estables para una estructura del suelo adecuada. Finalmente, la mineraloquímica de los SiF, nos indica que están constituidos preponderantemente por Si, O y C, y siendo secundados por Al, Ca, Na, Fe, Zn, Mn, Mg y Cr, no habiéndose hallado ni Cd ni Cu dentro de los mismos.

Estos resultados, avalan la capacidad de los SiF para condicionar los procesos de adsorción y desorción de elementos químicos, tanto nutritivos como tóxicos para la biota del suelo y la calidad de vida humana. De todos modos más estudios biogeoquímicos y mineraloquímicos son necesarios para avanzar en el conocimiento de la estrecha relación de los SiF para aplicar un manejo sustentable que redunde en mejoras dentro de los agroecosistemas del sudeste bonaerense.

Capítulo 5. Relación entre las concentraciones de los distintos elementos en el sistema suelo-planta al finalizar el ciclo

5.1 Introducción

Como se ha explicado, las plantas capturan los distintos elementos de la solución del suelo, por distintos mecanismos y en diversas cantidades. El Si es un elemento beneficioso para las plantas y se encuentra ampliamente disponible en la mayoría de los suelos. Las gramíneas, tienen una alta capacidad para tomar Si de la solución del suelo en forma de ácido silícico y depositarlo en los tejidos vegetales, mayoritariamente como SiF, fortaleciendo las células y mejorando la resistencia de la planta al estrés biótico y abiótico (Epstein, 1999; Datnoff et al., 2001; Ma y Yamaji, 2008). Por su parte, el P es un macronutriente esencial para el crecimiento de las plantas, siendo absorbido en forma de iones fosfato y habiendo las plantas desarrollado adaptaciones para mejorar su captura en caso de ser necesario (Raghothama, 1999; Smith y Read, 2010; Richardson et al., 2011). Respecto, del Cd puede decirse que las plantas tienen cierta capacidad para capturarlo, a pesar de no ser beneficioso para su crecimiento, dependiendo de la concentración disponible en el suelo y de la posibilidad que posean para regular su ingreso. Finalmente, el Cu es un micronutriente esencial, pero puede volverse tóxico en altas concentraciones (Hall, 2002; Clemens, 2006; Kabata-Pendias, 2011).

A lo largo de este trabajo se evaluó el rol del Si y los SiF, sobre las concentraciones de P, Cu y Cd, tanto en plantas como en el suelo. En cuanto a la correlación entre la captura de estos elementos, puede existir cierta relación en función de las propiedades del suelo y las características de la planta. Por ejemplo, algunos estudios han demostrado que el Si puede influir en la disponibilidad, captura y encapsulamiento de otros elementos,

como el P, el Cd y el Cu (Ma y Takahashi, 2002; Liang et al., 2005; Shi et al., 2005; Ma y Yamaji, 2008; Guntzer et al., 2012; Greger et al., 2016). Consecuentemente, y para finalizar el desarrollo de esta tesis, se decidió abordar la relación de las concentraciones de dichos elementos, en ambos sistemas (planta y suelo) en el momento final del ciclo, dado que es cuando se observan los efectos más relevantes a nivel agrícola y ambiental. Para evaluar los mismos y considerando que la adición de Si en los suelos podría incrementar el contenido de cada uno de los elementos analizados en la biomasa vegetal provocando su disminución en la solución del suelo, es que se ha planteado la posible existencia de una relación inversa entre ambos al momento de la cosecha. En esta relación no es posible incluir los SiF, dado que los mismos se incorporan al suelo, luego de ocurrida la senescencia de los órganos que los contienen, debiendo pasar por procesos pedológicos que conllevan decenas a miles de años, lapso definido según las condiciones ambientales preponderantes en el área analizada.

Al observar si es que dicha relación existe o no, podremos estar en condiciones de proponer manejos agrícolas más adecuados para aplicar medidas que redunden en beneficios para el sistema planta-suelo, aportándole una perspectiva más sustentable donde se consideren los aspectos ambientales de la conservación del suelo, como así también, la calidad química del vegetal al momento de la cosecha, contemplando su transferencia a los sistemas acuáticos superficiales y subterráneos, como así también a la biota animal y humana.

5.2 Resultados

A continuación, se mostrarán gráficos donde se visualizan las relaciones planta-suelo de los distintos elementos analizados, al finalizar ambos ciclos ensayados. Para ello, se tomaron los valores promedio de Si, P, C y Cd obtenidos dentro de las plantas en ambos estadios madurativos, como así también los de las soluciones del suelo extraídos con la

metodología más comúnmente utilizada (extractos), realizando finalmente regresiones lineales entre los mismos. Dichos valores han sido abordados en el capítulo 3 y 4 correspondientemente, por lo que se han respetado las metodologías mencionadas anteriormente para cada caso. Finalmente, para evaluar si es que ha existido o no relación alguna entre los mismos, se realizó el análisis de regresión lineal entre las concentraciones detectadas dentro de la planta y los suelos, teniendo en cuenta cada tratamiento. Dado que, al considerarse cada tratamiento por separado, no se ha registrado relación significativa alguna (valores $p > 0,05$) es que se decidió evaluar la relación entre los promedios generales de los mismos corriendo un análisis de regresión lineal para cada uno de los ciclos ensayados. A continuación serán presentados los mismos, mostrando las formulas de regresión lineal, con sus correspondientes valores R^2 y p , que nos indican respectivamente: qué tipo de relación existe (positiva o negativa) entre los valores promedio detectados en las plantas (variable dependiente = y) con los de los suelos (variable independiente = x); qué porcentaje la variable independiente/predictiva (concentración del elemento disponible en la solución del suelo) explica las modificaciones de la dependiente/respuesta (concentración del elemento dentro de la planta) y ; finalmente, si dichos valores son estadísticamente significativos ($\alpha = 0,05$).

5.2.1 Silicio

Se observa que los distintos valores de Si obtenidos en el suelo entre tratamientos para ambos ciclos, no corresponden con modificaciones en lo detectado dentro de la planta (Fig. 5.1).

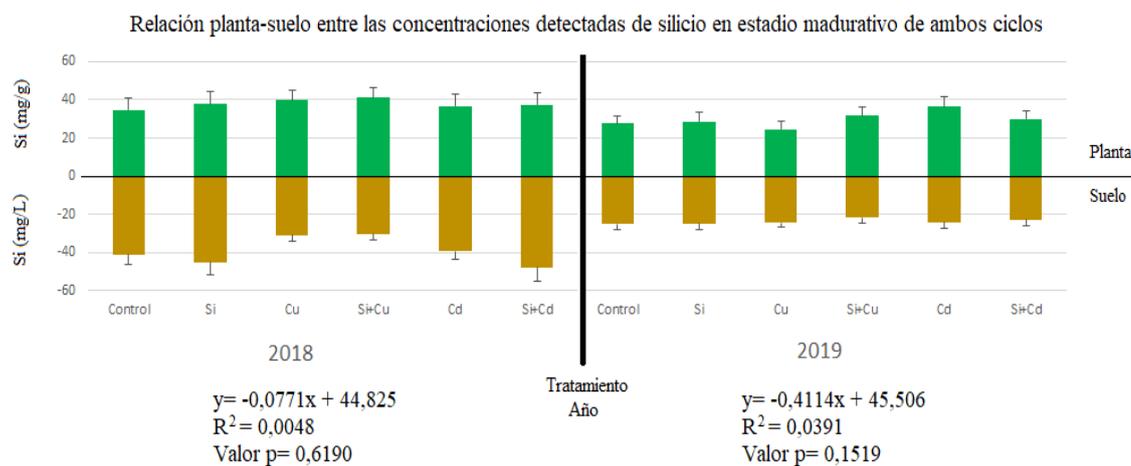


Figura 5.1: Relación de los valores promedio de Si obtenidos dentro de toda la planta (mg/g) y en la solución del suelo del horizonte A completo (mg/L) al momento de la cosecha. Se muestran sus correspondientes fórmulas de regresión, con sus R^2 y valores p obtenidos para cada uno de los ciclos de cultivo desarrollados. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Dentro del primer ciclo, se visualiza que los valores de Si del suelo presentan modificaciones importantes en las concentraciones determinados mientras que las plantas presentan valores sumamente similares a lo largo del mismo. En este caso puede verse que lo están haciendo simplemente en un 0,48% de manera negativa, siendo la misma visible al comparar los tratamientos Cu y Si+Cu para con el resto, dado que en los mismos se han registrado menores cantidades dentro del suelo y mayores en las plantas, sucediendo lo inverso para con el resto de los tratamientos evaluados. Finalmente, al analizar el segundo ciclo puede verse que los valores del suelo son similares y los de las plantas son variables, indicando nuevamente la falta de ajuste significativo entre los mismos.

5.2.2. Fósforo

En el caso de las concentraciones de P registrados se observa que dentro de ambos ciclos, los valores detectados en el suelo son variables mientras que los de la planta son sumamente similares (Fig. 5.2).

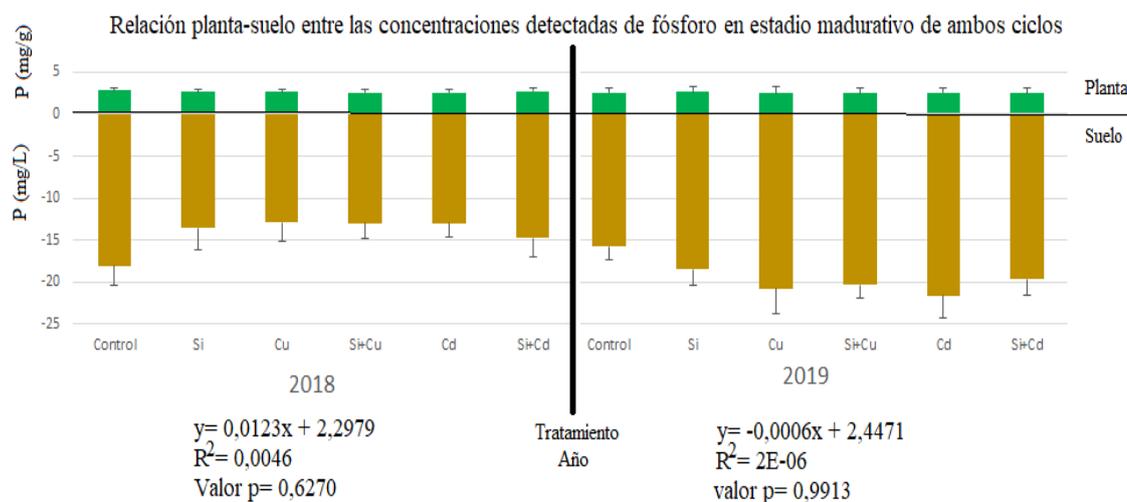


Figura 5.2: Relación de los valores promedio de P obtenidos dentro de toda la planta (mg/g) y en la solución del suelo del horizonte A completo (mg/L) al momento de la cosecha. Se muestran sus correspondientes fórmulas de regresión, con sus R² y valores p obtenidos para cada uno de los ciclos de cultivo desarrollados. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Los valores de p elevados y los R² mínimos, corroboran la ausencia de relación entre los valores registrados en planta y los de suelo.

5.2.3 Cobre

Se observa que los distintos valores de Cu obtenidos en el suelo entre tratamientos para ambos ciclos no corresponden con valores que establezcan relación alguna para con lo detectado dentro de la planta (Fig. 5.3).

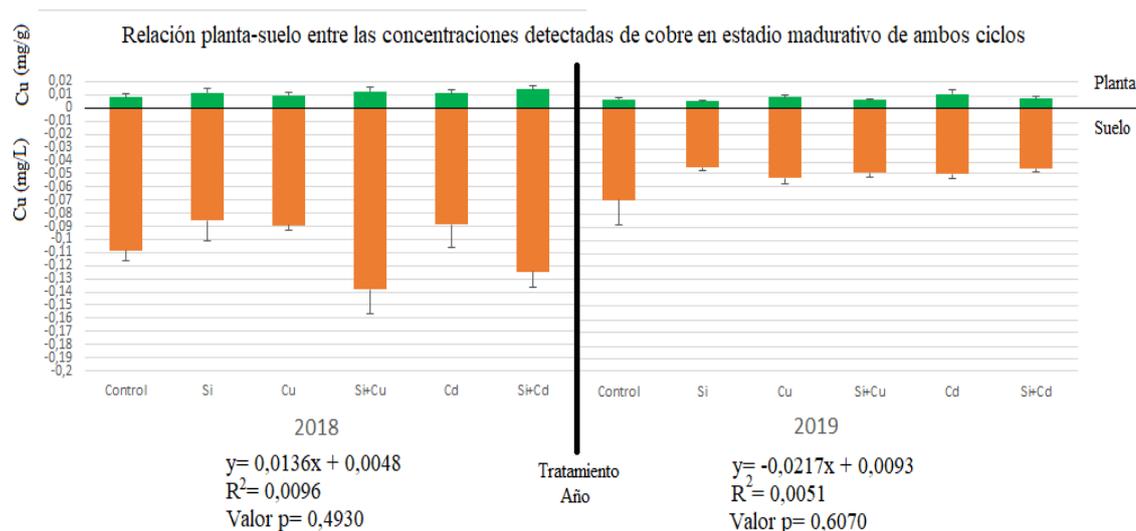


Figura 5.3: Relación de los valores promedio de Cu obtenidos dentro de toda la planta (mg/g) y la solución del suelo del horizonte A completo (mg/L) al momento de la cosecha. Se muestran sus correspondientes fórmulas de regresión, con sus R^2 y valores p obtenidos para cada uno de los ciclos de cultivo desarrollados. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

En el primer ciclo se detectaron valores promedio sumamente similares mientras que los de los suelos han sido más variados. Al analizar el segundo ciclo, se puede notar que la concentración tanto de los suelos como de las plantas ha disminuido, pero nuevamente sin poseer relación alguna la variabilidad detectada entre los mismos dentro de los distintos tratamientos evaluados.

5.2.4. Cadmio

Se observa que los aumentos o disminuciones detectados en el contenido de Cd dentro de las plantas no se relacionan con el decrecimiento o incremento de los valores detectados en los suelos entre tratamientos para ambos ciclos (Fig. 5.4).

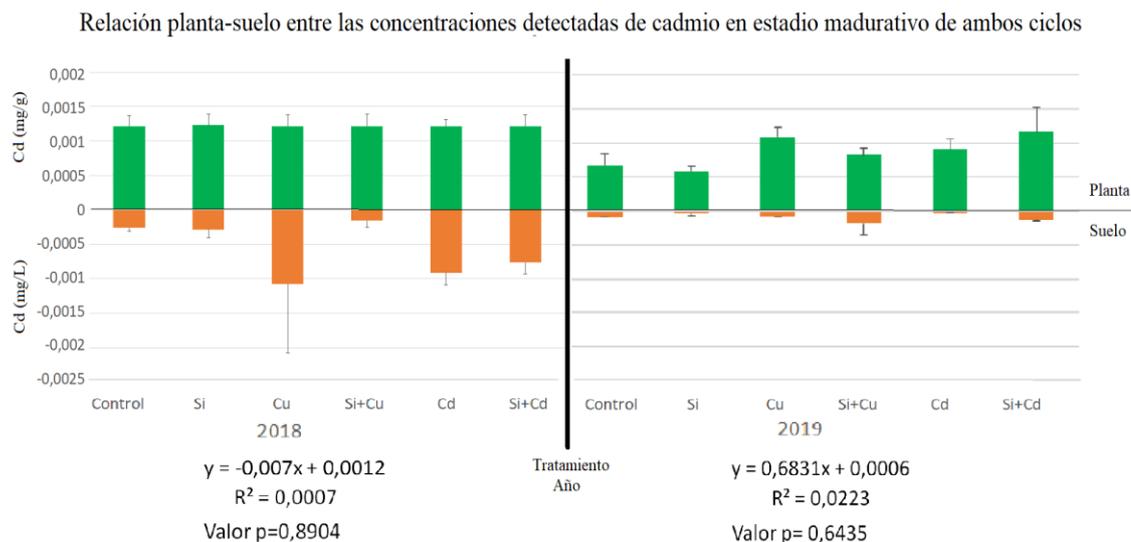


Figura 5.4: Relación de los valores promedio de Cd obtenidos dentro de toda la planta (mg/g) y la solución del suelo del horizonte A completo (mg/L) al momento de la cosecha. Se muestran sus correspondientes fórmulas de regresión, con sus R^2 y valores p obtenidos para cada uno de los ciclos de cultivo desarrollados. Las barras verticales corresponden al error estándar de los valores medios obtenidos.

Se puede ver que dentro del primer ciclo, los valores de planta son prácticamente idénticos, mientras que los del suelo son más variables. Dentro del segundo ciclo se observa que ambos valores han disminuido, habiendo presentado valores promedio más variables dentro del trigo, mientras que los suelos, a pesar de tener concentraciones sumamente bajas, no presentan relación positiva o negativa alguna para con lo detectado dentro de las plantas.

5.3 Discusión

Algunos trabajos han reportado que el silicio podría modificar la captura de los elementos aquí analizados, bien promoviéndola y controlando su ingreso y distribución dentro de la planta (Ma y Takahashi, 2002; Liang et al., 2005; Shi et al., 2005; Ma y Yamaji., 2008; Guntzer et al., 2012; Rizwan, 2012, Rizwan et al., 2015; Greger et al., 2016). Cabe mencionar que dichos procesos se han realizado mediante ensayos en laboratorio o dentro de invernáculos, utilizando macetas o bien en hidroponía, ya que esas condiciones son las adecuadas para poder arribar a resultados que permitan esclarecer los

mismos. Los resultados de las relaciones aquí evaluadas no han mostrado ajuste significativo alguno para cada uno de los elementos ensayados. Dicha ausencia podría estar explicada por las condiciones en las que se realizaron los mismos, dado que se encuentran sujetas a factores naturales que afectan el sistema suelo-planta. Si bien es cierto que aporta datos que se ajustan a la realidad ambiental y de mayor concordancia con el agroecosistema productivo, la cantidad de variables no controladas afecta el arribo a conclusiones concisas. Al mismo tiempo, debe considerarse que en este trabajo se aplicó una única y quizás baja dosis de los distintos tratamientos, pudiéndose avanzar en este sentido mediante futuros ensayos de campo con incrementos en la frecuencia y/o las concentraciones aplicadas. En dicho caso, los resultados obtenidos podrían ser más significativos y sumamente útiles a la hora de realizar su transferencia a los productores. De ser así, se podría recomendar un uso realmente más sustentable del recurso suelo que redundaría en beneficios perceptibles al momento de la cosecha, considerando los aspectos ambientales, económicos y sociales para todos los factores e individuos afectados por el manejo de dicho agroecosistema.

5.4 Conclusión

En base a los resultados expuestos se concluye que no ha sido posible sustentar la relación negativa suelo-cultivo planteada para ninguno de los elementos evaluados. Como se ha visto, no hay relación significativa alguna entre la concentración promedio de Si, P, Cu y Cd encontrado en el horizonte A del suelo y dentro de la planta completa al finalizar cada uno de los ciclos de cultivo. Resultados que podrían ser explicados por la única y quizás baja dosis de los elementos aplicados, por lo tanto, nuevos estudios deben plantearse para ser realizados en condiciones de campo, avanzando en el conocimiento de la relación del Si con los agroquímicos y pudiendo los mismos ser transferidos al sistema agrícola de la Llanura pampeana.

Capítulo 6. Discusión general

6.1. Antecedentes

El silicio es el segundo elemento más abundante en la superficie terrestre. El mismo se presenta en diversos organismos, siendo de vital importancia para los mismos y encontrándose mayormente como resultado de los procesos de biomineralización generados por la biota (Lowenstan, 1981). Dentro de este grupo, se encuentran las plantas, particularmente las gramíneas, hallándose dentro de dicha familia numerosos cultivos y estando entre ellos, el trigo como formador de dichas biomineralizaciones de Si amorfo, denominadas silicofitolitos (SiF) (Rovner, 1971; Piperno, 2006). A la fecha es un elemento poco estudiado, habiéndose detectado a lo largo de las últimas décadas, que provee numerosos beneficios bióticos y abióticos, lo cual ha hecho que sea hoy en día, considerado esencial en la sustentabilidad agrícola y ambiental (Struyf y Conley, 2009). Entre sus numerosos beneficios, se encuentran los aspectos químicos, que han sido mayormente analizados en diversos organismos vegetales bajo condiciones controladas (Ma y Yamaji, 2008, 2015; Greger et al., 2016). Al mismo tiempo, dentro de los suelos ejercen roles relevantes dentro de las propiedades físicas y químicas, implicando mejoras en las mismas y más aún dentro de un agroecosistema (Sommer et al., 2006; Alvarez y Osterrieth, 2018).

Dentro del país ha sido muy escaso su abordaje (Osterrieth, 2004; Borrelli et al., 2010; Chirkes et al., 2018; Frayssinet et al., 2021), y con la finalidad de obtener datos básicos al respecto, es que se decidió evaluar la presencia de algunos de los beneficios químicos mencionados dentro de un agroecosistema sumamente productivo e importante a nivel nacional, como es el de la Llanura pampeana. Para ello, se eligieron elementos

representantes de un macronutriente (P), un micronutriente (Cu) y un elemento tóxico (Cd) para explorar la relación de cada uno de ellos con la aplicación de silicio en las plantas de trigo pan y el horizonte A de los suelos, como así también la interacción entre ambos. Al mismo tiempo, se ha optado por aplicar una metodología específica con la finalidad de lograr la extracción de las soluciones del suelo a lo largo del desarrollo del cultivo sin generar disturbio alguno sobre el mismo, y poder evaluar las dinámicas de los elementos químicos mencionados disponibles para las plantas durante dos ciclos de cultivo (2018 y 2019). Si bien el trabajo se centró en los análisis químicos, se incorporaron estudios submicroscópicos y mineraloquímicos sobre los SiF contenidos en las plantas de trigo y sus suelos asociados, dado que, en la literatura internacional reciente, se han detectado relaciones benéficas entre el Si, los SiF y los elementos químicos aquí analizados. Por lo explicado es que en esta tesis se diseñó un ensayo para evaluar la dinámica del silicio agregado y las biomineralizaciones de sílice amorfa en el sistema suelo-cultivo de trigo del Partido de General Pueyrredón, ahondando en sus efectos sobre las propiedades químicas y mineraloquímicas.

6.2. Principales logros

6.2.1. Plantas

A lo largo del presente trabajo se han presentado los primeros resultados de un ensayo realizado en condiciones de campo que ha evaluado la dinámica e interacción del silicio con fósforo, cobre y cadmio agregados, en un cultivo de trigo pan que posee gran demanda a nivel nacional y mundial, debiendo cumplir con requisitos que garanticen su comercialización y respetando los límites de sanidad satisfactorios para su consumo, tanto animal como humano. Durante la misma, se han aportado datos básicos pero novedosos tanto en plantas de trigo como en epipedones mólicos representativos de la Llanura

pampeana, implicando beneficios para el agroecosistema. Se detallan a continuación algunos aspectos promisorios que se han detectado tanto dentro del cultivo de trigo como en el epipedón mólico del Argiudol típico aquí analizado.

La variedad de trigo Baguette 501 se ha desarrollado correctamente, salvo el primer ciclo en el que no ha podido desarrollar las semillas. Dicha situación se revirtió en el segundo ciclo, donde se sembró la mitad de las unidades respecto del primero, obteniéndose la deseada producción de semillas. Al analizar su crecimiento se ha visto que en 2019 las plantas fueron aproximadamente 10 cm más altas respecto del ciclo 2018, pudiendo deberse dichas diferencias a la disminución en la cantidad de semillas sembradas y obteniéndose valores más cercanos a los reportados para dicha variedad (Gallego, 2015; Sur, 2017).

Los valores de Si acumulados aumentan con el paso del tiempo en ambos ciclos, pudiendo ser explicados por el cambio en la densidad de siembra y el menor crecimiento que han registrado las plantas del 2018. Su dinámica de deposición dentro de los diversos órganos ha mostrado ser similar entre los dos años evaluados, correspondiéndose con las mencionadas por otros autores tanto a nivel mundial como regional (Parr y Sullivan, 2011; Gocke et al., 2013; Tubaña y Heckman, 2015; Benvenuto, 2017; Fernández Honaine et al., 2017; Frayssinet et al., 2023). Finalmente, se ha observado que en su patrón de acumulación las raíces disminuyen su contenido, mientras que los tallos se mantienen estables y por su parte las hojas incrementan las cantidades, al igual que las espigas, finalmente presentando el mínimo registrado a lo largo de todo su desarrollo dentro de las semillas.

Dentro del macronutriente evaluado (P), se visualizaron contenidos acumulados sumamente parejos entre el estadio vegetativo y madurativo dentro de ambos ciclos, con patrones de deposición similares y siendo opuestos a los del Si en los órganos aéreos,

destacando que las semillas fueron el órgano que mayor contenido de P por gramo de planta alojó. Continuando con dicha tendencia entre ambos elementos, puede verse que sus registros al finalizar el ciclo han sido mayores en el segundo respecto del primero, rondando los valores determinados por otros autores dentro del mismo cultivo (Calderini et al., 1995; Baligar et al., 2001; Sharma y Sharma, 2016; Wang y Huang, 2019). El incremento en el contenido del macronutriente puede deberse a que el cultivo promovió su captura mediante ciertas adaptaciones específicas, viéndose recalada su importancia al considerar que ha sido enviado hacia las semillas (Baligar et al., 2001; Vance et al., 2003; Grant y Flaten, 2011; Richardson et al., 2011; Lambers y Plaxton, 2015; He et al., 2019; Wang y Huang, 2019). Por último, al evaluar el contenido de Si y P dentro de los diversos órganos a lo largo de ambos ciclos ha mostrado una relación opuesta, coincidiendo con lo reportado en el 2014 por Song y colaboradores.

El contenido total acumulado del micronutriente Cu aumentó a lo largo del desarrollo fenológico del cultivo en ambos ciclos. Sus valores promedio en el estadio final del ciclo han sido mayores en 2018 respecto al 2019, pudiendo explicarse por el cambio en la densidad de siembra, pero siendo en ambos ciclos similares a los reportados internacionalmente (Almaroai et al., 2012; Frayssinet et al., 2023). Se ha observado que en ambos ciclos se presentan valores similares de concentración dentro de cada órgano, teniendo el órgano subterráneo el máximo contenido registrado y presentado su mínimo dentro de las semillas. En cuanto a los patrones de acumulación del Cu y Si, se ha visto que durante el primer ciclo han mostrado ser inversos para todos los órganos, pero que dentro del segundo repiten dicho comportamiento las raíces y hojas, mientras que los tallos y las espigas han tenido dinámicas bastante similares. Por otro lado, cabe destacar su elevado contenido dentro de las raíces, ejerciendo quizás un rol de rizofiltradoras para no superar los valores umbrales, evitando así sus efectos tóxicos. Finalmente, se resalta

que las semillas responden de manera similar a lo observado con el Si, presentando valores bajos de ambos y sustentando los encontrados por ciertos trabajos que relacionan a este último elemento con la co-deposición y/o encapsulación del Cu en el resto de los órganos analizados (Nowakowski y Nowakowska, 1997; Hernández-Apaolaza, 2014; Tran et al., 2019, Delplace et al., 2020; Lux et al., 2020). Los valores registrados dentro en las semillas implican que los mismos no superan los límites de Cu permitidos para su consumo por la FAO y OMS (1999), posibilitando así su comercialización en el mercado mundial.

Considerando el elemento tóxico como el Cd se ha visto que el contenido total acumulado en ambos ciclos ha sido mayor en el estadio madurativo respecto del vegetativo. Al mismo tiempo, se han registrado concentraciones mayores al finalizar el primer ciclo respecto del segundo, pudiendo explicarse los mismos por el cambio en la densidad de siembra pero encontrándose ambos ciclos en cantidades similares a las registradas mundialmente (Huang et al., 2008; Gao y Grant, 2012; Corguinha et al., 2015; Payandeh et al., 2018; Lu et al., 2020), pero siendo ampliamente superiores a las halladas previamente en la zona (Frayssinet et al., 2023). Dichas diferencias pueden explicarse por la aplicación de dicho elemento en este trabajo, como así también por su alto contenido a nivel radicular. Los patrones de acumulación fueron prácticamente similares en todos los órganos desarrollados en el primer ciclo, mientras que en el último la dinámica ha sido más variada, destacándose sus contenidos dentro de las semillas. Respecto a su relación con el patrón de Si, se ha visto que raíces, tallos y espigas presentan dinámicas con valores elevados y similares, mientras que las hojas lo hacen a la inversa. Dentro de las semillas pudo detectarse el mínimo de Si y el máximo de Cd, superando estos últimos las cantidades permitidas para su consumo por la FAO-OMS (1999) y dejándolos fuera de la posibilidad de ser ofrecidos para satisfacer la importante demanda mundial. Los

resultados observados sustentan hipótesis que establecen relaciones con el Si, pudiendo favorecer el proceso de rizofiltración, co-deposición y/o encapsulación del elemento tóxico (Feng et al., 2010; Colin, 2011; Rizwan, 2012; Rizwan et al., 2015; Wu et al., 2018; Zancajo et al., 2019; Delplace et al., 2020; Lux et al., 2020; Vaculik et al 2020; Rahman et al., 2021; Wei et al., 2021; Liu et al., 2022).

Considerando que los contenidos de silicio aquí determinados son mayoritariamente provenientes de las biomineralizaciones de Si amorfa (SiF) y evaluando las relaciones entre los valores de Si y MP previamente mencionadas, es que se decidió abordar las posibles asociaciones de SiF para con dichos elementos, siguiendo lo reportado por los estudios realizados al respecto durante los últimos años (Zancajo et al., 2019; Vaculik et al 2020; Liu et al., 2022). Para ello, se realizaron estudios microscópicos, submicroscópicos y espectroscópicos Raman, obteniéndose resultados promisorios. Los SiF presentes en los distintos órganos analizados, han mostrado cuali y cuantitativamente valores relevantes con morfologías definidas, que al haber sido analizados a nivel submicroscópico y elemental han presentado predominio de C, Si, O, seguidos de P y Al, entre otros, y en menor proporción MP, encontrándose de manera aleatoria al Fe, Zn, Cu, Mg, Mn y níquel. Por su parte, el Cd solo se detectó junto al Cu mediante espectroscopia Raman, dado que puede registrar cantidades de elementos traza dentro de los SiF (Zancajo et al., 2019).

Considerando la falta de información de los procesos que consideran al Si y su eficiencia como elemento fitorremediador es evidente la necesidad de realizar mayores experimentaciones con una escala de análisis detallado. Finalmente y sabiendo la estrecha relación existente entre planta y suelo, se debe considerar su incorporación al suelo luego de finalizado el ciclo del cultivo que los contiene (Parr y Sullivan, 2011; Guntzer et al., 2012; Rizwan, 2012), teniéndose en cuenta sus morfologías y tasas de degradación,

cronológicamente dependientes debido a los distintos procesos tafonómicos a los que están expuestos los SiF (Osterrieth et al, 2009; Borrelli et al 2008, 2010; Thu et al., 2019; Schreck et al., 2020).

6.2.2. Suelos

Ingresando entonces en complejo sistema que es el suelo, se ha visto que las características morfológicas y físicas del epipedón mólico analizado han arrojado valores adecuados para el correcto desarrollo de un cultivo (Guanca et al., 2012; Benvenuto, 2017; Sur, 2017; Alvarez et al., 2018; INTA, 2020).

Se analizaron las propiedades químicas mediante la utilización dos metodologías de extracción de la solución del suelo, siendo ellas los rizómetros y los extractos. Se decidió aplicar rizómetros dado que los mismos garantizan la extracción directa y no destructiva del contenido de agua útil en los suelos a lo largo de todo el ciclo de cultivo, permitiendo la posterior determinación de solutos en condiciones naturales y siendo similares a lo ocurrido en la zona radicular (Rhizon SMS, 2003). Luego recordar, que las soluciones de los suelos provenientes de los extractos se han obtenido siguiendo los procesos comúnmente realizados dentro del laboratorio y corresponden al estadio final del ciclo. Por ello, es que se ahondó en la comparación de ambas metodologías en dicho momento, como así también, por la importancia que implica conocer los valores registrados al momento de la cosecha y sus implicancias a futuro.

Analizando los resultados obtenidos con la aplicación de ambas metodologías, se han observado algunos de particular de interés. Entre ellos, el contenido de dióxido de silicio registrado por los rizómetros ha presentado mayores valores al final de ambos ciclos. Adicionalmente, ambas metodologías han presentado valores que han ido descendiendo con la profundidad del horizonte A, pudiendo deberse a una mayor actividad radicular para la captación del Si, como así también, por posibles cambios

texturales que favorecerían su complejación, lixiviación, gelificación, etc. quitándolo consecuentemente de la solución del suelo disponible. Asimismo, se aprecia que los valores promedio de SiO_2 registrados para ambos ciclos han sido superiores para los extractos, pudiendo dicho efecto verse explicado por las mayores precipitaciones recibidas durante el 2018, que podrían haber incrementado la disponibilidad del Si dentro de la solución del suelo, facilitando su transferencia y no permitiendo su captura por parte de los espacios porosos que poseen los rizometros. Finalmente, los promedios generales de ambos ciclos considerando ambas metodologías han dado valores sumamente similares, correspondiéndose con lo detectado por distintos autores (Borrelli et al., 2010; Osterrieth et al., 2014, 2015; Chirkes et al., 2016; Benvenuto, 2017; Conti, 2017; Frayssinet et al., 2019).

Respecto al contenido de los fosfatos se ha visto que los rizometros han presentado una tendencia de aumento en los valores registrados a lo largo de su desarrollo fenológico. También se ha observado, que los extractos y rizometros en ambos ciclos han presentado valores mayores en superficie respecto de la base, exceptuando únicamente de dicho patrón a los rizometros del 2018. Asimismo, se aprecia que los valores promedio de H-PO_4 registrados para ambos ciclos han sido sumamente superiores para los extractos respecto de los rizometros, posiblemente explicado por los diversos filtros a los que estuvieron expuestas las muestras que han arrojado menores valores y fueron determinadas con ICP. Finalmente, los promedios generales obtenidos por ambas metodologías han sido superiores para el segundo ciclo, rondando los valores establecidos para los suelos de la zona (Lloveras y Castro, 2008; Armentano, 2012; Rozas et al., 2012; Mazzilli et al., 2016; Berardo et al., 2019; Frayssinet et al., 2019). Cabe destacarse que el menor contenido de H-PO_4 detectado durante el primer año coincide con la máxima de SiO_2 , siendo sustentada por los extractos y coincidiendo con lo encontrado por varios

autores a nivel mundial y local (Caviglia et al., 2005; Liang et al., 2007; Chirkes et al., 2016, 2018; Agostinho et al., 2017; Conti, 2017; Frayssinet et al., 2019).

Respecto del Cu, se ha visto que los rizometros han presentado una tendencia al descenso en los contenidos de Cu registrados en ambos ciclos a lo largo de su desarrollo, pero dada la elevada cantidad de datos no detectables obtenidos, dicho promedios no se ven sustentados al compararlo con sus contenidos totales entre estadios. Por otra parte, los rizometros en ambos ciclos han presentado valores mayores en profundidad respecto de la superficie mientras que los extractos lo hicieron a la inversa. Esta dinámica encontrada podría explicarse nuevamente por una mayor actividad radicular o bien por los cambios texturales, los cuales podrían estar teniendo implicancia sobre la captura por parte de los rizometros, pero no sobre la metodología más invasiva que se realiza en el laboratorio. Asimismo, se aprecia que los valores promedio de Cu registrados para el primer ciclo fueron siempre significativamente mayores en los extractos respecto de los rizometros mientras que para el 2019 se comportaron de manera inversa. Por otro lado, los promedios generales de ambos ciclos considerando ambas metodologías han dado valores superiores para el primero respecto del segundo, habiendo mostrado dinámicas sumamente similares con el SiO₂. Considerando que el Cu es un micronutriente y que durante el 2019 se ha presentado un desarrollo superior respecto del 2018, la necesidad de mayores contenidos de Cu por parte de la planta para poder cubrir los procesos fisiológicos necesarios puede haber sido la causante de la disminución del mismo en la solución del suelo. Finalmente, cabe destacar que los mencionados valores promedios son inferiores a los establecidos a nivel mundial y dentro del área (Almaroai et al., 2012; Frayssinet et al., 2023).

Por su parte, los contenidos de Cd registrados por los rizometros en ambos ciclos decrecen a lo largo del desarrollo, respaldando los valores de acumulación total

detectados entre los mismos. Asimismo, se han registrado con ambas metodologías sus mayores contenidos en la superficie, exceptuando únicamente a los rizómetros del 2018 de dicho patrón, mostrando siempre valores superiores los rizómetros respecto de los extractos. Cabe destacar que dichos resultados, podrían verse explicados por el tipo de rizómetros utilizados (MOM), que han sido particularmente diseñados para contar con mediciones más precisas de los metales pesados. Por otro lado, han presentado resultados de los rizómetros que se comportan a la inversa respecto del SiO₂ mientras que con los extractos ambos elementos han tenido dinámicas similares. Finalmente, los promedios generales de ambos ciclos considerando ambas metodologías han dado valores similares para ambos ciclos, siendo menores a los detectados a nivel mundial y dentro del área de estudio (Lavado et al., 2004; Huang et al., 2008; Gao y Grant, 2012; Corguinha et al., 2015; Roca, 2015; Payandeh et al., 2018; Lu et al., 2020; Frayssinet et al., 2023).

Lamentablemente no se ha podido encontrar antecedente alguno en condiciones similares ni que aborden con ambas metodologías las profundidades evaluadas en este trabajo, por lo que sería de suma utilidad realizar nuevos ensayos a campo para poder evaluar la posibilidad de los procesos biogeoquímicos aquí planteados.

Las variaciones en la determinación de los datos obtenidos con las distintas metodologías no nos permiten llegar a conclusiones certeras acerca de la prevalencia de uno sobre otro. Lo que sí puede aseverarse es que la inversión que requieren los rizómetros sería provechosa en ambientes donde la economía de agua sea equilibrada, lo cual redundaría en rizómetros extrayendo el mínimo volumen necesario para la realización de los análisis, obteniendo así información sumamente útil acerca de la disponibilidad de los distintos elementos para su captura por parte la planta a lo largo del ciclo.

Se ha reportado por varios autores que los SiF impactan junto a otros componentes de los suelos en las características morfológicas, físicas y biogeoquímicas, en variados ambientes e incluyendo dentro de estos a los agroecosistemas (Basile-Doelsch, 2006; Borrelli et al., 2008, 2010; Meunier et al., 2008; Rizwan, 2012; Osterrieth et al., 2014, 2015; Tubaña et al., 2016). Respecto de las modificaciones químicas, son muy escasos y recientes los trabajos que destacar su rol para con la contaminación de los suelos cultivados, dado que los SiF podrían asociarse con los MP que son una grave amenaza para la calidad de los cultivos y la salud humana (Vandevenne et al; 2012; Farooq y Dietz., 2015; Wang et al., 2019; Vaculik et al., 2020), En esta tesis, se han hallado altos contenidos de SiF con variadas morfologías correspondientes a las gramíneas en general y no a las típicas del cultivo de trigo, como era esperable en este ensayo realizado en suelos sin historia de uso agrícola. La textura preponderante de los SiF los incluye en un tamaño favorable para los procesos de su transferencia como parte de la fracción esquelética dentro del perfil (Fishkis et al., 2010; Liu et al., 2019). Por otra parte, se destaca la abundancia de los no identificados que se estima han participado en la transferencia y lixiviación de los ácidos mono y polisilícicos, favorecerían la formación de agregados de variada estabilidad (Cosentino y Pecorari., 2002; Alvarez y Osterrieth, 2018). Finalmente, la mineraloquímica de los SiF, nos indica que están constituidos preponderantemente por una composición elemental similar a la hallada dentro de las plantas. Estos resultados, avalan la capacidad de los SiF para condicionar los procesos de adsorción y desorción, implicando una importante reversión dinámica de elementos químicos, tanto nutritivos como tóxicos para la biota del suelo y la calidad de vida humana. De todos modos, más estudios biogeoquímicos y mineraloquímicos son necesarios para avanzar en el conocimiento de la estrecha relación de los SiF para su posible aplicación considerando

un manejo integral y sustentable que redunde en mejoras dentro de los agroecosistemas del sudeste bonaerense.

6.2.3. Interacción planta-suelo

Finalmente, en el capítulo 5 se ha evaluado la relación inversa dentro del sistema planta-suelo. Luego de observar que las dinámicas de los promedios generales de los elementos químicos analizados dentro de los suelos y las plantas han sido similares, la idea de posibles interacciones negativas entre ambos subsistemas ha respondido como era esperado, es decir, sin verse sustentada por las curvas de regresión lineal simple realizadas (Fig. 6.1).

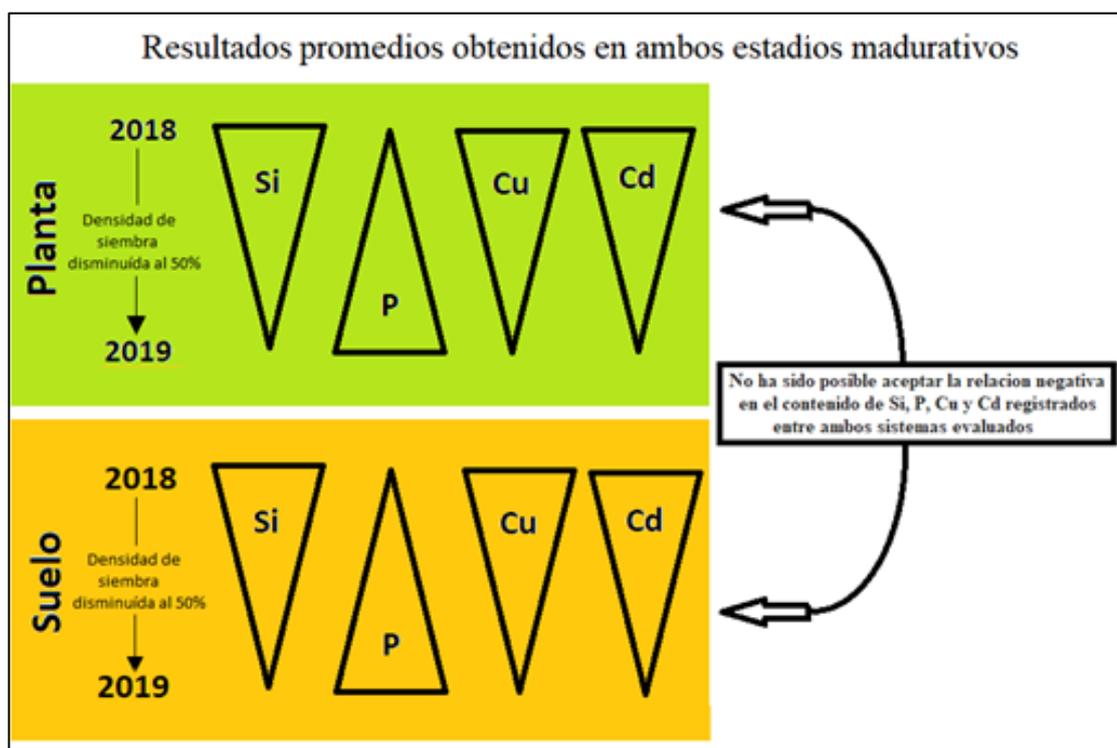


Figura 6.1: Esquema general conteniendo los principales resultados promedios obtenidos en el horizonte A del Argiudol típico y en la planta completa de trigo pan, dentro del estadio madurativo de ambos ciclos de cultivo ensayados.

6.3. Constatación de las hipótesis

A lo largo del trabajo se ha visto que no estamos en condiciones de aceptar la hipótesis planteada, lo que implica que la adición de Si en la dosis aplicada en este ensayo en los

suelos no incrementaría con diferencias significativas el contenido de Si, P Cu ni Cd dentro de la biomasa vegetal. Al mismo tiempo, y en concordancia con lo anteriormente mencionado, tampoco se ha podido indicar que los ha disminuido en la solución del suelo al finalizar el ciclo. Por último, se ha evaluado la posible existencia de una relación inversa entre los contenidos dentro de la planta y el suelo al momento de la cosecha, la cual ha seguido la tendencia de los resultados previamente mencionados, sin poderse verificar la misma. Dichas conclusiones, podrían deberse a que los valores obtenidos no han permitido visualizar efecto significativo alguno de los tratamientos evaluados, probablemente porque se aplicó una única y quizás baja dosis de los distintos tratamientos, pudiéndose avanzar en este sentido mediante futuros ensayos de campo con incrementos en la frecuencia y/o las concentraciones aplicadas.

6.4. Perspectivas futuras

Los resultados logrados como producto de esta tesis han permitido obtener una aproximación a la línea de base química y mineraloquímica para la relación del silicio con un macronutriente, un micronutriente y un elemento tóxico, tanto en las plantas de trigo pan como en los epipedones mólicos de los Argiudoles típicos del sudeste de la Llanura pampeana. Si bien es cierto que el ensayo estuvo sujeto a condiciones naturales y aporta datos que se ajustan más a la realidad ambiental, la cantidad de variables no controladas podría explicar la ausencia de los efectos benéficos aquí esperados; dado que los que se han reportado mayormente a nivel mundial han sido producto de ensayos dentro del laboratorio o bajo condiciones controladas. Entonces, sería sumamente importante obtener datos de agroecosistemas con la historia de uso del suelo de los últimos años conocida, como así también, plantearse la realización de ensayos en condiciones de campo para develar diversas hipótesis. En este último caso, teniendo en cuenta la aplicación de más y mayores dosis de los elementos aplicados. Dichos estudios permitirán

avanzar en el conocimiento de la relación del Si con las propiedades químicas y mineraloquímicas, pudiendo los mismos ser transferidos al sistema agrícola de la Llanura pampeana. Entre los mismos, debería considerarse la importancia del Si como posible factor para promover la fitorremediación de los suelos por parte del cultivo, lo cual estaría a la vez permitiendo la venta de las semillas de elevada calidad demandadas mundialmente. De ser así, se podría recomendar un uso realmente más sustentable del recurso suelo que redundaría en beneficios perceptibles al momento de la cosecha, considerando los aspectos ambientales, económicos y sociales para todos los factores e individuos afectados por el manejo de dicho agroecosistema. Con tal fin, se evidencia la necesidad generar más conocimiento sobre la dinámica del Si en el sistema planta-suelo, bajo una mirada más sistémica para poder establecer manejos más sustentables.

Bibliografía

Adrees, M., Ali, S., Rizwan, M., Rehman, M., Ibrahim, M., Abbas, F., Farid, M., Qayyum, F.M. y KashifIrshad, M. 2015. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 119: 186–197.

Agostinho, F.B., Tubana, B.S., Martins, M.S. y Datnoff, L.E. 2017. Effect of Different Silicon Sources on Yield y Silicon Uptake of Rice Grown under Varying Phosphorus Rates. *Plants* 6(3): 35; doi:10.3390/plants6030035.

Alexandre, A., Meunier, J., Lezine, A., Vincens, A. y Schwartz, D. 1997. Phytoliths: indicators of grasslands dynamics during the late Holocene in intertropical Africa. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 136:213–229.

Almaroai, Y. A., Usman, A. R., Ahmad, M., Kim, K. R., Moon, D. H. y Lee, S. S. 2012. Effects of synthetic chelators and low-molecular-weight organic acids on chromium, copper, and arsenic uptake and translocation in maize (*Zea mays* L.). *Soil science*, 177(11): 655-663.

Alvarez, C.R., Alvarez, R. y Lorenzo, G. 2001. Carbon dioxide fluxes following tillage from a Mollisol in the Argentine Rolling Pampa. *Eur. J. Soil. Biol.*, 37: 161-166.

Alvarez, M. F., Borrelli, N y Osterrieth, M. 2008. Extracción de biominerales silíceos en distintos sedimentos utilizando dos técnicas básicas. *British Archaeological Research*: 31-38.

Alvarez, M. y Osterrieth, M. 2018. Submicroscopy of Aggregates of Luvic Phaeozems under Different Land Uses in the Southeast of the Buenos Aires Province, Argentina, *Eurasian Soil Science*, 51, 12: 1487–1496.

Alvarez, F.M., Osterrieth, M.L., y Cooper, M. 2018. Changes in the porosity induced by tillage in typical Argiudolls of southeastern Buenos Aires Province, Argentina, and its relationship with the living space of the mesofauna: a preliminary study. *Environ. Earth Sci.* 77, 134.

American Society of Agricultural Engineers. 1992. 35: 4-6. Disponible en: American Society of Agricultural Engineers.

APHA–AWWA–WPFC (American Public Health Association–American Water Works Association– Water Pollution Control Federation).1998. Keys to soil taxonomy, 23rd edition. APHA, Washington, DC, USA.

Armentano, M. 2012. Manejo de la fertilidad del suelo en el cultivo de trigo pan en la región pampeana. INTA Informa, 14: 24-28.

Baligar, V. C., Fageria, N. K., y He, Z. 2001. Nutrient use efficiency in plants. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 32: 921-950.

Bartoli, F. y Souchier, B. 1978. Cycle et rôle du silicium d'origine végétale dans les écosystèmes forestiers tempérés. In Annales des sciences forestières 35(3): 187-202.

Bartoli, F. y Wilding, L.P. 1980. Dissolution of biogenic opal as a function of its physical and chemical properties. Soil Sci Soc Am J., 44: 873–878.

Basile-Doelsch, I. 2006. Si stable isotopes in the Earth's surface: A review. Journal of Geochemical Exploration 88: 252-256.

Benvenuto, M. L. y Osterrieth, M. L. 2016. Silicophytoliths from soybean plants in different growth stages of the Argentine Pampas. Brazilian Journal of Botany, 39: 337-347.

Benvenuto, M.L. 2017. Silicofitolitos en especies dominantes de pastizales, cultivos y suelos asociados en el sudeste bonaerense. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de Mar del Plata. 146 pp.

Berardo, A., Echeverría, H. y Picone, L. 2019. Soil Properties and Nutrient Distribution in Typical Argiudolls of Southeast Buenos Aires Province, Argentina. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 50: 2387-2401.

Berhongaray, G., Alvarez, R., De Paepe, J.L., Caride, C. y Cantet, R. 2013. Land use effects on soil carbon in the Argentine Pampas. Geoderma 192: 97–110.

Bernardos, J.N., Viglizzo, E.F., Jouvét, V., Lértora, F.A., Pordomingo, A.J. y Cid, F.D. 2001. The use of EPIC model to study the agroecological change during 93 years of farming transformation in the Argentine Pampas. Agric. Syst., 69: 215-234.

Bhat, J.A., Shivaraj, S.M., Singh, P., Navadagi, D.B., Tripathi, D.K., Dash, P.K., Solanke, A.U., Sonah, H. y Deshmukh, R. 2019. Role of silicon in mitigation of heavy metal stresses in cropplants. *Plants* 8(3):71 pp.

Blake, G.R. y Hartge, K.H. 1986. Bulk density. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, WI, 363–375.

Borrelli, N., Osterrieth, M. y Marcovecchio, J. 2008. Interrelations of vegetal cover, silicophytolith content and pedogenesis of Typical Argiudolls of the Pampean Plain, Argentina. *Catena*, 75:146-153.

Borrelli, N., Alvarez, M. F., Osterrieth, M. L. y Marcovecchio, J. E. 2010. Silica content in soil solution and its relation with phytolith weathering and silica biogeochemical cycle in Typical Argiudolls of the Pampean Plain, Argentina—a preliminary study. *Journal of Soils and Sediments*, 10: 983-994.

Borrelli, N., Romanelli, A., Fernández Honaine, M., Farenga, M., Fabiani, A., Esquiús, K. S. y Osterrieth, M. 2023. Dissolved silica dynamics, transfer and retention in a temperate groundwater flow-through shallow lake of the Pampean Plain, Argentina. *Aquatic Sciences*, 85: 10.

Bradford, J. M. 1986. Penetrability. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5: 463-478.

Bray, R. H. y Kurtz, L. T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphate in soils. *Soil Science* 59: 39-45.

Calderini, D. F., Torres-León, S. y Slafer, G. A. 1995. Consequences of wheat breeding on nitrogen and phosphorus yield, grain nitrogen and phosphorus concentration and associated traits. *Annals of Botany*, 76(3): 315-322.

Calvino, P. y Divito, A.G. 2017. Manejo del cultivo de trigo en distintas regiones: sudeste de la Provincia de Buenos Aires. En capítulo X del libro “Manual del Cultivo de Trigo”.

Carey, J.C. y Fulweiler, R.W. 2012. Human activities directly alter watershed dissolved silica fluxes. *Biogeochemistry* 111: 125–138.

Caviglia, O. P., Melchiori, R. J. M. y Barbera, A. C. 2005. Ciclos biogeoquímicos del fósforo y el silicio en sistemas agrícolas de la pampa arenosa. *Ciencia del Suelo*, 23(2): 103-111.

Chirkes, J.D, Herrera, A., Heredia, O.S., Zorich, C., Conti, B., y Giardina, E. 2016. Análisis de fósforo y silicio en agua de poro, en un ensayo con RyeGrass. XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rio Cuarto, Córdoba. Libro de resúmenes: 176-178.

Chirkes. J.D., Heredia. O. S., y Fernández Cirelli, A. 2018. Soluble silicon in differently textured mollisols of Argentina. *Geoderma Regional* 15: e00191.

Ciarlo, E. A., Muschietti, M. D. P., Peralta, N., Comparín, M., Gregorini, F., Cipriotti, P. A. y Giuffre, L. 2020. Variabilidad espacial de propiedades del suelo: efecto del uso y tipo. *Ciencia del suelo*, 38(2): 249-261.

Clemens, S. 2006. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*, 88: 1707-1719.

Colin, B. 2011. Papel del silicio en la tolerancia al cobre y el crecimiento del bambú. Tesis Doctoral, Universidad Paul Cézanne.

Conti, B.S. 2017. Distribución de silicio y fósforo entre plantas de Ryegrass y un Hapludol de Intendente Alvear, La Pampa. Tesis de grado para obtener el grado de Licenciado en Ciencias Ambientales otorgado por Universidad de Buenos Aires. 27pp

Corguinha, A.P.B., de Souza, G.A., Gonçalves, V.C., Carvalho, C.D.A., de Lima, W.E.A., Martins, F.A.D., Yamanaka, C.H., Francisco, E.A.B. y Guilherme, L.R.G. 2015. Assessing arsenic, cadmium, and lead contents in major crops in Brazil for food safety purposes. *J. Food Compos. Anal.*, 37: 143–150.

Cosentino, D. y Pecorari, C. 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo*, 20 (1): 9-16.

Cultivos Invernales SD. 2017. Revista técnica de la asociación argentina de productores en siembra directa. ISSN 1850-0633. AAPRESID.

Currie, H. y Perry, C. 2007. Silica in plants: Biological, biogeochemical y Chemical Studies *Annals of Botany* 100:1383-1389.

Datnoff, L. E., Snyder, G. H., y Korndorfer, G.H. 2001. Silicon! in agriculture. *Studies in Plant Science* 8. Elsevier, Amsterdam.

De Melo, S.P., Monteiro, F.A. y De Bona, F.D. 2010. Silicon distribution and accumulation in shoot tissue of the tropical forage grass *Brachiaria brizantha*. *Plant Soil* 336: 241–249.

Delavar, K., Ghanati, F., Zare-Maivan, H., y Behmanesh, M. 2017. Effects of Silicon on the Growth of Maize Seedlings under Normal, Aluminum, and Salinity Stress Conditions, *Journal of Plant Nutrition*, DOI: 10.1080/01904167.2016.1269344.

Delplace, G., Schreck, E., Pokrovsky, O. S., Zouiten, C., Blondet, I., Darrozes, J. y Viers, J. 2020. Accumulation of heavy metals in phytoliths from reeds growing on mining environments in Southern Europe. *Science of The Total Environment*, 712, 135595.

Deluchi, M., Laurencena, P., Varela, L. y Kruse, E. 1995. Caracterización hidrológica regional de la llanura interserrana, provincia de buenos aires. Primera Etapa. Jornadas de comunicaciones científicas de la facultad de ciencias naturales y Museo.

Deren, C., Datnoff, L.E., Snyder, G.H. y Korndörfer, G.H. 2001. Plant genotypes, silicon concentration and silicon related responses Silicon in Agriculture. *Studies in Plant Science*, 8: 149-158.

Di Rienzo J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Cuadroda, M., Robledo, C.W. 2016. InfoStat Versión. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Epstein, E. 1999. Silicon. *Annual Review of Plant Biology*, 50(1):641-664.

Erpelding, B. 2018. Fósforo y silicio en agua de poro en un suelo Argiudol de Pergamino, Argentina. Tesis de grado para obtener el grado de Licenciado en Ciencias Ambientales otorgado por Universidad de Buenos Aires.

FAO-OMS-ALIMENTARIAS, O. S. N. 1999. Comisión del codex alimentarius. *Codex*, 150, 13.

FAO. 2021. Perspectivas de cosechas y situación alimentaria - Informe trimestral mundial Nro 4, diciembre 2020. Roma. Disponible en: <https://doi.org/10.4060/cb2334es>.

Fares, A., Deb, S. K. y Fares, S. 2009. Review of vadose zone soil solution sampling techniques. *Environmental reviews*, 17: 215-234.

Farooq, M. y Dietz, K. 2015. Silicon as Versatile Player in Plant and Human Biology: Overlooked and Poorly Understood *Frontier Plant Sci.* <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00994>.

Feng, J, Shi, Q, Wang, X, Wei, M, Yang, F. y Xu, H. 2010. Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L. *Sci Hort* 123:521–530.

Fernández Honaine, M., Zucol, A., y Osterrieth, M. 2005. Biomineralizaciones de sílice en *Celtis tala* Planchon (Celtidaceae). *Bol Soc Argentina Bot* 40:229–239.

Fernández Honaine, M., Borrelli, N., Osterrieth, M. y del Río, L. 2013. Amorphous silica biomineralizations in sedges: their relation with senescence and silica availability. *Bol Soc Argentina Bot* 48:247–259.

Fernández Honaine, M., Borrelli, N.L, Osterrieth, M, y Del Rio, L 2017. Leaf and culm silicification of Pampas grass (*Cortaderia selloana*) developed on different soils from Pampean region, Argentina *Australian J Bot* 65(1):1–10.

Fishkis, O., Ingwersen, J., Lamers, M., Denysenko, D. y Streck, T. 2010. Phytolith transport in soil: a field study using fluorescent labelling. *Geoderma*, 157(1-2): 27-36.

Frantz, J.M., Khandekar, S. y Leisner S. 2011. Silicon differentially influences copper toxicity response in silicon-accumulator and non-accumulator species. *J Am Soc Hort Sci* 136(5):329–338.

Frayse, F., Cantais, F., Pokrovsky, O.S., Schott, J y Meunier, J.D. 2006. Aqueous reactivity of phytoliths and plant litter: Physico-chemical constraints on terrestrial biogeochemical cycle of silicon. *Journal of Geochemical Exploration*, 88: 202-205.

Frayssinet, C., Osterrieth, L. M., Borrelli, L. N., Honaine, M.F., Ciarlo, E., y Heiland, P. 2019. Effect of silicate fertilizers on wheat and soil properties in Southeastern Buenos Aires province, Argentina. A preliminary study. *Soil and Tillage Research*, 195, 104412. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104412>.

Frayssinet, C., Benvenuto, L.M., Osterrieth, M.L., Borrelli, N.L., Alvarez, F.M. y Fernández Honaine, M. 2021. Content and dynamics of silicophytoliths and silicon in pristine soils and agroecosystems in the southeast of the Pampean Plain, Argentina. In *Advances in Geomorphology and Quaternary Studies in Argentina: Proceedings of the Seventh Argentine Geomorphology and Quaternary Studies Congress*: 456-479 Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66161-8_19.

Frayssinet, C., Osterrieth, M.L., Fernández Honaine, M., Marcovecchio, J.E., La Colla, N. y Villagran, D. 2023. Relationship between silica and silicophytoliths with heavy metals in a wheat (*Triticum aestivum*) planted with silicon fertilization. *Sustainable Water Resources Management*, 9(3): 84. <https://doi.org/10.1007/s40899-023-00861-y>.

Fredlund, G.G. y Tieszen, L.L. 1997. Phytolith and carbon evidence for late quaternary vegetation and climate change in the Southern Black Hills, South Dakota. *Quaternary Research* 47: 206–217.

Furcal-Beriguete, P. y Herrera-Barrantes, A. 2013. Efecto del silicio y plaguicidas en la fertilidad del suelo y rendimiento del arroz. *Agronomía mesoamericana*, 24(2): 357-364.

Gao, X. y Grant, C. A. 2012. Cadmium and zinc concentration in grain of durum wheat in relation to phosphorus fertilization, crop sequence and tillage management. *Applied and Environmental Soil Science*.

Gerard, F., Mayer, K.U., Hodson, M.J., Ranger, J. 2008. Modelling the biogeochemical cycle of silicon in soils: application to a temperate forest ecosystem. *Geochim Cosmochim Acta* 72:741–758.

Giuffrè de Lopez-Camelo, L., Ratto de Miguez, S., y Marban, L. 1997. Heavy metal input with phosphate fertilizers in Argentina. *Sci. Total. Environ*, 204(3): 245-250.

Gocke, M., Liang, W., Sommer, M., y Kuzyakov, Y. 2013. Silicon uptake by wheat: effects of Si pools and pH. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 176:551–560.

Gomes Coe, H.H., Osterrieth, M. y Fernández Honaine, M. 2014. Phytoliths and their applications. En: Gomes Coe, H. y Osterrieth, M. (Eds.) *Synthesis of some*

phytolith studies in South America (Brazil and Argentina). Nova Science Publishers, Inc. :1-26.

Grant, C. A. y Flaten, D. N. 2011. Understanding crop nutrient uptake and distribution patterns in agricultural systems. In *Nutrient use efficiency in plants*: 1-34. Springer. DOI: [10.1007/978-3-642-19174-0_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-19174-0_1).

Grant, C., Flaten, D., Tenuta, M., Malhi, S. y Akinremi, W. 2013. The effect of rate and Cd concentration of repeated phosphate fertilizer applications on seed Cd concentration varies with crop type and environment. *Plant and soil*, 372: 221-233.

Greger, M., Landberg, T., Lux, A. y Singh, B. 2011. Influence of Si on Cd uptake and accumulation in wheat. *Proceedings of the 5th International Conference on silicon in agriculture*, Beijing, China: 55.

Greger, M. y Landberg, T. 2015. Silicon Reduces Cadmium and Arsenic Levels in Field-Grown Crops. *Silicon* DOI [10.1007/s12633-015-9338-z](https://doi.org/10.1007/s12633-015-9338-z).

Greger, M., Kabir, A.H., Landberg, T., Maity, P.J. y Lindberg, S. 2016. Silicate reduces cadmium uptake into cells of wheat. *Environmental Pollution* 211: 90-97.

Guanca, C., Elena, H.J., Xam, N., Rubí Bianch, A. y Cravero, S.A.C. 2012. Atlas climático digital de la República Argentina. INTA. <http://inta.gob.ar/documentos/atlas-climatico-digital-de-la-republica-argentina-1>.

Guntzer, F, Keller, C y Meunier, J. 2012. Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agron Sust. Dev* 32:201–213.

Hall, J. L. 2002. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 53(366): 1-11.

Haynes, R., 2014. A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. *Rev. J. Plant Nutr. Soil Sci.* 177: 831–844.

He, C, Wang, L, Liu, J, Liu, X, Li, X, Ma, J, Lin, Y. y Xu, F. 2013 Evidence for silicon within the cell walls of suspension-cultured rice cells. *New Phytol* 200:700–709. [https:// doi. org/ 10. 1111/ nph. 12401](https://doi.org/10.1111/nph.12401).

He, Q., Wang, F., Wang, Y., Lu, H., Yang, Z., Lv, Q. y Mao, C. 2019. Molecular control and genetic improvement of phosphorus use efficiency in rice. *Molecular Breeding*, 39: 1-15.

Heckman, J. 2013. Silicon: a beneficial substance. *Better crops*. 97- 4: 14-16.

Heredia, O. S. y Cirelli, A. F. 2008. Groundwater chemical pollution risk: assessment through a soil attenuation index. *Environmental geology*, 53(6): 1345-1351.

Hernández, G.R. 2002. Nutrición mineral de las plantas. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de los Andes-Mérida, Venezuela. Disponible en www.forest.ula.ve/rubenhg/nutricionmineral/.

Hernández-Apaolaza, L. 2014. Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? a review. *Planta* 240:447–458. DOI [10.1007/s00425-014-2119-x](https://doi.org/10.1007/s00425-014-2119-x).

Hernández-Apaolaza, L. 2022. Priming with silicon: a review of a promising tool to improve micronutrient deficiency symptoms. *Frontiers in Plant Science*, 13.

Hevia, G.G., Buschiazzo, D.E., Hepper, E.N., Urioste, A.M. y Antón, L.E. 2003. Organic matter in size fractions of soils of the semiarid Argentina. Effects of climate, soil texture and management *Geoderma*, 116: 265-277.

Hodson, M.J. y Sangster, A.G. 1988. Observations on the distribution of mineral elements in the leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.), with particular reference to silicon. *Ann. Bot.* 62: 463–471.

Hu, A. Y., Che, J., Shao, J. F., Yokosho, K., Zhao, X. Q., Shen, R. F. y Ma, J. F. 2018. Silicon accumulated in the shoots results in down-regulation of phosphorus transporter gene expression and decrease of phosphorus uptake in rice. *Plant Soil* 423 (1-2): 317–332. doi: [10.1007/s11104-017-3512-6](https://doi.org/10.1007/s11104-017-3512-6).

Huang, M., Zhou, S., Sun, B. y Zhao, Q. 2008, Heavy metals in wheat grain: Assessment of potential health risk for inhabitants in Kunshan, China. *Sci. Total Environ.* 405: 54–61.

Huang, H., Rizwan, M., Li, M., Song, F., Zhou, S., He, X., Ding, R., Dai, Z., Yuan, Y., Cao, M., Xiong, S. y Tu, S. 2019. Comparative efficacy of organic and inorganic silicon fertilizers on antioxidant response, Cd/Pb accumulation and health risk assessment in wheat (*Triticum aestivum* L.) *Environmental Pollution* 255:113-146.

INTA. 2010. Carta de suelos de la República Argentina. Disponible en: http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/3757/S_Padres/index.htm.

INTA. 2020. Carta de suelos de la república argentina. Series de Suelos- Mar del Plata. Disponible en: [http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/series/Mar del Plata.htm](http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/series/Mar_del_Plata.htm).

Irfan, M., Abbas, M., Shah, J.A. y Memon, M.Y. 2018. Grain yield, nutrient accumulation and fertilizer efficiency in bread wheat under variable nitrogen and phosphorus regimes. *J. Basic Appl. Sci*, 14: 80-86.

Izaguirre-Mayoral, M.L., Brito, M., Baral, B. y Garrido, M. J. 2017. Silicon and nitrate differentially modulate the symbiotic performances of healthy and virus-infected Bradyrhizobium-nodulated cowpea (*Vigna unguiculata*), yardlong bean (*V. unguiculata* subsp. *sesquipedalis*) and mung bean (*V. radiata*). *Plants*, 6(3): 40.

Jahren, A.H. 1996. How and why do phytoliths form? *Biom mineralization: The Phytolitharien Bulletin of the Society for Phytolith Research*, 9: 2-10.

Kabata-Pendias, A. 2011. Trace elements in soils and plants. CRC press.

Kameník, J, Mizera, J, y Řanda, Z 2013 Chemical composition of plant silicaphytoliths. *Environ Chem Lett* 11(2):189–195

Keeping, M.G, Miles, N. y Rutherford, R.S. 2017. Liming an acid soil treated with diverse silicon sources: Effects on silicon uptake by sugarcane (*Saccharum* spp. hybrids). *Journal of Plant Nutrition*. 40: 1417-1436.

Keller, C., Rizwan, M., Davidian, J.C., Pokrovsky, O. S., Bovet, N., Chaurand, P. y Meunier, J.D. 2014. Effect of silicon on wheat seedlings (*Triticum turgidum* L.) grown in hydroponics and exposed to 0 to 30 μM Cu. *Planta* 241:847–860 DOI 10.1007/s00425-014-2220-1.

Khandekar S. y Leisner S. 2011. Soluble silicon modulates expression of *Arabidopsis thaliana* genes involved in copper stress. *J Plant Physiol* 168:699–705.

Korndorfer, G.H., Pereira, H.S. y Nolla, A. 2004. Análise de silício: solo, planta y fertilizante. Grupo de pesquisa “Silício na agricultura” *Boletim técnico* 3: 23.

Kuo, S. 1996. Phosphorus. En: DL Sparks (Ed). Methods of soil analysis. Part 3 Chemical methods. SSSA and ASA. Madison, WI, USA: 869-920.

Labouriau, L.G. 1983. Phytolith work in Brazil: a mini review. The Phytolitharien Newsletter, 2 (2): 6-10.

Laing, M. D., Gatarayiha, M. C. y Adandonon, A. 2006. Silicon use for pest control in agriculture: a review. In Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association, 80: 278-286.

Lambers, H. y Plaxton, W. C. 2015. Phosphorus: back to the roots. Annual plant reviews volume 48: phosphorus metabolism in plants, 48: 1-22.

Lavado, R, Zubillaga; M.S., Álvarez, R. y Taboada, M. 2004. Levels of potentially toxic elements in Pampa Soil. Soil and Sediment Contamination Journal (13)5: 329-339.

Li, J, Leisner, S, y Frantz, J. 2008. Alleviation of copper toxicity in Arabidopsis thaliana by silicon addition to hydroponic solutions. J Am Soc Hort Sci 133(5):670–677.

Liang, Y., Wong, J. W., Wei, L. y Kochian, L. V. 2005. Phytoextraction of metals from soils: questions of optimality and metal speciation. Journal of Environmental Quality, 34(3): 823-829.

Liang, Y.C., Sun, W.C., Zhu, Y.G. y Christie P. 2007. Mechanisms! of silicon mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. Environ Pollut ion 147:422–428.

Liu, L., Li, D., Jie, D., Liu, H., Gao, G., y Li, N. 2019. Translocation of phytoliths within natural soil profiles in Northeast China. Frontiers in Plant Science, 10, 1254.

Liu, L., Song, Z., Li, Q., Ellam, R.M., Tang, J., Wang, Y., Sarkar, B. y Wang, H. 2022. Accumulation and partitioning of toxic trace metal(loid)s in phytoliths of wheat grown in a multielement contaminated soil. Environ. Pollut. 294, 118645.

Liu, L., Song, Z., Tang, J., Li, Q., Sarkar, B., Ellam, R.M., Wang, Y., Zhu, X., Bolan, N. y Wang, H. 2023. New insight into the mechanisms of preferential encapsulation of metal (loid) s by wheat phytoliths under silicon nanoparticle amendment. Science of the Total Environment 875, 162680.

Lloveras, J. y Castro, R. 2008. Fertilización en trigo: ¿Qué nos dice la investigación? *Revista Técnica Aapresid*, 31: 14-19.

Lowenstan, H.A. 1981. Minerals formed by organisms. *Science*, 211:1126-1131.

Lu, M., Cao, X., Pan, J., Li, T., Khan, M.B., Gurajala, H.K., He, Z. y Yang, X. 2020. Identification of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for food safety on two different cadmium contaminated soils. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27: 7943–7956.

Lux, A., Lukačová, Z., Vaculík, M., Švubová, R., Kohanová, J., Soukup, M., Michal Martinka. Y Bokor, B. 2020. Silicification of Root Tissues. *Plants*, 9(1), 111.

Ma, J.F., y Takahashi, E. 2002. Soil, fertiliser, and plant silicon research in Japan. Elsevier, Amsterdam.

Ma, J.F. y Yamaji, N. 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science* 11: 392-397.

Ma J.F. y Yamaji, N. 2008. Functions and transport of silicon in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences* 65: 3049–3057.

Ma, J.F. y Yamaji, N. 2015. A cooperative system of silicon transport in plants. *Trends Plant Sci* 20:435–442.

Madella, M., Alexandre, A. y Ball, T. 2005. International code for phytolith nomenclature 1.0. *Ann Bot.*, 96: 253–260.

Manassero, M.J., Da Silva, M.M., Boff, L.D. y Hurtado, M.A. 2013. Metales pesados en suelos de la planicie costera del río de la plata, partidos de Ensenada y Berisso. *Ciencia del suelo*, 31(2): 253-264.

Manivannan, A., Soundararajan, P. y Jeong, B. R. 2023. Silicon: A “Quasi-Essential” element’s role in plant physiology and development. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1157185.

Márquez Molina, J.J. 2020. Caracterización de la contaminación por nitratos y fósforo mediante métodos geofísicos en la zona no saturada y agua subterránea por actividad de engorde a corral. Tesis de Doctorado, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Escuela para Graduados. Disponible en:

<http://ri.agro.uba.ar/greenstone3/library/collection/tesis/document/2020marquezmolinajohnjairo>

Martínez, D. E. y Osterrieth, M. 1999. Geoquímica de la sílice disuelta en el Acuífero Pampeano en la Vertiente Sudoriental de Tandilia. *Hidrología Subterránea*, 13: 241-250.

Matichenkov, V.V., Pinsky D.L. y Bocharnikova, E.A. 1995. Influence of mechanical compaction of soils on the state and form of available silicon. *Euras. Soil Sci.* 27: 58-67.

Matichenkov, V.V. y Bocharnikova, E.A. 2001. The relationship between silicon and soil physical and chemical properties. In: Datnoff LE, Snyder GH, Korndorfer GH (eds) *Silicon in agriculture. Studies in plant science*, 8: 209–219.

Mazzilli, S.R., Curvetto, N.R., García, F.O., y Migliarini, M.A. 2016. Soil nutrients distribution under different cropping systems in south-eastern Buenos Aires Province, Argentina. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 16(4): 1142-1155.

Mercl, F., Tejnecký, V., Száková, J., Hubová, P., y Tlustoš, P. 2017. Influence of Rhizon MOM suction cup and *Triticum aestivum* L. on the concentration of organic and inorganic anions in soil solution. *Journal of Soils and Sediments*, 17, 820-826.

Meunier, J.D., Guntzer, F., Kirman, S. y Keller C. 2008. Terrestrial plant Si and environmental changes. *Mineral Mag* 72:263–267.

Meunier, J. D., Barboni, D., Anwar-ul-Haq, M., Levard, C., Chaurand, P., Vidal, V., Grauby O., Huc, R., Laffont-Schwob, I., Rabier, J. y Keller, C. 2017. Effect of phytoliths for mitigating water stress in durum wheat. *New Phytologist*, 215(1): 229-239. Doi: 10.1111/nph.14554.

Ministerio de Agroindustria de La Nación. 2018. Dirección de Estimaciones Agrícolas y Delegaciones. Disponible en <http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>.

Miretzky, P. Conzonno, V. y Fernández Cirelli, A. 2001. Geochemical processes controlling silica concentrations in groundwaters of the Salado River drainage basin, Argentina. *Journal of Geochemical Exploration*. 73(3):155-166

Mitani, N. y Feng Ma, J. 2005. Uptake system of silicon in different plant species. *Journal of Experimental Botany* 56 (414): 1255-1261.

Moore K. L, Chen Y., van de Meene A.M.L., Hughes L., Liu W., Geraki T., Mosselmans F., McGrath S.P., Grovenor C. y Zhao F.J. 2014. Combined NanoSIMS and synchrotron X-ray fluorescence reveal distinct cellular and subcellular distribution patterns of trace elements in rice tissues. *New Phytol* 201:104–115.

Motomura, H., Mita, N. y Suzuki, M. 2002. Silica accumulation in long-lived leaves of *Sasa veitchii* (Carriere) Rehder (Poaceae: bambusoideae). *Ann. Bot.* 90, 149–152.

Murtaza, G., Haynes, R. J., Naidu, R., Belyaeva, O. N., Kim, K.-R., Lamb, D. T., & Bolan, N. S. 2011. Natural Attenuation of Zn, Cu, Pb and Cd in Three Biosolids-Amended Soils of Contrasting pH Measured Using Rhizon Pore Water Samplers. *Water, Air, & Soil Pollution*, 221(1-4), 351–363. [doi:10.1007/s11270-011-0795-8](https://doi.org/10.1007/s11270-011-0795-8)

Naeem, A., Zia-ur-Rehman, M., Akhtar, T., Zia, M. H. y Aslam, M. 2018. Silicon nutrition lowers cadmium content of wheat cultivars by regulating transpiration rate and activity of antioxidant enzymes. *Environmental pollution*, 242: 126-135.

Navarro, S. y Navarro, G. 2000. *Química agrícola*. Barcelona. Mundiprensa: 424-427.

Neumann D. y Zur Nieden U. 2001. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants. *Phytochemistry* 56(7):685–692.

Nowakowski, W. y Nowakowska, J. 1997. Silicon and copper interaction in the growth of spring wheat seedlings. *Biologia Plantarum*, 39 (3): 463-466.

OGIMET, 2019. Información profesional de las condiciones meteorológicas en todo el mundo. Selección de Resúmenes Sinópticos diarios. Disponible en: <http://www.ogimet.com/gsynres.phtml>.

OGIMET, 2020. Información profesional de las condiciones meteorológicas en todo el mundo. Selección de Resúmenes Sinópticos diarios. Disponible en: <http://www.ogimet.com/gsynres.phtml>.

Olsen, R.S., Cole, V.C., Watanabe, F.S. y Dean, L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA. Washington, D.C. Circular 939

Osterrieth, M. 2004. Biominerales y Biomineralizaciones. *Cristalografía de Suelos*. Editado por la Sociedad Mexicana de Cristalografía: 206-218.

Osterrieth, M. 2006. Ciclo biogeoquímico del Silicio: Biomineralizaciones silíceas. *Medioambiente en Iberoamérica*. J. Gallardo Lancho Ed. T(II):583-590.

Osterrieth M. L., Madella, M., D. Zurro y F. Alvarez, 2009. Taphonomical Aspects of Silica Phytoliths in the Loess Sediments of the Argentinean Pampas. In: *Quaternary International*, 193: 70-79.

Osterrieth, M., Fernández Honaine, M., Borrelli, N., y Alvarez, M.F. 2014. Silicophytoliths in representative soils of the southeast Pampean Plains, Argentina En: Gomes Coe, H. y Osterrieth, M. (Eds.) *Synthesis of some phytolith studies in South America (Brazil and Argentina)*. Nova Science Publishers, Inc.: 215-242.

Osterrieth, M., Borrelli, N., Alvarez, M. y Fernández Honaine, M. 2015. Silica biogeochemical cycle in temperate ecosystems of the pampean plain, Argentina. *journal of south American earth sciences*. *journal of south American earth sciences* 6: 172-179.

Osterrieth, M., Alvarez, M. F., Fernández Honaine, M., y Erra, G. 2016. Silicophytolith studies in South America and Argentina: scope and limitations for paleoenvironmental reconstruction of the marine isotope stage 3 (MIS3). *Marine Isotope Stage 3 in Southern South America*, 60: 321-352.

Papakosta, D. K. 1994. Phosphorus accumulation and translocation in wheat as affected by cultivar and nitrogen fertilization. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 173(3-4): 260-270.

Parr J.F. y Sullivan L.A. 2011. Phytolith occluded carbon and silica variability in wheat cultivars. *Plant Soil* 342(1-2):165-171.

Payandeh, K., Jafarnejadi, A., Gholami, A., Shokohfar, A. y Panahpor, E. 2018, Evaluation of Cadmium Concentration in Wheat Crop Affected by Cropping System. *Health Sci.* 10, e14400.

Pecorari, C., Guerif, J. y Stengel, P. 1990. Fitólitos en los suelos pampeanos argentinos: influencia sobre las propiedades físicas determinantes de los mecanismos elementales de la evolución de la estructura. In 13. Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 8: 135-141.

Pereira, H.S., Barbosa, N.C., Carneiro, M.A.C. y Korndörfer, G.H. 2007. Avaliação de fontes e de extratores de silício no solo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, DF, 42: :239-247.

Phonde, D.B., Deshmukh P.S., More, R.R. y Banerjee Kaushik. 2017. Studies on soil silicon status in vertisols and silicon nutrient management in Sugarcane. 7th International Conference on Silicon Agriculture. 24-28 October, UAs, Bengaluru, India. 122.

Piperno, D.R. 2006. Phytoliths. A Comprehensive Guide for Archaeologists and Paleoecologists. Lanham, New York, Toronto, Oxford: AltaMira Press 9: 238 pp.

Poblet, A., Osterrieth, M.L. y Marcovecchio. J. 1994. Lead and copper distribution in soils from souytheastern Buenos Aires province (Argentina). Environmental Contaminación, S.P. Varnavas (ed), Edinburg, U.K. .245-249.

Prakash, N. B., Savant, N. K. y Sonar, K. R. 2018. Silicon in Indian agriculture. Westville Publishing House.

Quero, E. 2008. Silicio en la producción de chile. La biosilicificación proceso biológico fundamental en la productividad vegetal (en línea). Disponible en http://loquequero.com/portal/index.php?option=com_content&task=view&id=20&Itemid=1.

Quiroga, A.R., Buschiazzo, D.E., y Peinemann, N. 1996. Soil organic matter particle size fractions in soils of the Semiarid Argentinean Pampas. Soil Sci., 161: 104-108.

Raghothama, K. G. 1999. Phosphate acquisition. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 50(1): 665-693.

Rahman, S. U., Xuebin, Q., Kamran, M., Yasin, G., Cheng, H., Rehim, A., Riaz, L, Rizwan, M, Ali, S., Alsahli, A.A., y Alyemeni, M.N. 2021. Silicon elevated cadmium tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) by endorsing nutrients uptake and antioxidative defense mechanisms in the leaves. Plant Physiology and Biochemistry, 166: 148-159.

Rajendiran, S., Coumar, M.V., Kundu, S., Ajay Dotaniya, M.L. y Rao, A.S. 2012. Role of phytolith occluded carbon of crop plants for enhancing soil carbon sequestration in agro-ecosystems. Curr. Sci. 103: 911–920.

Rhizon, S.M.S. 2003. Rhizon Soil Moisture Sampler- Operating instructions. Soil and water, Eijkelkamp.19:21. Disponible en: www.eijkelkamp.com/files/5089IM2-1921Ie.

Rhoades, J. D. y Ester, J. D. 1986. Solute Contents. Pag. 985 – 1006. En: Klute, A. (ed), Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods, 2da Ed. ASA – SSSA, Madison, Wisconsin.

Richards, L. A. 1954. Pasta saturada, mezclada. En: Investigación de suelos. Métodos de laboratorio y procedimientos para recoger muestras. Editorial Trillas, México: 83 pp.

Richardson, A.E., Lynch, J.P., Ryan, P.R., Delhaize, E., Smith, F.A., Smith, S.E., y Harvey, P.R. 2011. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. Plant and Soil, 349(1-2):121-156.

Rizwan, M. 2012. Silicon-mediated heavy-metal tolerance in durum wheat: evidence of combined effects at the plant and soil levels. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Técnicas. Universidad Aix Marseille.

Rizwan, M., Meunier, J.M., Davidian, J.C., Pokrovsky, O.S., Bovet, N. y Keller, C. 2015. Silicon alleviates Cd stress of wheat seedlings (*Triticum turgidum* L. cv. Claudio) grown in hydroponics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Environ Sci Pollut Res DOI [10.1007/s11356-015-5351-4](https://doi.org/10.1007/s11356-015-5351-4).

Rizwan, M., Ali, S., Abbas, T., Rehman, M., Hannan, F., Keller, C., Al-Wabel, M., Sik y Ok, Y. 2016. Cadmium minimization in wheat: a critical review. Ecotoxicology and environmental safety, 130: 43-53.

Roca, N. 2015. Niveles basales de metales pesados en suelos rurales. un caso en suelos pampeanos [Argentina]. Ciencia del suelo. revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo., 33(2).

Rovner, I. 1971. Potential of opal phytoliths for use in paleoecological reconstruction. Quaternary Research, 1(3):343-359.

Rozas, H. S., Echeverría, H. y Angelini, H. 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y ExtraPampeana argentina. RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias, 38(1): 33-39.

Sandeep, S y Meera, G. 2017. Silicon nutrition alleviates cadmium and zinc induced toxic responses by modulating proline biosynthesis in mycorrhizal *Cajanus cajan* (L.) Mill sp. Genotypes. 7th International Conference on Silicon Agriculture. 24-28 October, UAs, Bengaluru, India. 73.

Sasal, M.C., Andriulo, A.E., y Taboada, M.A. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil & Tillage Research* 87: 9–18.

Schreck, E., Pokrovsky, O. S., Zouiten, C., Blondet, I., Darrozes, J., Viers, J. y Delplace, G. 2020. Accumulation of heavy metals in phytoliths from reeds growing on mining environments in Southern Europe. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135595>.

Severiche, C.A., Luna, J. y González, H. 2013. Evaluación analítica para determinación del fósforo total en aguas por el método del ácido ascórbico. *Ingenium*, 7(17): 37-41.

Sharma, A. K. y Sharma, A. 2016. Perspectives in the understanding of biochemical processes governing the accumulation and homeostasis of major nutrients in plants during the post-genomic era. *Plant Cell Reports*, 35(1): 1-41.

Shi, G., Cai, Q., Liu, C., Wu, L. y Jiang, G. 2005. Effect of silicate on the growth and Cd uptake of rice plants grown in Cd-contaminated soils. *Chemosphere*, 58(2): 153-160.

Shotbolt, L. 2010. Pore water sampling from lake and estuary sediments using Rhizon samplers. *J Paleolimnol* 44, 695–700. <https://doi.org/10.1007/s10933-008-9301-8>

Sigfusson, B., Paton, G. I., y Gislason, S. R. 2006. The impact of sampling techniques on soil pore water carbon measurements of an Icelandic Histic Andosol. *Science of The Total Environment*, 369(1-3), 203–219. [doi:10.1016/j.scitotenv.2006.01.0](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.01.0)

Simonson, R. W. 1959. Outline of a generalized theory of soil genesis. *Soil Science Society of America Journal*, 23(2): 152-156.

Smith, S. E. y Read, D. J. 2010. *Mycorrhizal Symbiosis* (3rd ed.). Academic Press.

Snyder, G. H., Matichenkov, V. V. y Datnoff, L. E. 2007. 19 Silicon. Handbook of Plant Nutrition, 551.

Socrates, G. 2004. Infrared and Raman characteristic group frequencies: tables and charts. John Wiley & Sons.

Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

Sommer, M., Kaczorek, D., Kuzyakov, Y. y Breuer, J. 2006. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes-a review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 169: 310–329.

Song, Z., Liu, H., Zhao, F., y Xu, C. 2014. Ecological stoichiometry of N: P: Si in China's grasslands. *Plant and soil*, 380:165-179.

Sparks, D.L. 2003. Environmental Soil Chemistry. 2nd Edition. Academic Press, p.351.

Struyf E, y Conley, D.J. 2009. Silica: an essential nutrient in wetland biogeochemistry. *Front. Ecol. Environ.* 7: 88–94.

Struyf, E. y Conley, D.J. 2012. Emerging understanding of the ecosystem silica filter. *Biogeochemistry* 107: 9–18.

Sur, P. L. C. 2017. Manual del Cultivo del Trigo. Buenos Aires, Argentina: Instituto Internacional de Nutrición de Plantas.

Teodoro, P.E., Ribeiro, L.P., Oliveira, E.P., Corrêa, C.C.G. y Torres, F.E. 2015. Acúmulo de massa seca na soja em resposta a aplicação foliar com silício sob condições de déficit hídrico. *Bioscience. Journal*, 31(1): 161-170.

Thornthwaite C.W. 1948. An approach towards a rational classification of climate. *Geographical review* 38:55-94.

Tiessen H., Moir. J.O. 1993. Characterization of available P by segmental extraction. En: M.R. Carter (ed.) *Soil Sampling and methods of analysis*. Canadian Soc. Soil Sci.: 75-86pp

Tilman, D, Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R. y Polasky, S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418: 671-677.

Tran, T. T., Nguyen, T. T., Nguyen, V. T., Huynh, H. T., Nguyen, T. T. y Nguyen, M. N. 2019. Copper encapsulated in grass-derived phytoliths:

Characterization, dissolution properties and the relation of content to soil properties. *Journal of environmental management*, 249,109423.

Tripathi, D.K., Singh, V.P., Prasad, S.M., Chauhan, D.K., Dubey, N. K. y Rai, A.K. 2015. Silicon-mediated alleviation of Cr (VI) toxicity in wheat seedlings as evidenced by chlorophyll fluorescence, laser induced breakdown spectroscopy and anatomical changes. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 113: 133–144.

Tubaña, B., Tapasya, B. y Datnoff, E.L. 2016. A review of silicon in soil in plants and its role in US agriculture: history and future perspective. *Soil Sci.* 181 (9/10 993), 411.

Tubaña, B. S. y Heckman, J.R. 2015. Silicon in soils and plants. *Silicon and plant diseases*, 7-51.

Twiss, P.C., Suess, E. y Smith., R.M. 1969. Morphological classification of grass phytoliths. *Soil Science of America Proceedings*, 33: 109-115.

Udden, J. A. 1914. Mechanical composition of clastic sediments. *Bulletin of the geological society of America*, 25(1): 655-744.

Vaculík, M., Lukačová, Z., Bokor, B., Martinka, M., Tripathi, D.K. y Lux, A. 2020. Alleviation mechanisms of metal(loid) stress in plants by silicon: a review. *Journal of Experimental Botany*, 71(21): 6744–6757.

Vance, C. P., Uhde-Stone, C. y Allan, D. L. 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 157(3): 423-447.

Vandevenne, F., Struyf, E., Clymans, W. y Meire, P. 2012. Agricultural silica harvest: have humans created a new loop in the global silica cycle? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10(5): 243-248.

Vandevenne, F, Barao, L, Ronchi, B, Govers, G, Meire, P, Kelly, E.F. y Struyf, E. 2015. Silicon pools in human impacted soils of temperate zones. *Glob Biogeochem Cycles* 29:1439– 1450.

Villegas, J. M., Way, M. O., Pearson, R. A. y Stout, M. J. 2017. Integrating soil silicon amendment into management programs for insect pests of drill-seeded rice. *Plants*, 6(3): 33. doi:[10.3390/plants6030033](https://doi.org/10.3390/plants6030033).

Walsh, O. S., Shafian, S., McClintick-Chess, J. R., Belmont, K. M. y Blanscet, S. M. 2018. Potential of silicon amendment for improved wheat production. *Plants*, 7(2): 26. doi: [10.3390/plants7020026](https://doi.org/10.3390/plants7020026).

Wang, Y. y Huang, J. 2019. Phosphorus acquisition and remobilization in plants. In *Annual Plant Reviews Online*: 37-62. Wiley.

Waters, B.M., Uauy, C., Dubcovsky, J, y Grusak, M.A 2009. Wheat (*Triticum aestivum*) NAM proteins regulate the translocation of iron, zinc, and nitrogen compounds from vegetative tissues to grain. *J Exp Bot* 60:4263–4274.

Wei, W., Peng, H., Xie, Y., Wang, X., Huang, R., Chen, H. y Ji, X. 2021. The role of silicon in cadmium alleviation by rice root cell wall retention and vacuole compartmentalization under different durations of Cd exposure. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 226, 112810.

Wentworth, C. K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The journal of geology*, 30(5): 377-392.

White, B., Tubaña, B.S., Babu, T., Mascagni Jr, H., Agostinho, F., Datnoff, L. E. y Harrison, S. 2017. Effect of silicate slag application on wheat grown under two nitrogen rates. *Plants*, 6(4): 47. doi:[10.3390/plants6040047](https://doi.org/10.3390/plants6040047).

Wu, J., Mock, H., Giehl, R, Pitann, B. y Mühlhling, K. 2018 Silicon decreases cadmium concentrations by modulating root endodermal suberin development in wheat plants. *Journal of Hazardous Materials*. 364(15):581-590.

Zadoks, J.C., Chang, T.T. y Konzak, C.F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14: 415–421.

Zancajo, V. M., Diehn, S., Filiba, N., Goobes, G., Kneipp, J. y Elbaum, R. 2019. Spectroscopic discrimination of sorghum silica phytoliths. *Frontiers in plant science*, 10, 1571.

Apéndice

Capítulo 3:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Si (mg/g)	144	0,16	0,05	48,77

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	6403,47	17	376,67	1,44	0,1284
tratamiento*estadio	111,99	10	11,20	0,04	>0,9999
Error	32940,00	126	261,43		
Total	39343,48	143			

Cuadro 3.1: Tabla de varianzas en el contenido de Si (mg/g) dentro de la biomasa vegetal, abordando la interacción entre los tratamientos y estadios, correspondiente al ciclo del 2018.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
SI (mg/g)	240	0,10	0,03	59,12

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	7088,40	17	416,96	1,37	0,1512
tratamiento*estadio	1976,96	10	197,70	0,65	0,7686
Error	67391,24	222	303,56		
Total	74479,64	239			

Cuadro 3.2: Tabla de varianzas en el contenido de Si (mg/g) dentro de la biomasa vegetal, abordando la interacción entre los tratamientos y estadios, correspondiente al ciclo del 2019.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
P (mg/g)	168	0,34	0,26	39,54

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	144,94	17	8,53	4,45	<0,0001
tratamiento*estadio	5,71	10	0,57	0,30	0,9808
Error	287,53	150	1,92		
Total	432,47	167			

Cuadro 3.3: Tabla de varianzas en el contenido de P (mg/g) dentro de la biomasa vegetal, abordando la interacción entre los tratamientos y estadios, correspondiente al ciclo del 2018.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
P (mg/g)	249	0,07	3,8E-03	65,67

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	119,71	17	7,04	1,06	0,3987
tratamiento*estadio	19,48	10	1,95	0,29	0,9825
Error	1540,21	231	6,67		
Total	1659,92	248			

Cuadro 3.4: Tabla de varianzas en el contenido de P (mg/g) dentro de la biomasa vegetal, abordando la interacción entre los tratamientos y estadios, correspondiente al ciclo del 2019.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Cu (mg/g)	164	0,04	0,00	64,49

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3,3E-04	17	1,9E-05	0,36	0,9906
tratamiento*estadio	2,8E-04	10	2,8E-05	0,52	0,8714
Error	0,01	146	5,4E-05		
Total	0,01	163			

Cuadro 3.5: Tabla de varianzas en el contenido de Cu (mg/g) dentro de la biomasa vegetal, abordando la interacción entre los tratamientos y estadios, correspondiente al ciclo del 2018.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CONC (mg/g)	217	0,17	0,10	76,47

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1,5E-03	17	8,8E-05	2,37	0,0025
tratamiento*estadio	3,5E-04	10	3,5E-05	0,95	0,4905
Error	0,01	199	3,7E-05		
Total	0,01	216			

Cuadro 3.6: Tabla de varianzas en el contenido de Cu (mg/g) dentro de la biomasa vegetal, abordando la interacción entre los tratamientos y estadios, correspondiente al ciclo del 2019.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Cd final	134	0,09	0,00	1,27

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2,7E-09	17	1,6E-10	0,67	0,8299
tratamiento*estadio	1,2E-09	10	1,2E-10	0,51	0,8812
Error	2,7E-08	116	2,4E-10		
Total	3,0E-08	133			

Cuadro 3.7: Tabla de varianzas en el contenido de Cd (mg/g) dentro de la biomasa vegetal, abordando la interacción entre los tratamientos y estadios, correspondiente al ciclo del 2018.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Cd final	201	0,16	0,09	90,05

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2,1E-05	17	1,2E-06	2,12	0,0079
tratamiento*estadio	4,5E-06	10	4,5E-07	0,80	0,6336
Error	1,0E-04	183	5,7E-07		
Total	1,3E-04	200			

Cuadro 3.8: Tabla de varianzas en el contenido de Cd (mg/g) dentro de la biomasa vegetal, abordando la interacción entre los tratamientos y estadios, correspondiente al ciclo del 2019.

Capítulo 4:

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
SiO ₂ (mg/L) FINAL	54	0,84	0,76	20,33

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	52564,54	17	3092,03	10,76	<0,0001
Tratamiento*profundidad	7679,60	10	767,96	2,67	0,0148
Error	10342,87	36	287,30		
Total	62907,40	53			

Cuadro 4.1: Tabla de varianzas en el contenido de SiO₂ (mg/g) dentro de la solución de suelos (extractos), abordando la interacción entre los tratamientos y profundidades, correspondiente al ciclo del 2018.

Análisis de la varianza

estadio	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
madurativo	Si (mg/L)	94	0,22	0,04	46,67

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	5032,71	17	296,04	1,23	0,2652
tratamiento*profundidad	1748,95	10	174,90	0,72	0,6987
Error	18337,45	76	241,28		
Total	23370,17	93			

Cuadro 4.2: Tabla de varianzas en el contenido de SiO₂ (mg/g) dentro de la solución de suelos (rizometros), abordando la interacción entre los tratamientos y profundidades, correspondiente al ciclo del 2018.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
SiO ₂ (mg/L) FINAL	54	0,32	4,9E-03	36,32

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	5919,05	17	348,18	1,02	0,4656
tratamiento*profundidad	1705,27	10	170,53	0,50	0,8804
Error	12344,10	36	342,89		
Total	18263,14	53			

Cuadro 4.3: Tabla de varianzas en el contenido de SiO₂ (mg/g) dentro de la solución de suelos (extractos), abordando la interacción entre los tratamientos y profundidades, correspondiente al ciclo del 2019.

Análisis de la varianza

estadio	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
madurativo	Si (mg/L)	29	0,60	0,25	22,81

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2642,14	13	203,24	1,73	0,1535
Tratamiento*profundidad	1173,87	6	195,65	1,67	0,1968
Error	1758,71	15	117,25		
Total	4400,85	28			

Cuadro 4.4: Tabla de varianzas en el contenido de SiO₂ (mg/g) dentro de la solución de suelos (rizometros), abordando la interacción entre los tratamientos y profundidades, correspondiente al ciclo del 2019.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
P (mg/L)	54	0,57	0,37	36,16

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	13050,21	17	767,66	2,84	0,0042
tratamiento*prof (cm)	989,67	10	98,97	0,37	0,9535
Error	9740,41	36	270,57		
Total	22790,63	53			

Cuadro 4.5: Tabla de varianzas en el contenido de H-PO₄ (mg/g) dentro de la solución de suelos (extractos), abordando la interacción entre los tratamientos y profundidades, correspondiente al ciclo del 2018.

Análisis de la varianza

estadio	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
madurativo	PO4 (mg/L)	26	0,69	0,40	43,45

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	36,18	12	3,01	2,40	0,0654
Tratamiento*Profundidad	2,88	5	0,58	0,46	0,7994
Error	16,31	13	1,25		
Total	52,49	25			

Cuadro 4.6: Tabla de varianzas en el contenido de H-PO₄ (mg/g) dentro de la solución de suelos (rizometros), abordando la interacción entre los tratamientos y profundidades, correspondiente al ciclo del 2018.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
P (mg/L)	54	0,41	0,13	30,56

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	9002,24	17	529,54	1,46	0,1654
tratamiento*profundidad	847,77	10	84,78	0,23	0,9907
Error	13037,04	36	362,14		
Total	22039,28	53			

Cuadro 4.7: Tabla de varianzas en el contenido de H-PO₄ (mg/g) dentro de la solución de suelos (extractos), abordando la interacción entre los tratamientos y profundidades, correspondiente al ciclo del 2019.

Análisis de la varianza

estadio	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
madurativo	P (mg/L)	18	0,84	0,47	42,21

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	289,90	12	24,16	2,24	0,1924
Tratamiento*Profundidad	82,96	5	16,59	1,54	0,3244
Error	53,98	5	10,80		
Total	343,88	17			

Cuadro 4.8: Tabla de varianzas e3n el contenido de H-PO₄ (mg/g) dentro de la solución de suelos (rizometros), abordando la interacción entre los tratamientos y profundidades, correspondiente al ciclo del 2019.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Cu 324.754 (Aqueous-Axial-..	51	0,51	0,25	33,69

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,04	17	2,6E-03	1,98	0,0452
Tratamiento*Profundidad	0,01	10	8,8E-04	0,67	0,7424
Error	0,04	33	1,3E-03		
Total	0,09	50			

Cuadro 4.9: Tabla de varianzas e3n el contenido de Cu (mg/g) dentro de la solución de suelos (extractos), abordando la interacción entre los tratamientos y profundidades, correspondiente al ciclo del 2018.

Análisis de la varianza

estadio	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
madurativo	Cu 324.754 (Aqueous-Axial-..	31	0,78	0,49	27,23

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,01	17	5,9E-04	2,68	0,0388
Tratamiento	0,01	5	1,2E-03	5,57	0,0059
Profundidad	1,3E-04	2	6,3E-05	0,29	0,7545
Tratamiento*Profundidad	0,01	10	6,4E-04	2,89	0,0382
Error	2,9E-03	13	2,2E-04		
Total	0,01	30			

Cuadro 4.10: Tabla de varianzas e3n el contenido de Cu (mg/g) dentro de la solución de suelos (rizometros), abordando la interacción entre los tratamientos y profundidades, correspondiente al ciclo del 2018.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Cu 324.754 (Aqueous-Axial-..	54	0,37	0,07	46,02

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,01	17	7,3E-04	1,24	0,2874
Tratamiento*Profundidad	4,9E-03	10	4,9E-04	0,83	0,6051
Error	0,02	36	5,9E-04		
Total	0,03	53			

Cuadro 4.11: Tabla de varianzas e3n el contenido de Cu (mg/g) dentro de la solución de suelos (extractos), abordando la interacción entre los tratamientos y profundidades, correspondiente al ciclo del 2019.

Análisis de la varianza

estadio	Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
madurativo	Cu 324.754 (Aqueous-Axial-..	18	0,63	0,00	50,16

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,01	12	6,0E-04	0,71	0,7115
Tratamiento*Profundidad	1,4E-03	5	2,9E-04	0,34	0,8675
Error	4,2E-03	5	8,4E-04		
Total	0,01	17			

Cuadro 4.12: Tabla de varianzas e3n el contenido de Cu(mg/g) dentro de la solución de suelos (rizometros), abordando la interacción entre los tratamientos y profundidades, correspondiente al ciclo del 2019.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Cd 228.802 (Aqueous-Axial-..	31	0,52	0,00	134,05

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1,0E-05	16	6,3E-07	0,95	0,5434
Tratamiento*Profundidad	2,7E-06	9	3,0E-07	0,45	0,8856
Error	9,3E-06	14	6,7E-07		
Total	1,9E-05	30			

Cuadro 4.13: Tabla de varianzas e3n el contenido de Cd (mg/g) dentro de la solución de suelos (extractos), abordando la interacción entre los tratamientos y profundidades, correspondiente al ciclo del 2018.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Cu 324.754 (Aqueous-Axial-..	54	0,37	0,07	46,02

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,01	17	7,3E-04	1,24	0,2874
Tratamiento*Profundidad	4,9E-03	10	4,9E-04	0,83	0,6051
Error	0,02	36	5,9E-04		
Total	0,03	53			

Cuadro 4.14: Tabla de varianzas e3n el contenido de Cd (mg/g) dentro de la solución de suelos (extractos), abordando la interacción entre los tratamientos y profundidades, correspondiente al ciclo del 2019.