



UNIVERSIDAD DE CHILE
VICERRECTORÍA DE ASUNTOS ACADÉMICOS
DEPARTAMENTO DE POSTGRADO Y POSTÍTULO
PROGRAMA INTERFACULTADES

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LOS FERTILIZANTES FOSFATADOS EN LA
ACUMULACIÓN DE CADMIO EN SUELOS CULTIVADOS CON MAÍZ (*Zea mays*)**

Tesis para optar al Grado de Magister en Gestión y Planificación Ambiental

Liliana Regina Villanueva Nilo

Directora de tesis: M.Sc. María Adriana Carrasco Rimassa

UNIVERSIDAD DE CHILE
VICERRECTORÍA DE ASUNTOS ACADÉMICOS
DEPARTAMENTO DE POSTGRADO Y POSTÍTULO
PROGRAMA INTERFACULTADES

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LOS FERTILIZANTES FOSFATADOS EN LA
ACUMULACIÓN DE CADMIO EN SUELOS CULTIVADOS CON MAÍZ (*Zea mays*)**

Liliana Regina Villanueva Nilo

Directora de Tesis:

M.Sc. M. Adriana Carrasco

Comisión de Evaluación de Tesis:

Presidente:

Dr. Italo Serey

Profesores asesores:

M.Sc. Inés Ahumada

Ing.Agr. Sergio González

A Dios. “La tierra produce por sí misma: primero el tallo, luego la espiga y más tarde los granos que llenan la espiga”. Marcos 4:28.

“El gozo de la cosecha supera el

sufrimiento y rigor de la siembra". Luis
Llantes (Chubut, Argentina).

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mis más sinceros agradecimientos a mi familia, por su comprensión durante repetidas ausencias a encuentros familiares debido a la dedicación concedida a la presente investigación. Junto con ello, manifestarles todo mi cariño.

Muy especialmente también deseo agradecer la dedicación y apoyo otorgado por la profesora María Adriana Carrasco Rimassa, académica e investigadora de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, a esta investigación. Le agradezco todo su tiempo, particularmente todos los fines de semana dedicados a esta investigación, que sin duda restó de su vida familiar, y que posibilitaron su término y elaboración de este documento.

Asimismo, agradezco la confianza brindada por la Universidad de Chile, a través de su Programa de Postgrado, al otorgarme la beca PG/42/2001 de financiamiento parcial para la ejecución de la presente investigación.

Mis sinceros agradecimientos a:

Sr. Italo Serey, presidente de la comisión de tesis, académico e investigador de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile, por sus consejos y apoyo en el proceso de titulación y en la concreción del presente documento.

Sra. Inés Ahumada, profesora colaboradora, académica e investigadora de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile, debido a su dedicación a esta investigación, sus consejos y por la valiosa información aportada.

Sr. Sergio González, profesor colaborador, investigador del Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA - La Platina, por su apoyo y valiosa información aportada.

Sra. Carmen Luz de la Maza, académica e investigadora de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile, que me apoyo en las etapas iniciales para concretar el proyecto de la investigación.

Srta. Adriana Valenzuela, profesional del Servicio Agrícola y Ganadero, M.Sc. de la Pontificia Universidad Católica de Chile, a quien expreso especialmente mis

agradecimientos por la valiosa información entregada para que fuera posible esta investigación.

Srta. Alexia Pereira, Secretaria del Programa Magíster Interfacultades en Gestión y Planificación Ambiental de la Universidad de Chile, por su apoyo permanente durante la carrera y durante todo el proceso de investigación y titulación.

Sra. Marcia Calfucoy y Sra. Marcela Lagos, Secretarias del Programa de Postgrado de la Universidad de Chile, por su apoyo permanente y especialmente en las etapas iniciales de la carrera.

Además, agradezco muy especialmente a aquellas y aquellos especiales amigas y amigos, de las promociones 2000 a la presente, que me apoyaron durante todo el proceso de mi titulación. Gracias por sus consejos y sinceras manifestaciones de apoyo en todo momento.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	12
SUMMARY	13
1.INTRODUCCIÓN	14
2.PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	17
3.MARCO TEÓRICO	18
3.1. Agricultura sostenible	18
3.2. Modelo de evaluación y manejo del riesgo del cadmio en el suelo	19
3.2.1. Descripción general del modelo de acumulación.....	21
3.2.2. Concentraciones de cadmio en suelos agrícolas.....	23
3.2.3. Tasa anual de entrada de Cd a los suelos agrícolas (K_e).....	24
3.2.4. Extracción de cadmio vía cultivos	25
3.2.5. Lixiviación de cadmio en suelos agrícolas	25
4.HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	28
4.1. Hipótesis.....	28
4.2. Objetivo general	29
4.2.1. Objetivos específicos.....	29
5.REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	30
5.1. Aspectos del cadmio	30
5.1.1. Caracterización.....	30
5.1.2. Aportes al ambiente.....	31
5.1.3. Efectos sobre la salud humana	32
5.1.4. Relación con el medio ambiente	34
5.2. Aspectos de los fertilizantes fosfatados	37
5.2.1. Origen	37

5.2.2. Procesos de fabricación y tipos de fertilizantes	38
5.2.3. Límites máximos permitidos de cadmio en los fertilizantes	40
5.3. Aspectos del cultivo del maíz	43
5.3.1. Usos del maíz y sus implicancias respecto del cadmio	45
5.3.2. Fertilización fosfatada.....	47
5.3.3. Suelos para maíz.....	50
6. MATERIALES Y MÉTODOS	51
6.1. Fases del estudio	51
6.2. Análisis de antecedentes	52
6.3. Supuestos para la aplicación del modelo predictivo	52
6.4. Selección de los suelos para la aplicación del modelo.....	53
6.4.1. Suelos para cultivo del maíz.....	53
6.4.2. Características generales de las series de suelos	54
7. RESULTADOS	56
7.1. Principales fertilizantes fosfatados utilizados en Chile	56
7.2. Contenido de cadmio	60
7.2.1. Roca fosfórica.....	60
7.2.2. Fertilizantes fosfatados.....	62
7.3. Cálculo de la acumulación de cadmio en la capa arable de los suelos.....	67
7.3.1. Concentración inicial de Cd en el suelo, $Cd_s(O)$	67
7.3.2. Cálculo de K_e (entrada de Cd a la capa arable de los suelos).....	67
7.3.3. Cálculo de K_p (tasa de extracción anual de cadmio del cultivo del maíz).....	70
7.3.4. Cálculo de K_D (coeficiente de partición)	71
7.3.5. Cálculo de K_l (tasa anual de lixiviación de Cd)	72
7.4. Proyección del cadmio en el tiempo en la capa arable de los suelos	74
7.4.1. Resumen de parámetros usados	74

7.4.2. Escenarios	75
7.4.3. Esquemas de análisis.....	78
7.4.4. Curvas de proyección.....	84
7.4.5. Limitaciones de la investigación.....	89
7.5. Discusión	89
7.5.1. Lixiviación del cadmio del suelo	90
7.5.2. Efecto del pH del suelo.....	90
7.5.3. Extracción por el cultivo.....	91
7.5.4. Límites máximos de cadmio.....	91
7.5.5. Proyección del cadmio en 50 años	93
7.5.6. Exactitud del modelo	94
7.5.7. Importancia del K_D	95
7.5.8. Impacto de la fertilización fosfatada	96
7.5.9. Efectos en la salud humana	96
7.5.10. Alternativas para manejar el Cd.....	96
8. CONCLUSIONES	98
9. RECOMENDACIONES.....	100
BIBLIOGRAFÍA	102
GLOSARIO	109
SIGLAS	112
ANEXO I.....	113
ANEXO II.....	115
ANEXO III.....	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Entradas y salidas de información de las etapas del modelo de manejo del riesgo...	20
Figura 2. Suelo – vías de transferencia del cadmio en la solución suelo	22
Figura 3. Distribución de las especies acuosas de cadmio según pH.	31
Figura 4. Ciclo del cadmio en la agricultura danesa.....	35
Figura 5. Cartilla de manejo del cadmio en papas para un producto de calidad.....	36
Figura 6. Procesos de elaboración de fertilizantes fosfatados a partir de la fosforita natural. ...	40
Figura 7. Superficie cultivada con maíz según regiones, temporada 2000-2001.....	44
Figura 8. Distribución porcentual de la superficie cultivada con maíz por regiones, temporada 2000-20001.	44
Figura 9. Usos del maíz.	46
Figura 10. Usos del maíz por categoría de consumo.	47
Figura 11. Comunas de la VI Región con una superficie de maíz superior a 2.000 ha.	53
Figura 12. Importaciones chilenas de fertilizantes fosfatados, periodo 1990-2001.....	56
Figura 13. Evolución del volumen importado de superfosfatos por Chile desde México y Estados Unidos, periodo 1990-2001.....	59
Figura 14. Distribución porcentual de las importaciones de superfosfato por país, año 2001. 60	60
Figura 15. Localización de principales depósitos de fosforita en Estados Unidos.....	61
Figura 16. Localización de depósitos mayores de fosforita en México.	62
Figura 17. Valores de K_{fer} para los Estados Miembros de la Unión Europea y Chile.....	69
Figura 18. Proyección del Cd en el tiempo para $K_f = 0$ [g ha ⁻¹], $Cd_s(0) = 0,11$ [mg kg ⁻¹], $K_p = 0,0017$ y $0,1300$ [g ha ⁻¹]	85
Figura 19. Proyección del Cd en el tiempo para $K_f = 0,00015$ [g ha ⁻¹], $Cd_s(0) = 0,11$ [mg kg ⁻¹], $K_p = 0,0017$ y $0,1300$ [g ha ⁻¹]	85
Figura 20. Proyección del Cd en el tiempo para $K_f = 0,00024$ [g ha ⁻¹], $Cd_s(0) = 0,11$ [mg kg ⁻¹], $K_p = 0,0017$ y $0,1300$ [g ha ⁻¹]	86

Figura 21. Proyección del Cd en el tiempo para $K_f = 0,00051 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$, $Cd_s(0) = 0,11 \text{ [mg kg}^{-1}\text{]}$, $K_p = 0,0017$ y $0,1300 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$	86
Figura 22. Proyección del Cd en el tiempo para $K_f = 0 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$, $Cd_s(0) = 0,345 \text{ [mg kg}^{-1}\text{]}$, $K_p = 0,0020$ y $0,1300 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$	87
Figura 23. Proyección del Cd en el tiempo para $K_f = 0,00015 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$, $Cd_s(0) = 0,345 \text{ [mg kg}^{-1}\text{]}$, $K_p = 0,0020$ y $0,1300 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$	87
Figura 24. Proyección del Cd en el tiempo para $K_f = 0,00024 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$, $Cd_s(0) = 0,345 \text{ [mg kg}^{-1}\text{]}$, $K_p = 0,0020$ y $0,1300 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$	88
Figura 25. Proyección del Cd en el tiempo para $K_f = 0,00051 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$, $Cd_s(0) = 0,345 \text{ [mg kg}^{-1}\text{]}$, $K_p = 0,0020$ y $0,1300 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$	88

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Fuentes de cadmio.....	31
Cuadro 2. Concentración de cadmio en las rocas.....	38
Cuadro 3. Valores límites para cadmio en los fertilizantes y suelos en diversos países.	42
Cuadro 4. Dosis de fosfato recomendadas para un rendimiento de maíz mayor de 120 [qqm ha ⁻¹] ^a en dos tipos de suelo, de acuerdo al índice de fósforo disponible.....	49
Cuadro 5. Alternativas de fertilizantes para el maíz.	49
Cuadro 6. Principales series de suelos de la VI Región donde se cultiva maíz.....	54
Cuadro 7. Propiedades físicas y químicas de ocho series de suelos de la VI Región (Orden Mollisol).	55
Cuadro 8. Toneladas de superfosfato importado según país de origen.....	58
Cuadro 9. Contenido de cadmio en distintos fertilizantes fosfatados, según diversas investigaciones.....	63
Cuadro 10. Contenido de cadmio en los fertilizantes fosfatados comercializados en Chile, según embarques.	65
Cuadro 11. Contenido de cadmio en fertilizantes fosfatados comercializados en Chile, valores expresados en función del P aplicado.	66
Cuadro 12. Cálculo de la entrada anual de fertilizantes fosfatados al suelo (K_{fer}).	69
Cuadro 13. Valores calculados de K_D para ocho series de suelo Mollisol de la VI Región.....	72
Cuadro 14. Cálculo de K_f para la aplicación del modelo de acumulación de cadmio.	72
Cuadro 15. Precipitaciones VI Región.	73
Cuadro 16. Cálculo del exceso de precipitación anual (F), VI Región.	74
Cuadro 17. Parámetros usados en la aplicación del modelo a las condiciones del estudio.	75
Cuadro 18. Escenarios de proyección en el tiempo, de la concentración de cadmio en los suelos seleccionados.....	76

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue estimar el impacto de los fertilizantes fosfatados en la acumulación de cadmio en la capa arable de suelos cultivados con maíz. Se utilizó un modelo, compuesto por tres submodelos, utilizado en la Unión Europea para evaluar el riesgo frente a la utilización de fertilizantes que contienen cadmio. Se aplicó el submodelo de acumulación y se escogió el cultivo del maíz (*Zea mays*) realizando una simulación para ocho series de suelos de la VI Región de Chile donde se concentra la superficie de este cultivo. De acuerdo a las características de estas series de suelo y los parámetros requeridos para el modelo, se construyeron 48 escenarios de análisis y se consideró un plazo de 50 años. En términos generales, los resultados señalaron una acumulación de cadmio para aquellos escenarios con bajas tasas de extracción de cadmio por el cultivo de maíz (K_p) y de lixiviación de cadmio desde el suelo (K_l). Asimismo, para entradas de cadmio desde los fertilizantes con mayores concentraciones de este metal, se produce una tendencia general a la acumulación de cadmio en el suelo. Por otra parte, una alta concentración inicial de cadmio en el suelo también produjo una tendencia general a su acumulación, cuando la tasa de lixiviación (K_l) y de extracción del cultivo (K_p) fueron bajas. Utilizando la legislación extranjera de referencia sólo en cuatro de los escenarios analizados se esperaba contaminación de los suelos con cadmio ($>0,5$ [mg kg⁻¹ peso seco]) en un plazo de 38 a 40 años, si se utiliza superfosfato mexicano con altas concentraciones de cadmio (55,5 [mg kg⁻¹ fertilizante]) y la máxima tasa de fertilización recomendada para el cultivo del maíz. La determinación en campo de algunos parámetros usados en el modelo de acumulación permitiría hacer una aproximación más exacta sobre el efecto del uso de fertilizantes fosfatados en suelos chilenos. Asimismo, investigaciones posteriores relacionadas a los modelos de exposición y de evaluación del riesgo, son necesarias para tener una estimación del riesgo de cadmio en la salud humana.

SUMMARY

The objective of this research was to estimate the impact of phosphate fertilizers on cadmium accumulation in the plough layer of soils. A model, composed by three sub models, used by the European Union to evaluate the risk to use fertilizers containing cadmium was applied. The accumulation sub model was applied and maize (*Zea mays*) was selected to carry out a simulation at eight soils series of VI Region of Chile. According to characteristics of these soil series and the parameters required by the model, 48 scenarios of analysis were constructed and it was considered 50 years as term. General speaking, the results indicated a cadmium accumulation for those scenarios with low corn extraction rates of cadmium (K_p) and cadmium leaching rate of the soil (K_l). In the same way, for big cadmium entries from fertilizers, a general tendency to cadmium accumulation in soil occurred. On the other side, a high initial concentration of cadmium in soil caused a general tendency to cadmium accumulation when the leaching rate K_l and crop extraction K_p were low. Using the foreign legislation as reference, soil pollution with cadmium ($>0,5$ [mg kg^{-1} dry weigh]) would be expected only in four of the analyzed scenarios if Mexican super phosphate with high cadmium concentrations ($55,5$ [mg kg^{-1} fertilizer]) are used in a term of 38 to 40 years at the maximum rate of fertilization recommended for the maize crops. The fieldwork study of some parameters used in the accumulation model will allow a more accurate approximation about the effect of using phosphate fertilizers in Chilean soils. Likewise, later research related to the models of exposition and evaluation risk is necessary to estimate the cadmium risk for human health.

1. INTRODUCCIÓN

Durante y después de la Segunda Guerra Mundial, más de 200 mujeres ancianas, que habían tenido varios niños desarrollaron deformaciones óseas y daño renal, 65 murieron a raíz de intoxicaciones por cadmio debido a la contaminación del agua de bebida y los cultivos de arroz por la minería del plomo y zinc. Esta condición de intoxicación por cadmio se tipificó como la enfermedad "itai-itai". A raíz de este episodio ocurrido en el Valle Jintsu, Toyama (Japón), donde la actividad minera había estado contaminando por muchos años las aguas del río y los suelos, nace la preocupación mundial de evaluar la contaminación con cadmio de los sistemas ambientales y particularmente el recurso suelo para el desarrollo de la agricultura.

Se ha constatado que la acumulación progresiva de ETM (elementos traza metálicos)¹ en los suelos, particularmente cadmio, tiene efectos negativos en la salud humana. Dichos metales una vez absorbidos por el organismo interfieren en procesos enzimáticos causando diversas patologías (Nebel y Wrigth, 1999). Particularmente el cadmio, produce trastornos renales, daño a los huesos, edema pulmonar, daño al hígado, anemia e hipertensión (Nordberg, 1974; Nath *et al.*, 1984). La principal fuente de consumo de cadmio en el ser humano son los alimentos de origen vegetal (Norvell *et al.*, 2000), sin embargo, éste puede llegar al ser humano mediante la ingesta de alimentos de origen animal y por la inhalación del humo del tabaco (Staessen *et al.*, 1999, Dey y Dwivedi, 2000).

El cadmio ingresa a la malla trófica, desde el suelo, produciéndose fenómenos de bioacumulación y biomagnificación. En el caso del ser humano, el cadmio es de alta toxicidad a niveles traza acumulándose en el cuerpo (particularmente en el riñón) y persistiendo cerca de 10 a 30 años hasta su eliminación (Staessen *et al.*, 1999).

En cuanto a los cultivos (especies y variedades), éstos presentan diferentes niveles de fitotoxicidad frente a una misma concentración de cadmio en sus tejidos y el cadmio se acumula a distintas concentraciones dependiendo del tipo de tejido (hoja, grano, raíz). Asimismo, algunos cultivos son eficientes acumuladores de cadmio, por

¹ También denominados metales pesados, es decir, metales con densidad superior a 5-6g cm⁻³

ejemplo la lechuga (*Lactuca sativa*), no presentando síntomas de fitotoxicidad a concentraciones reducidas de cadmio (Jinadasa *et al.*, 1997).

Una fuente de aporte de cadmio en los suelos es el uso de fertilizantes fosfatados derivados de la roca fosfórica. Durante el proceso de elaboración de los fertilizantes fosfatados, a partir de dicho material, quedan metales como impurezas, a nivel de trazas (Gavi *et al.*, 1997; Driver, 1998; Grzmil, 1998; Anonymous, 1999; Carbonell *et al.*, 1999; Tyler y Barnes, 1999; Davis, 2000).

Un aspecto importante de destacar es que los ETM están presentes en la corteza terrestre, por lo que aportes antrópicos se sumarán al contenido basal cambiando el estado de equilibrio original en relación a la magnitud de estos aportes.

Respecto de la nutrición vegetal, si bien la aparición de daños a largo plazo podría asociarse al contenido total de un elemento en el suelo, en el corto plazo la carga agregada tiende a mantenerse en la forma en que fue emitida (no soluble). Para que esta carga adquiera forma soluble capaz de inducir efectos tóxicos, debe ser modificada en el suelo. Por ello, más que determinar los daños actuales de una contaminación específica, debe poder inferirse los daños de largo plazo, determinando el área total de dispersión probable y el tipo y tiempo de emergencia de daños futuros (González, 2001).

La acumulación de Cd en el suelo por el uso de fertilizantes fosfatados es una materia relevante desde el punto de vista ambiental y de la salud humana dado que la concentración total de cadmio en el suelo normalmente fluctúa entre valores menores de 1 a 3 [mg kg⁻¹] (Adriano, 1992; Carrasco, 1994) y aplicaciones sucesivas podrían incrementar estos valores afectando la salud humana en el largo plazo. En Chile, este aspecto aún no ha sido abordado masivamente y no se han dimensionado sus efectos en el largo plazo.

En el marco de las Naciones Unidas (IPCS, International Programme on Chemical Safety) un grupo de expertos se ha reunido en dos oportunidades (Génova, en 1989 y Reino Unido, en 1991) para tratar los criterios para la salud ambiental con relación al cadmio. El producto de dichos trabajos son dos documentos (Environmental Health Criteria for Cadmium series, N°134 y 135) que resumen las investigaciones

realizadas en varios países (Japón, Estados Unidos, Canadá, Suecia, Checoslovaquia, entre otros) y dan cuenta de sus fuentes y efectos (WHO, 1992a; WHO, 1992b).

Los efectos de la fertilización fosfatada y la contaminación por cadmio han sido ampliamente estudiados en Australia (Rayment, 1995; Jinadasa *et al.*, 1997).

Asimismo, algunos países de la Unión Europea (Austria, Bélgica, Dinamarca, Francia, Finlandia, Alemania, Grecia, Irlanda, Suecia, Reino Unido) han hecho evaluaciones del riesgo del cadmio en los fertilizantes. El año 1997, la Comisión Europea conjuntamente con los Estados Miembros inició y llevó a cabo un programa de evaluación del riesgo del cadmio en los fertilizantes. Las evaluaciones de riesgo se han realizado en nueve Estados Miembros sobre la base de los datos existentes y todos han usado la misma metodología sugerida por consultores que trabajan para la Comisión. Al año 2002 ya se han presentado 15 informes que dan cuenta de los impactos del cadmio en la salud humana por su aplicación a través de los fertilizantes, y se espera que otros países se sumen a esta tarea (<www.europa.eu.int>, 2002).

La presente investigación tiene por objetivo determinar si, en Chile, el uso de fertilizantes fosfatados en el cultivo del maíz, puede producir una acumulación de cadmio en la capa arable del suelo.

2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En el mundo, los fertilizantes producidos a partir de la roca fosfórica constituyen la mayor entrada agrícola de cadmio al suelo. Los fertilizantes fosfatados constituyen más del 50% de la entrada total de cadmio en los suelos (de Meeûs *et al.*, 2002). En 1985, en los Estados Miembros de la Comunidad Europea, la adición de cadmio vía fertilizantes a la carga total de cadmio en tierras arables y praderas fue de 74% y 44%, respectivamente (EUROSTAT, 1995). En estos países, la entrada promedio de cadmio en los suelos agrícolas, a partir de los fertilizantes fosfatados, en 1989 fue aproximadamente de 2,5 g de Cd anuales por hectárea (Davister, 1996).

En la agricultura, la principal entrada de cadmio a los suelos es el uso de fertilizantes fosfatados, por ello, su aplicación en Chile año a año en los cultivos estaría generando una acumulación de cadmio en el suelo que, en el largo plazo, provocaría el deterioro de este recurso natural y eventualmente efectos en la salud humana.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. *Agricultura sostenible*

La investigación se enmarca en el concepto de “Agricultura Sostenible” que se refiere a aquella que satisface las necesidades del presente sin comprometer las capacidades de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades (CONAMA, 2001). Dicho concepto ha sido desarrollado aplicando a la agricultura el concepto de “Desarrollo Sostenible”, que nace formalmente en 1987 en el Informe de la Comisión Mundial del Medio Ambiente de las Naciones Unidas “Nuestro Futuro Común” (Informe Brundtland) como respuesta al empeoramiento y globalización de la crisis ecológica. Este concepto surge del aumento de las preocupaciones, en los países, sobre el deterioro del medio ambiente y también por una nueva percepción del medio ambiente, producto de las ideas planteadas en Estocolmo y en el Informe del Club de Roma el año 1972.

En 1992 el concepto de desarrollo sostenible fue reconocido como un nuevo paradigma universal en la Conferencia Internacional de Río, convocada por las Naciones Unidas, conocida como “Cumbre de la Tierra”. Desde entonces, la preocupación por el tema ambiental ha asumido un papel importante en la sociedad integral (FNSP, 1998). Particularmente en Chile, a partir de este hito, se busca enmarcar las acciones en aspectos fundamentales tales como la protección del medio ambiente y el desarrollo sostenible. En este contexto se comienza a tratar el tema de las “Buenas Prácticas Agrícolas²” que se relaciona con el desarrollo de una agricultura más “amigable con el medioambiente” (Ministerio de Relaciones Exteriores, 1998).

A partir de esta Cumbre Mundial (“Cumbre de la Tierra”), se comienza a tratar los problemas de los países bajo la perspectiva social, económica y ambiental, integrando estos tres ejes para el análisis de cualquier temática. Es así como se comienzan a relacionar los problemas ambientales con el bienestar humano, particularmente la salud y la educación.

² Ver glosario.

Con el desarrollo de las “Buenas Prácticas Agrícolas” se busca la prevención del deterioro ambiental y de los efectos negativos sobre la salud humana ocasionados por las prácticas tradicionales (uso indiscriminado de agroquímicos, degradación de recursos naturales, etc.).

3.2. Modelo de evaluación y manejo del riesgo del cadmio en el suelo

De Meeûs *et al.*, 2002, publicaron las aplicaciones de un modelo para la evaluación y manejo de los riesgos alcanzados por la exposición al cadmio de los fertilizantes. Este modelo, que podría ser aplicado en Chile, fue propuesto por la Unión Europea, en el marco de una serie de estudios realizados por la institución Environmental Resources Management (ERM) por encargo del European Commission Directorate General III (ERM, 1999, ERM, 2000, ERM, 2001). Dichos estudios surgen de un mandato al interior de la Unión Europea por la necesidad de evaluar los efectos del cadmio en sus Estados Miembros. El modelo consta de tres etapas indicadas en la Figura 1, donde se señalan las entradas y salidas de información en cada una de ellas.

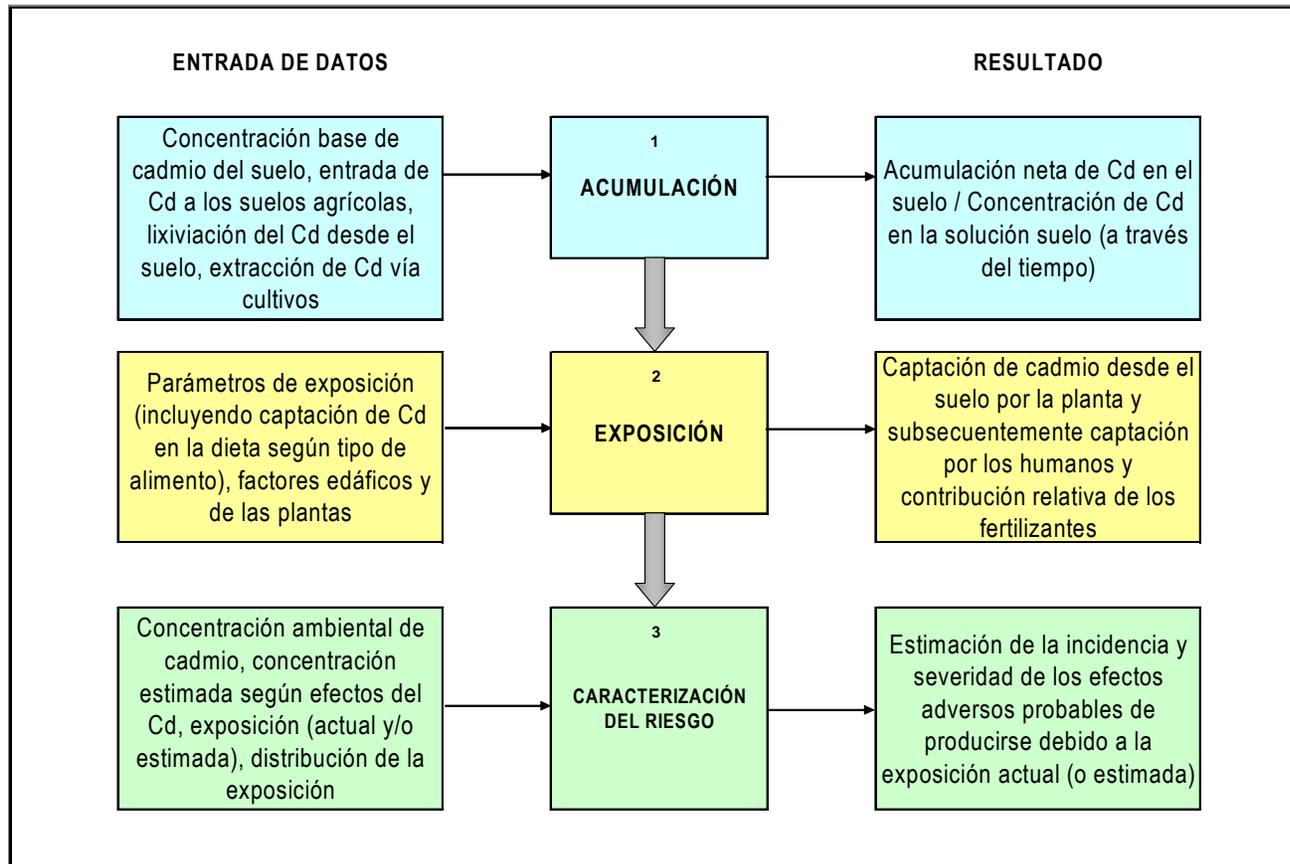


Figura 1. Entradas y salidas de información de las etapas del modelo de manejo del riesgo.

(De Meeûs, 2002).

En cada etapa del modelo se necesitan datos según las condiciones locales y a la escala espacial en que se va a aplicar (por ejemplo a nivel país) con los cuales se llega a los siguientes resultados:

- ❑ Etapa 1 o de acumulación: se obtiene la acumulación neta de cadmio en el suelo y en la solución suelo.
- ❑ Etapa 2 o de exposición: se obtiene la captación de cadmio desde el suelo hacia las plantas y la consecuente captación del cadmio por el ser humano, a través de aquellos alimentos sensibles a la captación de cadmio tales como granos, cereales, tubérculos, raíces y hojas).
- ❑ Etapa 3 o de caracterización del riesgo: se hace una estimación de los efectos adversos del cadmio en base a sus concentraciones actuales o estimadas.

En el apartado siguiente se detalla con especial énfasis la etapa 1 o modelo de acumulación ya que éste es una herramienta de análisis relevante para la presente investigación.

3.2.1. Descripción general del modelo de acumulación

La concentración ambiental estimada de cadmio en el suelo, y más específicamente en la solución suelo, son parámetros claves para determinar la captación de cadmio por los cultivos destinados al consumo humano. La Figura 2 muestra las vías de transferencia del cadmio hacia y desde el suelo.

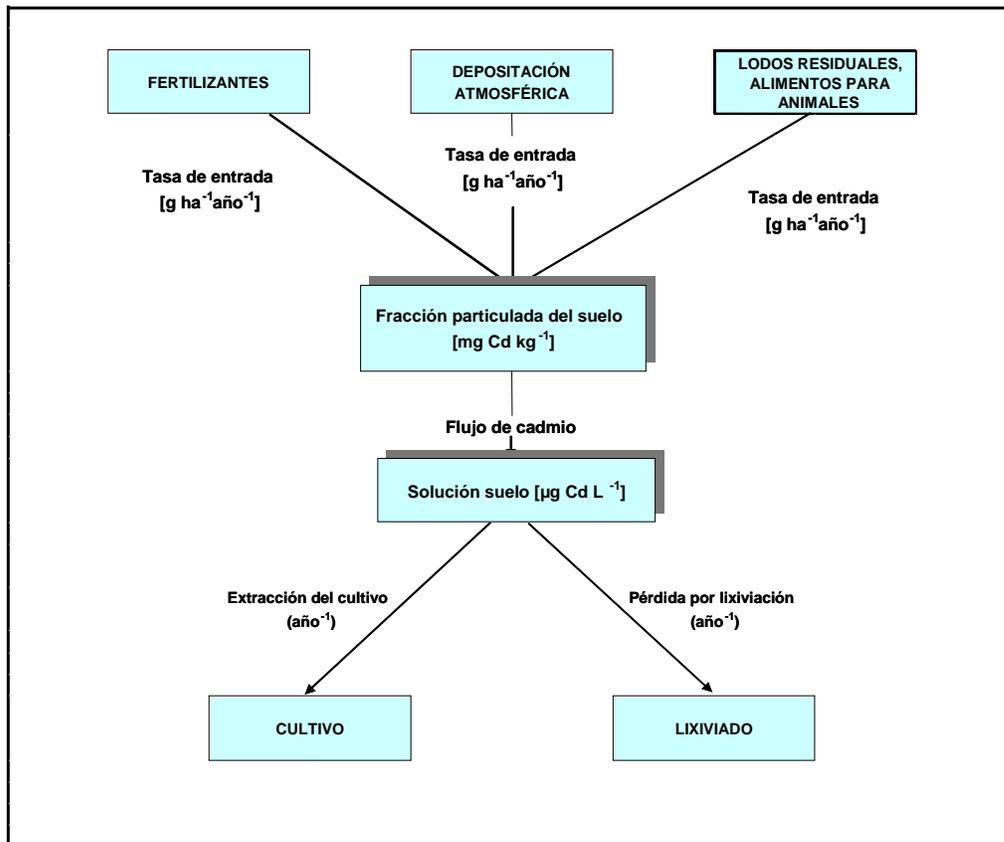


Figura 2. Suelo – vías de transferencia del cadmio en la solución suelo.

(ERM, 1999, De Meeûs *et al.*, 2002).

Después del ingreso al suelo, el cadmio se distribuirá entre las partículas de suelo y la solución suelo, según dos mecanismos principales de remoción (ERM, 1999; de Meeûs *et al.*, 2002):

- ❑ Captación del cadmio desde la solución suelo por la vegetación, la cual será subsecuentemente cosechada para el consumo humano.
- ❑ Lixiviación del cadmio desde el suelo, lejos de la capa arable, pero con el peligro de la contaminación de aguas subterráneas.

Ambos mecanismos son críticamente dependientes del pH y otras propiedades del suelo (EPA, 1999a; de Meeûs *et al.*, 2002).

La entrada de cadmio vía aplicación de fertilizantes constituirá un subconjunto del total de entradas de cadmio al suelo. Otras fuentes incluyen la depositación atmosférica (0,4 a 1,1 [g ha⁻¹ año⁻¹] en la UE), la aplicación de lodos (0,05 a 0,4 [g ha⁻¹ año⁻¹] en la UE) y el acondicionamiento de suelos (ERM, 1999). La aplicación directa de químicos así como los niveles basales no se consideran en el presente modelo.

La acumulación de cadmio en el suelo se puede expresar en forma dinámica usando la siguiente expresión matemática (Harmsen, 1992; Vissenberg y Van Grinsven, 1995 y Moolenaar *et al.*, 1997):

$$Cd_s(t) = Cd_s(0)e^{-(K_p+K_l)t} + \left[\frac{K_e}{(10D_a \rho)(K_p + K_l)} \right] \left[1 - e^{-(K_p+K_l)t} \right] \quad \text{Ecuación 1}$$

En estado estable corresponde a:

$$Cd_s(EE) = \frac{K_e}{(10D_a \rho)(K_p + K_l)} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde,

$Cd_s(t)$: concentración de cadmio en la capa arable [mg kg⁻¹] al tiempo t en años

$Cd_s(0)$: concentración de cadmio inicial (día presente) en el suelo [mg kg⁻¹]

K_p : tasa anual de extracción de cadmio por las plantas [g ha⁻¹]

K_l : tasa anual de lixiviación de cadmio [g ha⁻¹]

t : tiempo [años]

K_e : tasa anual de entrada de cadmio [g ha⁻¹]

D_a : densidad aparente del suelo [kg m⁻³]

ρ : profundidad de la capa arable [m]

$Cd_s(EE)$: concentración de cadmio en estado estable en la capa arable [mg kg⁻¹]

Todas las concentraciones de cadmio en el suelo se expresan en términos de peso seco (a 105°C). Cada una de las tasas se describe en mayor detalle más adelante.

3.2.2. Concentraciones de cadmio en suelos agrícolas

En la Ecuación 1 se requiere conocer los niveles actuales de cadmio en el suelo $Cd_s(0)$ [mg kg⁻¹] para hacer proyecciones futuras sobre el estado de la contaminación

de los suelos y asimismo, comparar estos valores con las tendencias futuras reales de cadmio. Todos los suelos tienen un contenido base de cadmio que varía de acuerdo a la roca parental de la cual se deriva. La concentración de cadmio media, para los países europeos, según la mayoría de los estudios, están en el rango de 0,06 a 1,1 mg kg⁻¹ (De Meeûs, 2002). En el perfil de suelo, el cadmio está normalmente a niveles más altos en el horizonte superficial.

Los suelos agrícolas pueden tener contenidos más altos de cadmio respecto de los suelos no intervenidos como ocurre, por ejemplo, en los suelos forestales, debido a la aplicación de cal, fertilizantes y lodos (Römken and Salomons, 1998). Un valor de Cd_s(0) de 0,3 mg kg⁻¹ (peso seco) fue sugerido por Belgian Federal Department of the Environment (BFDE) en 1999 como promedio de la Unión Europea, no obstante, el modelo de acumulación debería ser simulado con un rango de concentraciones de cadmio dependientes de la variación del contenido de cadmio dentro de cada país.

3.2.3. Tasa anual de entrada de Cd a los suelos agrícolas (K_e)

La expresión matemática para el cálculo de K_e es la siguiente:

$$K_e [g\ ha^{-1}\ año^{-1}] = K_{dep} + K_{fer} + K_{le} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde el término K_e representa la tasa de entrada de cadmio al suelo agrícola y comprende tres componentes que tienen unidades de [g ha⁻¹ año⁻¹]:

K_{dep} : tasa de entrada vía depositación atmosférica.

K_{fer} : tasa de entrada vía aplicación de fertilizantes.

K_{le} : tasa de entrada vía aplicación de lodos/estiércol.

Para el presente estudio sólo se considerará la entrada de fertilizantes fosfatados. Sin embargo, se debe tener presente que para los países miembros de la Unión Europea se ha estimado una tasa promedio base de depositación atmosférica anual de cadmio de 0,4 g ha⁻¹, informado por BFDE (Belgian Federal Department of the Environment), en 1999 (de Meeûs *et al.*, 2002).

3.2.4. Extracción de cadmio vía cultivos

La extracción de cadmio de los cultivos es variable, sin embargo, se puede adoptar un valor anual de 0,5 g Cd ha⁻¹ con una concentración inicial de cadmio al tiempo 0 de 0,3 mg kg⁻¹.

De Meeûs *et al.* (2002), proponen la siguiente ecuación para calcular el K_p requerido en la Ecuación 1 y Ecuación 2 del modelo.

$$K_p \left[\text{año}^{-1} \right] = \frac{Cd_p}{10 \rho D_a Cd_s(0)} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde,

K_p : tasa de extracción de cadmio del cultivo [año⁻¹]

Cd_p : cadmio extraído por el cultivo [g ha⁻¹ año⁻¹]

ρ : profundidad de la capa arable [m]

D_a : densidad aparente del suelo [kg m⁻³]

$Cd_s(0)$: concentración inicial de cadmio en el suelo [mg kg⁻¹]

3.2.5. Lixiviación de cadmio en suelos agrícolas

En el modelo se considera que la pérdida de cadmio debida a la lixiviación desde la capa arable dependerá inicialmente de la distribución del cadmio entre las partículas de suelo y la solución suelo, en función de propiedades tales como su pH, materia orgánica y textura. La remoción de cadmio será subsecuentemente función de las propiedades químicas y físicas del suelo, de la tasa de infiltración y del flujo neto de agua.

La BFDE (1999) adoptó un modelo simple de lixiviación el cual ha sido ampliamente usado en estudios de acumulación del cadmio y carga crítica en suelos; el modelo la expresa como:

$$L \left[g \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1} \right] = Cd_{ss} 10 F \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde,

L : lixiviación neta anual de cadmio [g ha^{-1}]

Cd_{ss} : concentración de cadmio en la solución suelo [$\mu\text{g L}^{-1}$]

F : exceso de precipitación anual [m]

El exceso de precipitación se define como la parte del agua precipitada, en estado sólido o líquido, que puede estar disponible potencialmente para escurrimiento superficial, infiltración o almacenamiento (CECW-EH-Y, 1994).

El Cd_{ss} se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Cd_{ss} [\mu\text{g L}^{-1}] = \frac{Cd_s}{K_D} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

Cd_{ss} : concentración de cadmio de la solución suelo [$\mu\text{g L}^{-1}$]

Cd_s : cadmio de la fracción particulada del suelo [$\mu\text{g kg}^{-1}$]

K_D : coeficiente de partición fracción sólida/líquida [L kg^{-1}]

El cálculo de K_D es válido sólo para un elemento particular (en este caso cadmio) y para las características químicas de la solución suelo para la cual se realice la estimación de este parámetro. En el valor de K_D intrínsecamente se asume que el sistema cadmio solución suelo/fracción sólida es reversible. Otros supuestos implícitos son (1) los contaminantes están a concentraciones traza en las fases sólida y líquida del suelo, (2) la relación del contaminante en la fase sólida respecto de la fase líquida es lineal, (3) existen condiciones de equilibrio, (4) cinéticas de adsorción y desorción igualmente rápidas, (5) describe partición del contaminante entre un sorbato (contaminante) y un sorbente (suelo), (6) todos los sitios de adsorción están accesibles y tienen la misma fuerza (EPA-UNITED STATES, 1999a). Por otro lado, experimentalmente es muy difícil distinguir las distintas especies de una sustancia química, por ello normalmente se asume que no hay diferenciación en especies químicas.

En las ecuaciones 1 y 2 se requiere calcular la tasa de lixiviación anual (K). La Ecuación 5 puede ser convertida a un valor anual dividiendo L [$\text{g ha}^{-1} \text{año}^{-1}$] por la cantidad inicial de cadmio en el suelo ($Cd_s(0)$ [mg kg^{-1}]), contenida en 1 ha de suelo a

profundidad de aradura. Insertando Cd_{ss} despejado de la Ecuación 6 en la Ecuación 5, el algoritmo compuesto para K_l (valor anual) es:

$$K_l \left[\text{año}^{-1} \right] = \frac{1.000 F}{K_D \rho D_a} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde,

K_l : tasa anual de lixiviación de cadmio [año^{-1}]

F : exceso de precipitación anual [m]

K_D : coeficiente de partición fracción sólida/líquida [L kg^{-1}]

ρ : profundidad de la capa arable [m]

D_a : densidad aparente del suelo [kg m^{-3}]

El escurrimiento superficial³ anual está dado por:

$$F \left[\text{m año}^{-1} \right] = P f_{inf} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde,

F : tasa de escurrimiento [m año^{-1}]

P : tasa de precipitación [m año^{-1}]

f_{inf} : tasa de infiltración [m año^{-1}]

Valores representativos para la Unión Europea son $0,25 \text{ [m año}^{-1}]$ para f_{inf} y $0,2 \text{ [m año}^{-1}]$ para F .

El coeficiente de distribución, K_D , es dependiente del tipo de suelo, del pH, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, etc. En la Unión Europea cada Estado Miembro ha desarrollado su propio algoritmo para determinar el K_D del cadmio (De Meeûs *et al.*, 2002), asimismo, en Estados Unidos se ha destacado que es esencial medir este valor para condiciones sitio-específicas antes de hacer cualquier estimación sobre el impacto de un contaminante en un sistema ambiental (Environmental Protection Agency, 1999).

³ Concepto expresado en el modelo como "Annual precipitation excess".

4. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Los fertilizantes fosfatados usados en Chile provienen principalmente de México, con altos contenidos de cadmio, de una serie de embarques analizados ingresados a Chile durante 1999.

Según el modelo propuesto en el marco teórico, la concentración de cadmio en el largo plazo en la capa arable del suelo está regida por una serie de factores tales como concentración inicial de cadmio en el suelo, entrada de cadmio al suelo (principalmente por la aplicación de fertilizantes fosfatados), lixiviación de cadmio desde el suelo hacia capas más profundas y extracción de cadmio por el cultivo. Estos factores, a su vez, dependerán de características físico químicas del suelo tales como contenido de materia orgánica, pH y coeficiente de partición.

Las concentraciones actuales de cadmio encontradas en los suelos chilenos de la zona central son menores que los valores límites establecidos en diversos países (Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, Finlandia, Luxemburgo, Países Bajos y Reino Unido): 0,5 a 3,0 [mg kg⁻¹ suelo seco] (Oosterhuis *et al.*, 2000). Aplicaciones sucesivas de fertilizantes fosfatados en estos suelos incrementarán los niveles de cadmio en la capa arable.

4.1. Hipótesis

Los suelos del orden Mollisol de la VI Región tienen niveles de cadmio menores a los valores límites establecidos en otros países. Estos suelos, cultivados con maíz, reciben actualmente fertilización fosfatada con una concentración de cadmio de 12,8 a 55,5 [mg kg⁻¹ fertilizante]. Con estas concentraciones de cadmio y las dosis anuales de fertilización fosfatada recomendadas para dicho cultivo, la tasa anual de entrada de cadmio a la capa arable del suelo, produciría niveles crecientes de cadmio, en un periodo de 50 años.

4.2. Objetivo general

Evaluar si los fertilizantes fosfatados comercializados en Chile producen impacto ambiental negativo en el ambiente por acumulación de cadmio en la capa arable de los suelos, en un plazo de 50 años.

4.2.1. Objetivos específicos

- Analizar la procedencia de los fertilizantes fosfatados usados en Chile y seleccionar los más usados.
- Evaluar si los fertilizantes fosfatados usados en Chile contienen cadmio.
- Analizar el posible impacto de los fertilizantes fosfatados en la contaminación con cadmio de la capa arable del suelo, utilizando como referencia el cultivo de maíz.

5. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

5.1. Aspectos del cadmio

El cadmio, por su densidad de $8,25 \text{ [g cm}^{-3}\text{]}$, forma parte de los metales pesados, término aplicado a los elementos con una densidad superior a $6 \text{ [g cm}^{-3}\text{]}$ (Carrasco, 1994). Otra denominación es elemento traza, es decir, elemento presente en la corteza terrestre en un valor inferior a 1% (González, 1994). Últimamente, también se está usando la denominación elemento traza metálico para referirse a los metales pesados (Kaemmerer, 2001; Lavado, 2001). En la presente investigación se hará mención al cadmio por su nombre.

5.1.1. Caracterización

El cadmio (número atómico 48; masa atómica relativa 112,40) es un elemento metálico que pertenece, junto con el zinc y el mercurio, al grupo IIb de la tabla periódica.

La principal especie del cadmio en la solución suelo es Cd^{2+} , pero, este metal puede formar los siguientes complejos iónicos: CdCl^+ , CdOH^+ , CdHCO_3^+ , CdCl_3^- , CdCl_4^{2-} , $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$ y $\text{Cd}(\text{OH})_4^{2-}$ además de complejos orgánicos.

En las soluciones suelo en condiciones aeróbicas las especies de cadmio serán las siguientes (en orden decreciente):

- Suelos ácidos: $\text{Cd}(\text{II})$, CdSO_4^0 y CdCl_4^+ .
- Suelos alcalinos: $\text{Cd}(\text{II})$, CdCl^+ , CdSO_4^0 y CdHCO_3^+ .

Además del Cd^{2+} , son frecuentes las especies neutras CdSO_4 y CdCl_2 , presentes en altas concentraciones en los suelos con pH superiores a 6,5.

La especie acuosa dominante en aguas subterráneas a pH menores que 8,2, con moderada a baja concentración de sulfato (menor a $10^{-2,5}\text{M}$ de SO_4^{2-}) es la especie Cd^{2+} . A medida que aumenta el pH, se espera que se formen otras formas complejas de este metal. Tal como aprecia en la Figura 3, se espera que en aguas subterráneas

con pH menor de 6 todo el cadmio disuelto esté bajo la forma de la especie Cd^{2+} (EPA-United States, 1999a).

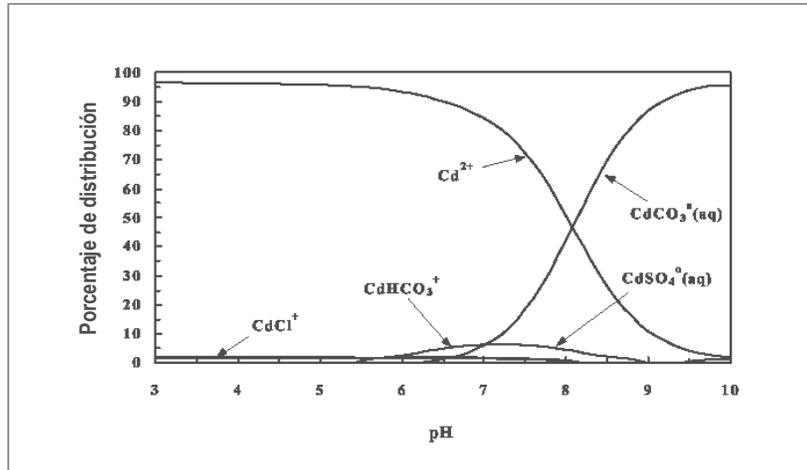


Figura 3. Distribución de las especies acuáticas de cadmio según pH.

(EPA-United States, 1999a, <http://www.epa.gov/radiation/technology/partition.htm>).

5.1.2. Aportes al ambiente

El cadmio ingresa al ambiente mediante diversas fuentes tanto naturales como antropogénicas. En el Cuadro 1 se indican las fuentes de entrada de cadmio al ambiente.

Cuadro 1. Fuentes de cadmio.

Antropogénicas	Naturales
<input type="checkbox"/> Lodos residuales y estiércol	<input type="checkbox"/> Actividad volcánica
<input type="checkbox"/> Fertilizantes fosfatados y nitrogenados	<input type="checkbox"/> Rocas
<input type="checkbox"/> Industria de plateado y galvanizado	
<input type="checkbox"/> Industria de esmaltado y vitrificado	
<input type="checkbox"/> Minería del cinc, cobre, plomo y otros metales	
<input type="checkbox"/> Industria de fundición de metales	
<input type="checkbox"/> Incineración	
<input type="checkbox"/> Industria de alimentos fosfatados para animales	

En la corteza terrestre el cadmio se encuentra en cantidades muy bajas (< 1 $[\text{mg kg}^{-1}]$), en promedio se encuentran valores de 0,1 a 0,2 $[\text{mg kg}^{-1}]$ (Roberts, 1996). Sin embargo, en los suelos su contenido fluctúa entre valores menores de 1 a 3 $[\text{mg kg}^{-1}]$.

¹] de Cd. La concentración de cadmio en un suelo no contaminado es inferior a 1 [mg kg⁻¹] (EPA – United States, 1999). Las concentraciones del cadmio podrían aumentar dependiendo de las actividades humanas, el material parental del suelo y de condiciones climáticas locales.

La principales fuentes de emisiones de cadmio son los servicios eléctricos, minería de yacimientos de oro y plata y manufactura de productos de arcillas estructurales (<www.scorecard.org/chemical-profiles/html/cadmium.html>, 2002).

El carbón y otros combustibles fósiles contienen cadmio y su combustión lo libera al ambiente. El cadmio también se encuentra en los yacimientos de azufre que contienen sulfuro de zinc y en yacimientos de plomo y cobre que contienen zinc. El cadmio se ha detectado en esquistos carbonáceos y rocas fosfóricas. Las emisiones volcánicas contienen aerosoles enriquecidos con cadmio (www.scorecard.org/chemical-profiles/html/cadmium.html, 2002).

Otra fuente de cadmio que afecta directamente al ser humano es el humo de tabaco que corresponde a una fuente de contaminación interna de cadmio.

En Chile, se ha detectado una asociación de cadmio con cobre a nivel de emisiones de centros mineros en la V, VI y Región Metropolitana. En la V Región se detectó cadmio sólo en las vecindades de las fundiciones de cobre (González, 2001).

5.1.3. Efectos sobre la salud humana

Investigaciones recientes señalan que la exposición a reducidas concentraciones de cadmio produce alteraciones a los huesos con consecuentes riesgos de fracturas. Esto debido a que el cadmio puede interferir con el metabolismo del calcio, la vitamina D y el colágeno, produciendo, a largo plazo, alteraciones de los huesos tales como la osteomalacia y la osteoporosis (Staessen *et al.*, 1999).

El cadmio, una vez aportado por la vía de la fertilización fosfatada, puede ser absorbido por los cultivos y llegar hasta quienes se alimentan de ellos. Los vegetales se presentan sanos y vigorosos aún cuando contengan más cadmio que lo normal. En Japón se ha tipificado la enfermedad “Itai-Itai”, en seres humanos, causada por

consumo durante largo tiempo de arroz contaminado con cadmio (Carrasco, 1994; Staessen *et al.*, 1999; CONAMA, 2001).

Un aumento en la dieta de Ca^{2+} , Zn^{2+} y Fe^{3+} , disminuye la absorción de cadmio, cobre, plomo o mercurio; en cambio, un exceso de Cd^{2+} en la dieta induce síntomas por deficiencia de Ca^{2+} en humanos. En el caso de la carboxipeptidasa pancreática (cinc dependiente), disminuye la actividad y especificidad ante cadmio, mercurio, plomo, cobre o níquel, por intercambio del cinc desde el sitio activo (Tapia, 1994). El cadmio puede sustituir el calcio de los huesos, con resultados nefastos, tal como fue demostrado en Japón en los años 50, con agricultores que vivían en tierras contaminadas cercanas a una mina de cinc-cadmio (Gillett, 1999).

Existen antecedentes de que el cadmio se relaciona con tumores en testículos y cáncer a la próstata en trabajadores expuestos (Tapia, 1994). Se ha demostrado que el riñón es el órgano crítico para el cadmio (WHO-IPCS, 1992). La exposición crónica al cadmio produce nefrotoxicidad (Tang, 2000).

Otra situación de cuidado, particularmente en niños, es que se ha encontrado Cd y Pb en huevos de gallina alimentados con materiales inorgánicos (Dey y Dwivedi, 2000).

El cuerpo absorbe aproximadamente 5% del Cd tomado del alimento y el agua y 10% del Cd inhalado del humo del cigarrillo. En promedio, un paquete de 20 cigarrillos contiene 20-25 μg de Cd. Un no fumador, en un área no contaminada absorbería cerca de 0,5-1,3 μg por día desde el alimento y el agua (Roberts, 1996).

WHO (World Health Organization), 1972, estableció que el máximo de ingesta diaria de Cd (IDA o Ingesta Diaria Admisible) no debería sobrepasar 1 [$\mu\text{g kg}^{-1}$] del peso del cuerpo (es decir, 70 [$\mu\text{g día}^{-1}$] para un hombre promedio). La ingesta dietética de Cd se estimó en 15-30 [$\mu\text{g día}^{-1}$] para los habitantes estadounidenses y 20-40 [$\mu\text{g día}^{-1}$] para los europeos (OECD, 1994).

Debido a que el alimento es la mayor fuente de ingesta de Cd, las estrategias de reducción del riesgo tendrán importantes implicaciones para la producción agrícola (Roberts, 1996).

5.1.4. Relación con el medio ambiente

La contaminación ambiental por cadmio es un tema complejo que ha sido analizado por diversos investigadores desde diversos frentes: desde el punto de vista de la salud humana y otros seres vivos, la toxicología ambiental, las implicancias en la industria y la economía en la elaboración de diversos productos que contienen cadmio, con distintas aplicaciones, etc.

Particularmente, en el sector agropecuario la preocupación por el cadmio se centra principalmente en la fertilización fosfatada, el uso de biosólidos, la alimentación animal con productos fosfatados, el agua de riego y la biodisponibilidad para los cultivos.

Algunos países se han preocupado seriamente del desarrollo de estrategias para la reducción del cadmio ya sea en el origen de la fabricación de fertilizantes fosfatados, usando rocas fosfóricas de bajo contenido en cadmio, o en campo, usando fertilizantes fosfatados con menores concentraciones de este metal. Otra estrategia de campo ha sido la aplicación de correctores de pH del suelo ya que se ha comprobado que a pH ácido el cadmio se solubiliza, volviéndose más biodisponible para las plantas.

En Dinamarca se ha desarrollado un modelo que explica el ciclo del cadmio y se ha llegado a cuantificar las entradas y salidas del sistema (Figura 4).

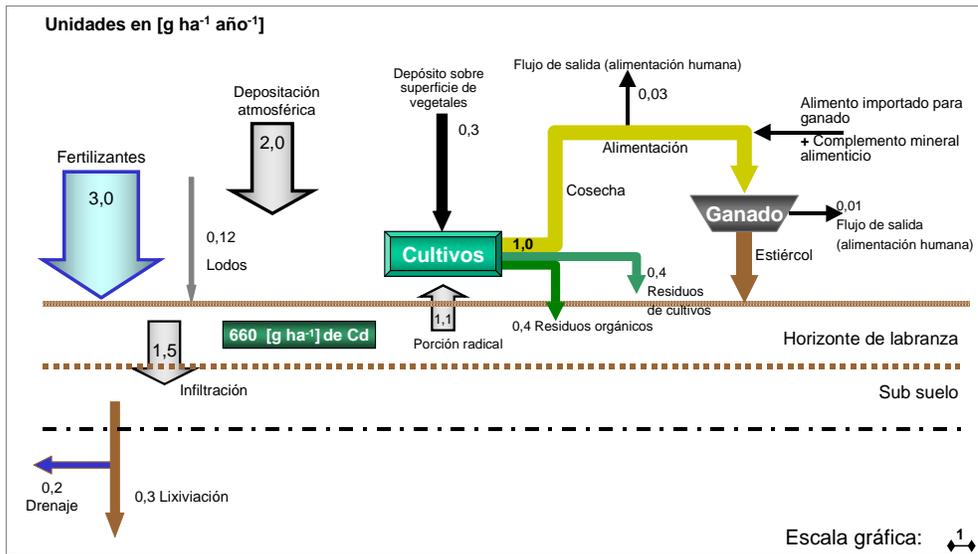


Figura 4. Ciclo del cadmio en la agricultura danesa.

(Hovmand *et al.*, 1983).

Este modelo muestra las implicancias ambientales del cadmio, lo cual puede contribuir a su manejo y prevención de episodios adversos tanto para la salud humana como para el ambiente en general. Es destacable que la cuantificación de las entradas y salidas de cadmio en el sistema permitiría una evaluación del impacto de este metal y tomar las medidas necesarias para prevenir el deterioro del suelo, y consecuentemente los efectos adversos en la salud humana.

Otro país que presenta avances en materia del cadmio y de la fertilización fosfatada es Australia, a través de programas de información a agricultores donde se tratan diversas estrategias para la disminución de las concentraciones de cadmio en el ambiente, particularmente en el recurso suelo (Mc Laughlin, 2001; Senn y Milham, 2001). En la Figura 5 se presenta una cartilla destinada a los productores de papas donde se reseñan ambos manejos, “malo” y “bueno”, para ilustrar los aspectos que se pueden manejar para la reducción del cadmio en los cultivos.

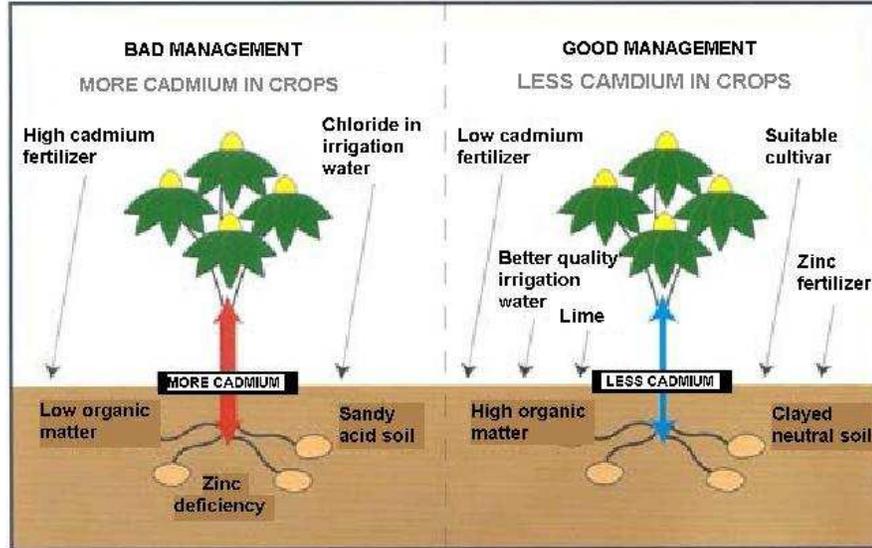


Figura 5. Cartilla de manejo del cadmio en papas para un producto de calidad.

(CSIRO, 1996, citado por Senn y Milham, 2001).

El estudio del cadmio es un tema complejo debido a los fenómenos de bioconcentración y biomagnificación en el ambiente. Es un tema que ha sido abordado por diversos autores, especialmente por un grupo de expertos, reunidos en dos oportunidades en el marco de *International Programme on Chemical Safety* (IPCS, 1992) de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en trabajo conjunto con la *International Labour Organisation*. El trabajo de los expertos se centró en investigaciones de una serie de seres vivos en los que se encontró que los mayores factores de bioconcentración eran para los microorganismos, particularmente para una diatomea de agua dulce con un factor de 40.000 (Conway, 1978).

Los aspectos señalados sobre la agricultura danesa (Figura 4) y en la cartilla australiana (Figura 5) son algunos de los que han sido tratados por los investigadores en un intento por evaluar integralmente el problema, incluyendo tanto la dimensión espacial como temporal.

5.2. Aspectos de los fertilizantes fosfatados

5.2.1. Origen

Respecto del origen de los fertilizantes fosfatados, éstos se obtienen a partir de la roca fosfórica compuesta prácticamente por todos los elementos químicos de la tabla periódica. La denominación roca fosfórica es un término general que describe un conjunto de minerales naturales que contienen una elevada concentración de compuestos fosfatados (Besoain *et al.*, 1999). Existen dos tipos principales de roca fosfórica, ígnea y sedimentaria, las cuales tienen grandes diferencias en características mineralógicas, texturales y químicas. El contenido de metales pesados son normalmente más altos en las rocas sedimentarias que en las ígneas (Steen, 1998).

Tal como se observa en el Cuadro 2 las rocas sedimentarias presentan las mayores concentraciones de cadmio. Las fosforitas alcanzan concentraciones de hasta 980 [mg kg⁻¹], aspecto interesante de destacar ya que de esta roca se derivan los fertilizantes fosfatados que se utilizan en los sistemas agrícolas. En el caso chileno, cabe hacer notar que la fertilización fosfatada es muy necesaria en la mayoría de sus suelos de origen volcánico, particularmente los trumaos, debido a que éstos retienen el fósforo no dejándolo disponible para las plantas.

Cuadro 2. Concentración de cadmio en las rocas.

Tipo de roca	Rango [mg kg ⁻¹]	Promedio [mg kg ⁻¹]
Rocas ígneas		
Riolitas	0,03-0,57	0,230
Granitos	0,01-1,60	0,200
Basaltos	0,01-1,60	0,130
Rocas metamórficas		
Gneises	0,007-0,26	0,040
Esquistos	0,005-0,87	0,020
Rocas sedimentarias		
Esquistos y arcillas	0,017-11	-
Esquistos negros	0,30-219,0	-
Piedras arenisca y conglomerados	0,019-0,4	-
Carbonatos	0,007-12	0,065
Fosforitas	<10-980	-
Carbón	0,01-300	-
Yacimientos minerales de azufre		
Esfalerita (ZnS)	0,2-0,4(<5%)	-
Galena (PbS)	<0,5%	-
Tetrahedrita – Tennartita (CuZn)(SbAs)S	<0,24%	-
Metacinnabar (HgS)	11,70%	-

Fuente: Alloway, 1995.

5.2.2. Procesos de fabricación y tipos de fertilizantes

Los minerales de fosfato predominantes en la fosforita (roca fosfórica sedimentaria, usualmente marina, Besoain *et al.*, 1999) son fluorapatita ($3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{CaF}_2$) e hidroxiapatita ($3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\text{Ca}(\text{OH})_2$). Estos minerales proporcionan la mayor parte de fósforo para la fabricación de fertilizantes, en el mundo entero. Sin embargo, la propia fosforita en polvo no sirve como fertilizante porque el fósforo que contiene no se halla en forma soluble que permita su fácil asimilación por las plantas. Haciendo reaccionar el mineral con ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido nítrico (HNO_3) o

ácido clorhídrico (HCl), se obtiene ácido fosfórico (ácido ortofosfórico) y superfosfórico⁴, importantes intermediarios en la producción de fertilizantes fosfatados. La reacción con ácido sulfúrico es la más utilizada (Naciones Unidas, 1980).

En la Figura 6 se detalla el proceso de elaboración de fertilizantes fosfatados, a partir de la fosforita natural. Para la obtención de los superfosfatos la fosforita es tratada con ácido sulfúrico, ácido fosfórico o ácido superfosfórico. La fosforita sigue dos vías (proceso vía húmeda y proceso térmico) para la obtención del ácido fosfórico, a partir del cual se obtienen el resto de los fosfatos con un tratamiento previo que incluye amoníaco, ácido sulfúrico o úrea, dependiendo de cada tipo según se indica en la Figura 6. Asimismo, a partir de la fosforita natural se obtiene el nitrofosfato cuando ésta es tratada con ácido nítrico.

Los fertilizantes más utilizados en el mundo y en Chile son los superfosfatos (simple y triple) y el fosfato mono y diamónico.

⁴ El ácido superfosfórico contiene entre un 72% y un 83% de P_2O_5 , en tanto que la concentración de P_2O_5 del ácido fosfórico de vía húmeda sólo es de 54% (Naciones Unidas, 1980).

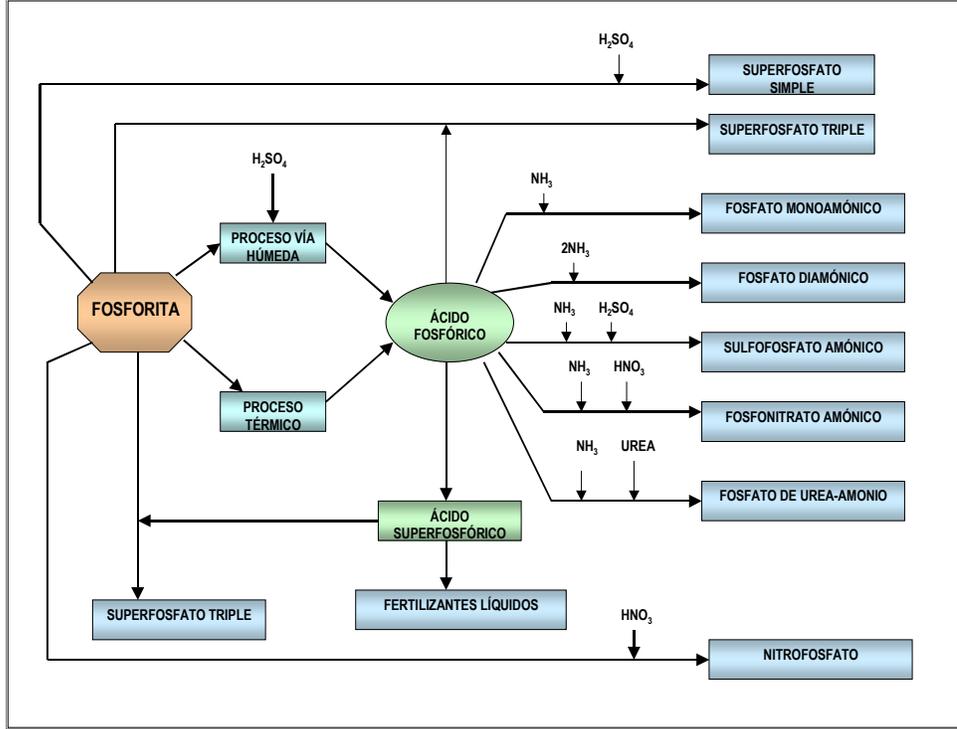


Figura 6. Procesos de elaboración de fertilizantes fosfatados a partir de la fosforita natural.
(Elaborado a partir de información de Naciones Unidas, 1980).

5.2.3. Límites máximos permitidos de cadmio en los fertilizantes

Para Chile no existen límites máximos de cadmio para fertilizantes fosfatados, entradas de Cd al suelo o límites máximos en suelos agrícolas.

Tal como lo señala Valenzuela (2001) en su estudio sobre cadmio en fertilizantes fosfatados, la internación y venta de fertilizantes en Chile (a cargo del Servicio Agrícola y Ganadero, SAG) se rige por el Decreto Ley 3.557, en el cual existen términos ambiguos tales como “elementos perjudiciales” e “impurezas” que no están claramente definidos en el texto del Decreto y, por lo tanto, no permiten un control sobre el contenido de elementos tales como el cadmio en los fertilizantes. Asimismo, no se exige un etiquetado con la composición completa de los fertilizantes, situación que permitiría una mejor decisión al momento de la compra del fertilizante, su

aplicación y medidas de resguardo frente a impactos en el cultivo, la salud y el medioambiente.

Actualmente se está preparando una propuesta para legislar sobre los niveles de elementos traza metálicos, pero, en lodos y biosólidos para su aplicación en la agricultura.

En el Cuadro 3 se muestran los valores límites de los fertilizantes, entradas de cadmio al suelo y contenido de cadmio en los suelos para diferentes países. Se observa que frente a la diversidad de condiciones locales, cada país ha tenido que establecer sus propios límites de cadmio para fertilizantes y suelos. La preocupación por legislar en este aspecto surge por el episodio ocurrido en Japón y también por la constatación de la contaminación de suelos por cadmio en Australia, Austria, Finlandia, entre otros.

De hecho, el 16 de noviembre de 2001, Austria notificó a la Comisión Europea que se aparta de las disposiciones comunitarias para mantener las disposiciones nacionales sobre la comercialización de abonos que contienen cadmio (límite máximo de 75 [mg kg⁻¹] de P₂O₅). Según se señala en el artículo 8 de la notificación (Nº2001-NOTIF95.4-AU-1, Unión Europea, 2002a) las autoridades austriacas justifican su solicitud por razones relativas al medio ambiente señalando que el cadmio es una sustancia preocupante y que debería ser obligatorio adoptar medidas suplementarias para reducir el riesgo ambiental.

Finlandia, por su parte, se acoge a este mismo recurso el día 07 de diciembre de 2001 en que la legislación nacional establece un límite máximo de cadmio para abonos agrícolas y hortícolas de 50 [mg] de cadmio por cada kilogramo de fósforo (Unión Europea, 2002b).

Cuadro 3. Valores límites para cadmio en los fertilizantes y suelos en diversos países.

País	Límite de Cd en fertilizantes [mg kg ⁻¹ P ₂ O ₅]	Límite de Cd en fertilizantes [mg kg ⁻¹ P]	Límite de entrada anual de Cd a los suelos agrícolas [g ha ⁻¹]	Límite de Cd en suelos agrícolas [mg kg ⁻¹ suelo seco]	Referencia
Alemania	40-90 ^a	91,6-206,1	16,7 ^b	1,0	Oosterhuis <i>et al.</i> , 2000.
Australia	150	343,5	--	--	Roberts, 1996.
Austria	75	171,8	10 ^c /5 ^d	1,0	Oosterhuis <i>et al.</i> , 2000.
Bélgica	90	206,1	150	1,0-3,0	Oosterhuis <i>et al.</i> , 2000.
Dinamarca	47	107,6	--	0,5	Oosterhuis <i>et al.</i> , 2000.
Finlandia	21,5	49,2	3	0,5	Oosterhuis <i>et al.</i> , 2000.
Japón	146	334,4	--	--	Roberts, 1996.
Luxemburgo	90	206,1	150	1,0-3,0	Oosterhuis <i>et al.</i> , 2000.
Noruega	43	98,5	--	--	Roberts, 1996.
Países Bajos	17 ^e	40,0 ^e	--	0,5-1,0	Oosterhuis <i>et al.</i> , 2000.
Portugal	40-70 ^f	91,6-160,3	--	--	Oosterhuis <i>et al.</i> , 2000.
Reino Unido	--	--	0,15 ^g	3,0 ^h	Oosterhuis <i>et al.</i> , 2000.
Suecia	43 ⁱ	98,5	1,75 ^j	--	Oosterhuis <i>et al.</i> , 2000.
Suiza	21	48,1	--	--	Roberts, 1996.

^a Basado en un acuerdo voluntario entre el gobierno y la industria.

^b Promedio sobre un periodo de 3 años.

^c Suelo arable.

^d Praderas y hortalizas.

^e OECD (1994) menciona un límite de 40 mg kg⁻¹ de P (17 mg kg⁻¹ P₂O₅). De acuerdo con un vocero de VKP (Vereniging van Kunstmestproducenten), no hay límite para el contenido de Cd en fertilizantes en los Países Bajos. Está en preparación un acuerdo voluntario.

^f Mencionado en OECD (1994); probablemente no es un límite legal.

^g Sólo con lodos residuales.

^h Suelos con un pH de 5 y superior, tratados con lodo residual.

ⁱ Un límite voluntario de 21,5 mg kg de P₂O₅ ha sido introducido por la SLR (Svenska Lantmännen, cooperación sueca a agricultores).

^j Promedio para siete años; menor a 0,75 g ha por año a partir del año 2000.

En ambos casos, los países no se acogen a las medidas comunitarias generales debido a que se han detectado problemas ambientales, según evaluaciones realizadas por consultores contratados por el Directorio General de las Comunidades Europeas (Directorate-General III of the European Communities) para la evaluación del riesgo del cadmio en los fertilizantes (Unión Europea, 2002c). La UE ha avanzado

respecto al establecimiento de disposiciones a nivel comunitario relativas al contenido de cadmio de los abonos, al 10 de abril de 2002 el Parlamento europeo aprobó una propuesta, pero con varias enmiendas, que al 17 de junio del mismo año la adoptó como una propuesta modificada que recogía parte de dichas enmiendas (Unión Europea 2002d).

5.3. Aspectos del cultivo del maíz

En el contexto nacional chileno el cultivo del maíz es el tercer cultivo de importancia en superficie sembrada. En la temporada 2001/02 ésta alcanzó cerca de 87 mil hectáreas, después del trigo, 426.100 [ha], y la avena, 96.220 [ha] (ODEPA, 2002).

Respecto de América Latina y El Caribe (LAC), la superficie dedicada al cultivo del maíz sufrió una fuerte expansión, aumentando cerca de 3,5 millones de hectáreas en el periodo 1990-2000 (CEPAL-IICA, 2001). El maíz es esencial para la producción pecuaria.

En las tres últimas décadas el maíz ha ocupado el primer lugar de la producción agrícola de la Región LAC, representando el 28,8% (año 2002) de la producción agrícola total para la misma Región.

El cultivo del maíz representa el 10,6% del total de la superficie de cultivos anuales de Chile (ODEPA, 2002). La superficie sembrada con maíz se concentra en las regiones Metropolitana, VI y VII (Figura 7), abarcando el 91% de la superficie total de este cultivo.

Para la temporada 2000-2001, la distribución porcentual de la superficie cultivada con maíz señala que el 61% se concentra en la VI Región (Figura 8).

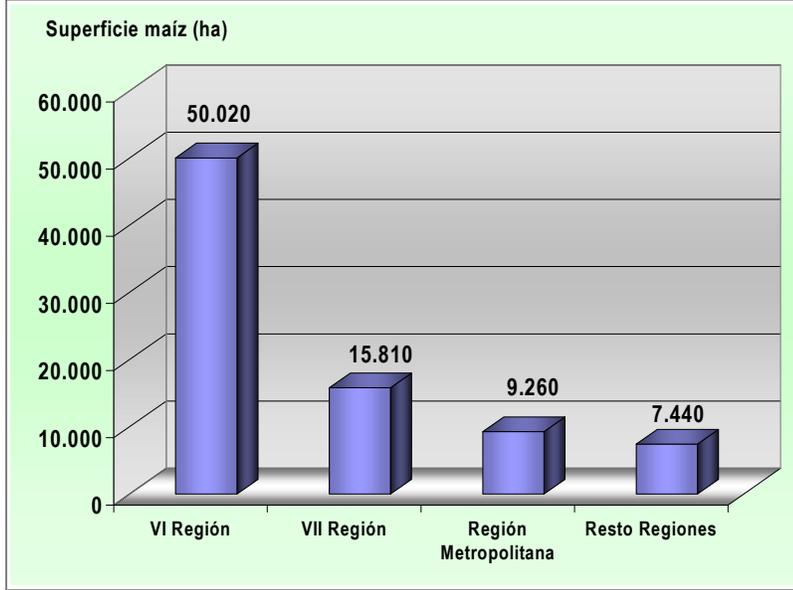


Figura 7. Superficie cultivada con maíz según regiones, temporada 2000-2001.
(Elaborado a partir de datos ODEPA, 2002).

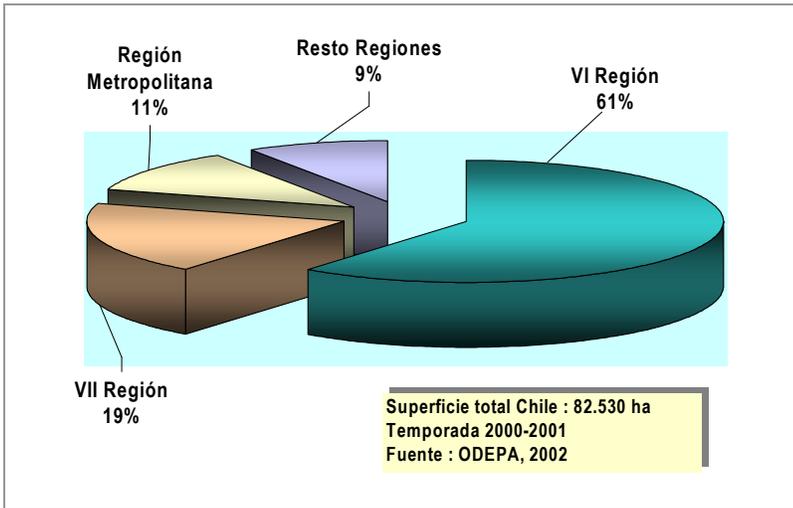


Figura 8. Distribución porcentual de la superficie cultivada con maíz por regiones, temporada 2000-2001.

Respecto de la evolución de la superficie sembrada de maíz, ésta ha permanecido relativamente estable para el periodo 1979/80-2000/01, con una producción con tendencia creciente para el mismo periodo, debido probablemente a un mejor manejo del cultivo, el que pasa por una mayor aplicación de fertilizantes, entre ellos fosfatos.

De hecho, en el contexto de LAC, la expansión de la superficie destinada a la agricultura y particularmente al cultivo del maíz se explica por un mayor y “mejor” uso de los fertilizantes. Chile, en este mismo contexto, ocupaba el año 2000 el segundo lugar en consumo de fertilizantes por hectárea cultivada, después de Costa Rica (CEPAL – IICA, 2001).

Respecto de este último punto, es interesante destacar que, por un lado Chile seguirá aumentando su consumo de fertilizantes frente a un aumento de la producción (y también expansión de la superficie sembrada), y por otro lado, en el país se tiene que analizar cómo se compatibilizaría esta situación con la tendencia creciente a la implementación de “buenas prácticas agrícolas”.

Claramente, los cambios de la superficie nacional sembrada con maíz está regida por la evolución de la superficie de la VI Región que concentró en promedio el 57% de la superficie total del cultivo para el periodo 1979/80-2000-2001 (ODEPA, 2002).

Tanto para la Región LAC como para Chile, la importancia de este cultivo radica en que es esencial para la producción pecuaria. En Chile el grano es un insumo alimenticio primordial en la producción de aves y cerdos de exportación.

5.3.1. Usos del maíz y sus implicancias respecto del cadmio

El análisis de las vías de consumo del maíz es particularmente importante para el análisis de la llegada del cadmio al ser humano a través de la dieta. El cadmio puede llegar ya sea por el consumo directo del maíz (choclo o alimentos derivados del grano) o por el consumo de carne de animales que se han alimentado de productos derivados del cultivo tales como el ensilaje de maíz, granos secos y otros subproductos (Figura 9).

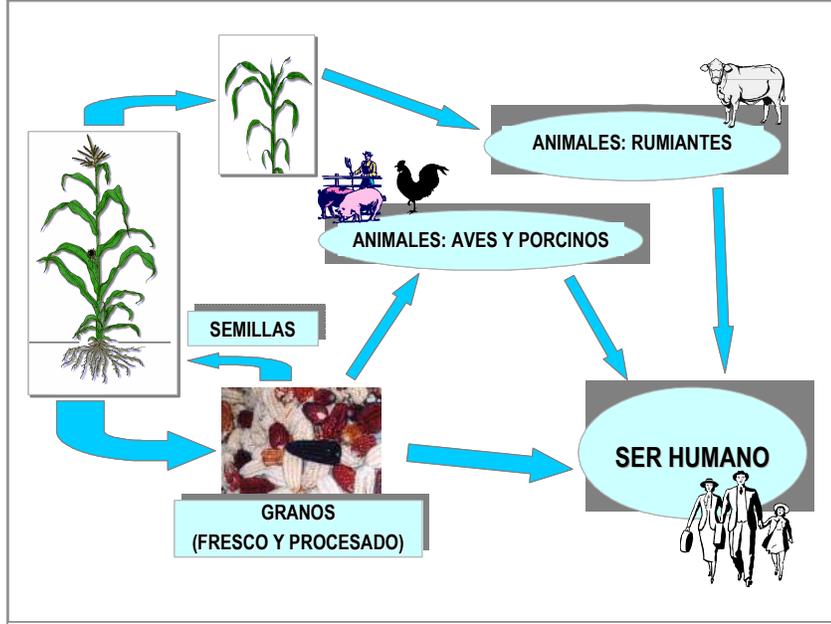


Figura 9. Usos del maíz.

En la Figura 9 se detalla los diferentes usos del maíz, cuyas vías pueden conducir el cadmio al ser humano. La planta de maíz es cosechada y su parte aérea se destina a ensilaje para rumiantes y el grano se destina, una parte a semillas y otra a consumo humano y animal. La parte que va a consumo humano es la mazorca (choclo), granos (maíz dulce) o productos derivados del grano de maíz (harina, aceite, entre otros). La parte que va a consumo animal es el grano seco, principalmente molido y también parte aérea de la planta, después de la cosecha.

La materia seca del grano está compuesta, aproximadamente por 77% de almidón, 2% de azúcar, 9% de proteínas, 5% de aceites, 5% de pentosanas (o hemicelulosas) y 2% de cenizas (sales de calcio, magnesio, fósforo, aluminio, hierro, sodio, potasio y cloro).

Los diferentes destinos del maíz y de sus productos, se pueden categorizar en tres áreas bien definidas de consumo: alimentación animal, industria y consumo humano. En la Figura 10 se señalan los diferentes productos del maíz por categoría de consumo.

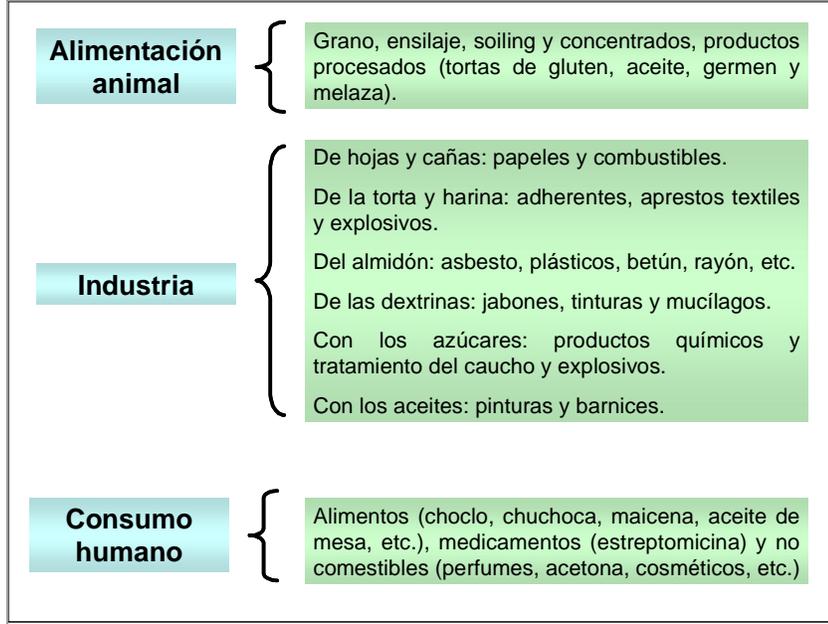


Figura 10. Usos del maíz por categoría de consumo.

(Elaborado a partir de datos de Paratori y Altamirano, 1995).

Conocer las diferentes vías de consumo de un producto alimenticio (maíz para el presente estudio) es de vital importancia para evaluar el impacto de un contaminante en el ambiente y en la salud humana.

5.3.2. Fertilización fosfatada

La fertilización fosfatada del maíz, así como en cualquier otro cultivo, requiere conocer el índice de suficiencia del fósforo medido en el análisis de fertilidad de suelos. Este nivel de suficiencia indica el fósforo residual o disponible para el cultivo a ser establecido.

La historia de un suelo en cuanto a la aplicación de fuentes fosfatadas, ya sea fertilizantes u otros abonos, señala el nivel de enriquecimiento en fósforo.

En el Cuadro 4 aparecen algunas recomendaciones de fertilización fosfatada para orientar los cálculos de fertilizantes que se aplicarían dependiendo del tipo de suelo y del grado de suficiencia del nutriente. En estos cálculos se debe tener presente

que el cultivo del maíz requiere adicionalmente el aporte de otros nutrientes importantes tales como nitrógeno y potasio.

Respecto de las alternativas de fertilizantes fosfatados para el maíz en el mercado chileno, en el Cuadro 5 se muestran algunas alternativas con sus contenidos de nutrientes.

Cuadro 4. Dosis de fósforo recomendadas para un rendimiento de maíz mayor de 120 [qqm ha⁻¹]^a en dos tipos de suelo, de acuerdo al índice de fósforo disponible.

Índice de fósforo disponible [mg kg ⁻¹] ^b	Categoría de suficiencia	Rango de aplicación de fósforo [kg ha ⁻¹] de P ₂ O ₅	Superfosfato triple o fosfato diamónico [kg ha ⁻¹]
Suelos aluviales IV a VII regiones, depresión intermedia			
1-4	Muy bajo	110-90	240-195
5-8	Bajo	90-70	195-152
9-12	Medio	70-60	152-130
13-16	Alto	60-40	130-87
Más de 16	Muy alto	40-20	87-0
Suelos trumaos VI a VIII regiones, precordillera andina			
1-4	Muy bajo	150-120	325-260
5-8	Bajo	120-90	260-195
9-12	Medio	90-60	195-130
13-16	Alto	60-40	130-87
Más de 16	Muy alto	40-20	87-43

^a [qqm ha⁻¹]: quintales métricos por hectárea.

^b fósforo medido por el método Olsen.

Fuente: Fernández, 1995.

Cuadro 5. Alternativas de fertilizantes para el maíz.

Fertilizante	Contenido de nutrientes solubles en agua [%]			Efecto en el pH del suelo a mediano plazo
	Nitrógeno (N)	Fósforo (P ₂ O ₅)	Potasio (K ₂ O)	
Fosfato diamónico	18	46	-	Moderadamente ácido
Superfosfato triple	-	46	-	Neutro
Superfosfato simple	-	25	-	Neutro
Sulfato de potasio	-	-	50	Neutro
Cloruro de potasio	-	-	60	Neutro

Fuente: Fernández, 1995.

Los fertilizantes fosfatados son aplicados en una dosis única en la siembra del cultivo de maíz. En las fichas técnicas se recomiendan diferentes alternativas de

fertilización fosfatada. Una alternativa recomienda 100 unidades de fósforo⁵, tanto en maíz para grano como para consumo fresco, choclo, con rendimientos de 130-150 [qqm ha⁻¹] y 50.000 [mazorcas ha⁻¹], respectivamente (Covarrubias, 1995). Otra alternativa señala 80 unidades de fósforo para rendimientos de 40.000 a 60.000 [mazorcas ha⁻¹] para maíz dulce (choclo) (Agrochile, 2000).

5.3.3. Suelos para maíz

La mayor parte de las siembras de maíz se realizan en suelos aluviales de la depresión central y de las terrazas ribereñas de ríos y esteros. Estos suelos se caracterizan por presentar un estrato superficial (comúnmente de textura franca o arenosa de variada profundidad) depositado sobre otros estratos de ripio y arena (subsuelo). Los contenidos de arcilla en el subsuelo no impiden el desarrollo del maíz, sin embargo, sin arcilla las raíces profundizadoras de este cultivo pueden penetrar a mayor profundidad el suelo alcanzando mayores rendimientos. Se recomienda establecer el cultivo en suelos con profundidades de al menos 60 [cm] (Fernández *et al.*, 1995).

⁵ Una unidad de fósforo corresponde a 1 kg de anhídrido fosfórico (P₂O₅).

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Fases del estudio

La presente investigación es de tipo no experimental descriptiva y consta de dos fases, una descriptiva y otra cuantitativa.

Fase descriptiva. Se recopiló y analizó información obtenida de la consulta de publicaciones científicas y de la realización de entrevistas a especialistas y técnicos. Se consultaron publicaciones científicas del periodo 1980-2002, de centros físicos (bibliotecas) y virtuales (bibliotecas electrónicas en Internet), ya que la revisión bibliográfica preliminar señaló que la información relacionada con el tema de la presente investigación se concentraba en este periodo. Asimismo, se consultaron bases de datos de organismos públicos relacionadas con estadísticas de importaciones de fertilizantes fosfatados y estadísticas productivas para cultivos tales como la Dirección de Promoción de Exportaciones dependiente del Ministerio de Relaciones Exteriores (ProChile) y la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias del Ministerio de Agricultura (ODEPA).

En esta fase se investigaron en detalle los siguientes aspectos:

- Origen geográfico de los fertilizantes fosfatados.
- Concentración de cadmio de los fertilizantes fosfatados y rocas fosfóricas.
- Tipos de fertilizantes fosfatados usados mayoritariamente en Chile y en el cultivo de maíz.
- Regiones de cultivo y series de suelos cultivados con maíz.
- Concentración de cadmio en la capa arable del suelo.

Fase cuantitativa. Consistió en cuantificar el impacto del cadmio en el suelo. Para ello, se hizo una proyección del impacto del cadmio en la capa arable del suelo, según las dosis y fertilizantes usados para el cultivo del maíz en Chile, con un horizonte de proyección de 50 años.

Para evaluar el impacto de los fertilizantes fosfatados utilizados en el cultivo del maíz en la contaminación de suelos por cadmio se usó el modelo de evaluación y

manejo del riesgo, publicado por De Meeûs *et al.*, el año 2002 y propuesto por ERM el año 1999 por encargo del European Commission Directorate General III (ERM, 1999; ERM, 2000; ERM, 2001) (explicado anteriormente en el Marco Teórico). Se construyeron escenarios para analizar la acumulación de cadmio en el tiempo, aplicando este modelo.

6.2. *Análisis de antecedentes*

Se hizo un análisis descriptivo del origen de los fertilizantes fosfatados, de la concentración de cadmio de las rocas fosfóricas que los originan, de los fertilizantes usados mayoritariamente en Chile, de los suelos donde se cultiva mayoritariamente maíz (cultivo de referencia) y de la concentración de cadmio en la capa arable de los suelos. Se contrastaron los datos extranjeros con los obtenidos para Chile.

6.3. *Supuestos para la aplicación del modelo predictivo*

Se hizo una recopilación de datos secundarios para estimar y/o calcular todos los parámetros utilizados en el modelo de acumulación. Mayoritariamente se usaron los estadígrafos descriptivos mediana, valor mínimo y valor máximo para la aplicación del modelo.

En la aplicación del modelo se asumió lo siguiente:

- Valor cero para las entradas de cadmio al suelo no aportadas por fertilización fosfatada.
- Profundidad de la capa arable de 0,2 [m].
- Tiempo de proyección de 50 [años].

Se construyeron 48 escenarios con la ecuación general del modelo (Ecuación 1) utilizando los valores de la tasa de extracción de cadmio del cultivo K_p , concentración inicial de cadmio en el suelo $Cd_s(0)$, tasa de entrada de cadmio a los suelos K_e y la tasa de lixiviación de cadmio desde el suelo K_l .

Cada escenario se analizó descriptivamente contrastando con información extranjera de referencia para estimar el impacto del cadmio en la capa arable del suelo.

6.4. Selección de los suelos para la aplicación del modelo

Para la aplicación del modelo de acumulación de cadmio y para el cálculo de la proyección de cadmio en el tiempo se investigó sobre las principales series de suelos presentes en la VI Región donde se concentra la mayor parte de la superficie del cultivo de maíz.

6.4.1. Suelos para cultivo del maíz

La superficie nacional dedicada al cultivo del maíz se concentra en la zona central, destacando la VI región con el 61% de la superficie total de maíz (ODEPA, 2002).

La Figura 11 presenta las principales comunas donde se cultiva maíz, que tienen una superficie superior a las 2.000 [ha]. Tal ordenamiento y selección se ha llevado a cabo para escoger las series de suelo donde se concentra una mayor superficie del cultivo.

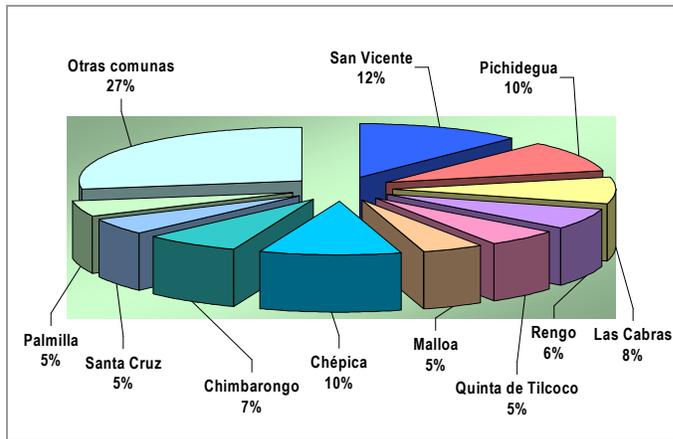


Figura 11. Comunidades de la VI Región con una superficie de maíz superior a 2.000 ha.

En este sentido en el Cuadro 6 se presentan las principales series de suelos cultivados con maíz en la VI Región. Para esta investigación se escogió el orden Mollisol por ser el más recurrente. Ocho series de suelos de esta Región se clasifican en este orden.

Cuadro 6. Principales series de suelos de la VI Región donde se cultiva maíz.

Serie	Orden	Clasificación taxonómica
Almahue	Vertisol	Aquic Haploxererts
Chépica	Mollisol	Fluventic Haploxerolls
Cocalán	Mollisol	Aquic Haploxerolls
Cunaco	Mollisol	Fluventic Haploxerolls
Graneros	Mollisol	Aquic Haploxerolls
Huique	Vertisol	Typic Calcixererts
Malloa	Mollisol	Vertic Haploxerolls
Millahue	Mollisol	Typic Epiaquolls
O'Higgins	Mollisol	Fluventic Haploxerolls
Peor es Nada	Alfisol	Aquic Palexeralfs
Pidihuinco	Alfisol	Mollic Haploxeralfs
Polonia	Vertisol	Aquic Aploxererts
Puente Negro	Alfisol	Typic Duraqualfs
San Vicente	Mollisol	Aquic Argixerolls
Talhuén	Alfisol	Typic Duraqualfs

Fuente: CIREN, 1996; http://www.statlab.iastate.edu/soils/keytax/RevKeysSoilTax5_00.pdf, 2002.

6.4.2. Características generales de las series de suelos

En el Cuadro 12 se muestra las propiedades de las ocho series de suelos de la VI Región utilizadas para la aplicación del modelo de acumulación de cadmio. En el ANEXO I se muestran en detalle las características físicas y químicas de estas series.

Cuadro 7. Propiedades físicas y químicas de ocho series de suelos de la VI Región (Orden Mollisol).

Serie	Da [g cm ⁻³]	Humedad [%]	H. Retenida [%]	H. Aprovechable [%]	Carbono Orgánico [%]	MO [%]	pH agua 1:1	CE [dS m ⁻¹]
Chépica	----	39,0	28,0	11,0	2,0	3,4	6,3	----
Cocalán	1,201	20,1	11,5	8,6	----	2,6	7,9	0,228
Cunaco	----	36,0	22,0	14,0	2,1	3,6	6,5	----
Millahue	1,160	24,3	12,4	11,9	----	2,5	6,9	0,050
San Vicente	1,701	34,5	20,0	14,6	----	5,7	6,2	----
Graneros	1,100	26,0	14,4	11,6	----	3,4	6,9	0,120
Malloa	----	39,4	30,8	8,6	----	3,9	6,8	----
O'Higgins	1,481	30,2	17,3	13,0	----	3,5	6,5	----
Promedio series	1,329	31,2	19,5	11,7	2,1	3,6	6,8	0,133
Mediana (Valor central)	1,201	32,4	18,6	11,7	2,1	3,5	6,7	0,120
Valor Mínimo	1,100	20,1	11,5	8,6	2,0	2,5	6,2	0,050
Valor Máximo	1,701	39,4	30,8	14,6	2,1	5,7	7,9	0,228
Desviación estándar	0,254	7,2	7,1	2,2	0,1	1,0	0,5	0,089

Fuente: Preparado con información de CIREN, 1996.

7. RESULTADOS

7.1. Principales fertilizantes fosfatados utilizados en Chile

La mayor parte de las importaciones chilenas de fertilizantes fosfatados se concentra en los superfosfatos que se han mantenido sobre las 200 mil toneladas a partir del año 1998 (Figura 12). En el caso de los fosfatos mono y diamónico se han mantenido volúmenes de importación similares, sobre las 50 mil toneladas, desde el año 1995, y no han superado las 100 mil toneladas.

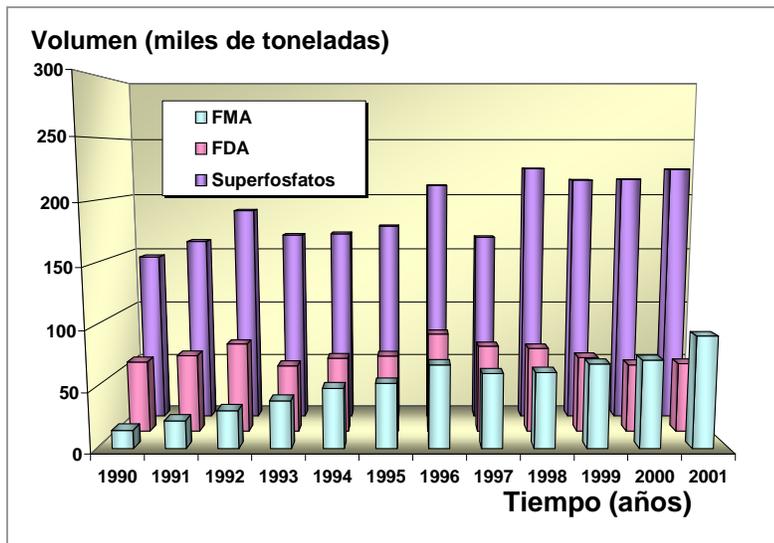


Figura 12. Importaciones chilenas de fertilizantes fosfatados, periodo 1990-2001.

(Elaborado a partir de datos ODEPA y ProChile, 2001).

Los principales socios comerciales para las importaciones chilenas de superfosfatos han sido Estados Unidos y México. En el Cuadro 8 se puede apreciar que los orígenes de los superfosfatos han sido diversos, destacando México y Estados Unidos. En el caso de Israel, se ha mantenido un abastecimiento permanente a partir del año 1996, sin embargo, en cantidades no superiores a las 19 mil toneladas. Para el resto de los países se han realizado importaciones de superfosfatos en forma esporádica y en cantidades mucho menores que las de Estados Unidos y México.

En la Figura 13 se muestra claramente una sustitución progresiva de importaciones de superfosfatos estadounidenses por mexicanos. Esto podría ser consecuencia del Acuerdo de Complementación Económica (ACE-17, ODEPA, 2002) que surge en enero de 1992, vínculo económico-comercial entre Chile y México. A raíz de este acuerdo, el vínculo entre ambos países comienza a ser cada vez más dinámico y cercano. La positiva evolución de este acuerdo llevó a la negociación y firma de un Tratado de Libre Comercio entre Chile y México, que entró en vigor a finales de 1999. Con este Tratado se consolidó la situación arancelaria del ACE 17, que deja libre de arancel aduanero a más del 95% de los productos. De hecho, en el año 2001 el volumen de importaciones de superfosfatos mexicanos superó el máximo volumen importado desde EE.UU. el año 1992, durante el periodo 1990-2001.

Cuadro 8. Toneladas de superfosfato importado según país de origen.

Año	Estados Unidos	Finlandia	Hong-Kong	Israel	Jamaica	Marruecos	México	Uruguay	Venezuela	Total
1990	145.854,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	200,0	0,0	146.054,2
1991	160.018,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	160.018,2
1992	182.352,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4.998,7	0,0	187.351,5
1993	165.579,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	165.579,4
1994	153.843,3	0,2	0,0	2.782,8	150,0	0,0	10.105,6	0,0	0,0	166.881,9
1995	136.880,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	36.495,1	0,0	0,0	173.375,5
1996	147.201,1	0,0	1,6	7.994,0	0,0	0,0	54.276,6	0,0	0,0	209.473,3
1997	88.424,4	0,0	0,0	12.327,5	0,0	0,0	62.803,4	0,0	0,0	163.555,3
1998	92.170,9	0,0	0,0	2.904,0	0,0	0,0	129.090,8	0,0	0,0	224.165,7
1999	62.128,4	0,0	0,0	18.778,7	0,0	10.661,5	111.855,6	5.321,3	5.549,2	214.294,8
2000	65.817,1	0,0	0,0	10.873,4	0,0	0,0	138.321,5	0,0	0,0	215.012,1
2001	29.654,3	0,0	0,0	4.447,0	0,0	0,0	185.456,2	4.068,3	0,0	223.625,8

Nota: Glosa internacional de comercialización para superfosfatos: 31031000.

Fuente: Elaborado a partir de datos ODEPA, 2002, y ProChile, 2001.

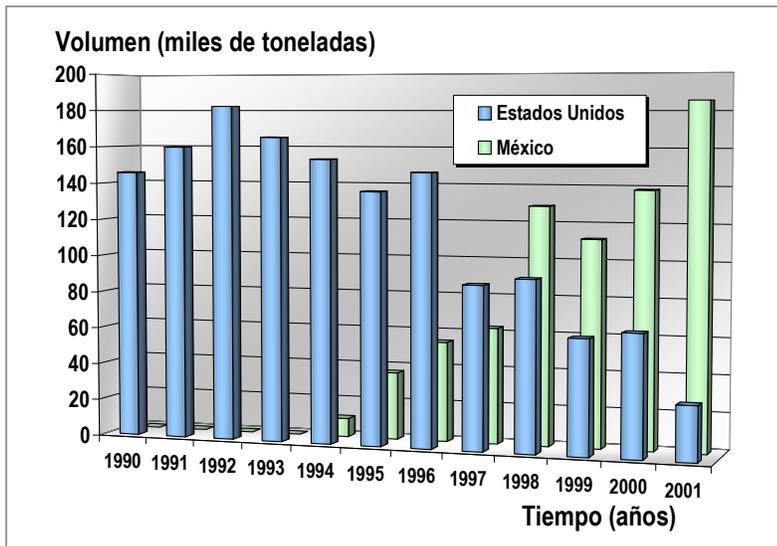


Figura 13. Evolución del volumen importado de superfosfatos por Chile desde México y Estados Unidos, periodo 1990-2001.

(Elaborado a partir de datos ODEPA y ProChile, 2001).

El año 1994 se comienza a importar superfosfato mexicano, cuyo volumen aumenta progresivamente hacia el año 2001 con un promedio de 25 mil toneladas anuales, hasta alcanzar 185.456 toneladas ese año.

Haciendo un análisis del año 2001, la Figura 14 muestra la distribución porcentual de las importaciones de superfosfato, según país. Dicha Figura pone de manifiesto que los principales países de procedencia de los superfosfatos usados en la agricultura chilena son México y Estados Unidos con el 83% y 13% del mercado de las importaciones, respectivamente.

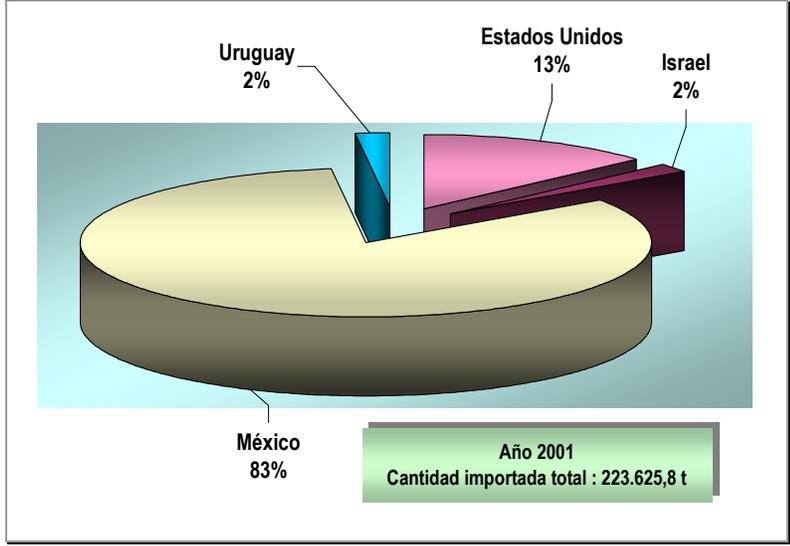


Figura 14. Distribución porcentual de las importaciones de superfosfato por país, año 2001.

(Elaborado a partir de datos ODEPA y ProChile, 2001).

Tales datos señalan la necesidad de analizar los orígenes y los procesos de fabricación de los fertilizantes fosfatados de México y Estados Unidos, particularmente los superfosfatos.

Considerando que los superfosfatos son los fertilizantes fosfatados que abarcan la mayor parte de las importaciones, es posible aseverar que éstos son ampliamente ocupados en la agricultura chilena y particularmente en el cultivo del maíz.

7.2. Contenido de cadmio

7.2.1. Roca fosfórica

Como se ha señalado anteriormente, los fertilizantes fosfatados provienen de la roca fosfórica según diferentes procesos (Figura 6).

Las rocas fosfóricas se encuentran en tres tipos de depósitos: los ígneos, sedimentarios y metamórficos. Los depósitos sedimentarios tienen mayor contenido de cadmio destacando los yacimientos de Estados Unidos y Senegal, considerando

además que la concentración de cadmio aumenta al expresarla sobre la base de kilogramos de P real, en todas las rocas fosfóricas investigadas (ANEXO II).

Considerando que las importaciones chilenas de fertilizantes fosfatados provienen principalmente de México y Estados Unidos se debe tener presente que aún cuando la fuente exacta de la roca fosfórica usada en la fabricación de fertilizantes fosfatados no se conoce, la mayoría de la roca fosfórica en Estados Unidos proviene de Florida y Carolina del Norte (Mortvedt *et al.*, 1981) (Figura 15). Las investigaciones de Gavi *et al.* (1997) señalan valores en el rango 5 a 50 [mg kg⁻¹] de Cd, coincidiendo con la mayoría de los autores indicados en el Cuadro anterior para estos yacimientos.

México posee importantes yacimientos de fosforita en Baja California, Coahuila, Nuevo León, Durango, Tamaulipas, San Luis de Potosí, Santa Rosa-Bahía Magdalena, etc. Los mayores depósitos se encuentran en Baja California y se calculan del orden de 6,89 millones de toneladas métricas de mineral con leyes variables entre 4,8 y 26% de P₂O₅ (Núñez, 1987) (Figura 16). Respecto del contenido de cadmio en la roca fosfórica de los yacimientos mexicanos, Syers *et al.* (1986) encontraron que ellos contienen 8 [mg kg⁻¹].



Figura 15. Localización de principales depósitos de fosforita en Estados Unidos.

(<http://members.tripod.com/sdapts/WAF/Country%20Maps/United%20States.jpg>, julio 27 de 2002).



Figura 16. Localización de depósitos mayores de fosforita en México.
 (http://go.hrw.com/atlas/norm_map/mexico.gif, julio 27 de 2002).

7.2.2. Fertilizantes fosfatados

Diversas investigaciones se han centrado en la determinación del contenido de cadmio de los fertilizantes fosfatados. En el Cuadro 9 se presenta la composición en cadmio de los fertilizantes fosfatados según tipo/origen de fertilizante para diversas fuentes de información analizadas.

Cuadro 9. Contenido de cadmio en distintos fertilizantes fosfatados, según diversas investigaciones.

Fertilizante	Tipo / origen	Contenido de cadmio [mg kg ⁻¹ de fertilizante]	Contenido de cadmio [mg kg ⁻¹ de P]	Fuente de información
Fosfato diamónico	Tampa DAP 18-46-0	3,7	18,3	www.cargill.com , 11-Feb-02
Fosfato diamónico	Bartow DAP 18-46-0	5,3	26,1	www.cargill.com , 11-Feb-02
Fosfato diamónico	-	4,6±0,1	-	Raven y Loeppert, 1997
Fosfato diamónico	-	35,5±0,2	-	Raven y Loeppert, 1997
Fosfato diamónico	DAP 21-23-0	2	19,9 ^a	Mortvedt <i>et al.</i> , 1981
Fosfato diamónico	DAP 18-20-0	74	847,8 ^a	Mortvedt <i>et al.</i> , 1981
Fosfato diamónico	DAP 18-20-0	153	1.752,9 ^a	Mortvedt <i>et al.</i> , 1981
Fosfato diamónico	-	6,5	-	McLaughlin <i>et al.</i> , 1995
Fosfato diamónico	-	10	-	Charter <i>et al.</i> , 1993
Fosfato diamónico	Estados Unidos	7,4 (2,6-10,5) ^b	-	Valenzuela, 2001
Fosfato diamónico	México	11,3 (4,5-20,7)	-	Valenzuela, 2001
Fosfato diamónico	Rusia	0,2 (0,002-0,3)	-	Valenzuela, 2001
Fosfato diamónico	Venezuela	12,4 (2,6-17,0)	-	Valenzuela, 2001
Fosfato monoamónico	Bartow MAP 11-52-0	4,8	21,4	www.cargill.com , 11-Feb-02
Fosfato monoamónico	Tampa MAP 10-50-0	7	32,0	www.cargill.com , 11-Feb-02
Fosfato monoamónico	-	<0,3	-	Raven y Loeppert, 1997
Fosfato monoamónico	-	4,0	-	Raven y Loeppert, 1997
Fosfato monoamónico	-	3,5	-	Gabe y Rodella, 1999
Fosfato monoamónico	-	6	-	McLaughlin <i>et al.</i> , 1995
Fosfato monoamónico	-	7,1	-	Charter <i>et al.</i> , 1993

(continúa)

Cuadro 9. (Continuación)

Fertilizante	Tipo / origen	Contenido de cadmio [mg kg ⁻¹ de fertilizante] ^a	Contenido de cadmio [mg kg ⁻¹ de P]	Fuente de información
Fosfato monoamónico	Estados Unidos	3,9 (2,2-4,8)	-	Valenzuela, 2001
Fosfato monoamónico	México	12,3 (0,3-16,2)	-	Valenzuela, 2001
Fosfato monoamónico	Rusia	0,44 (0,3-0,5)	-	Valenzuela, 2001
Superfosfato simple	Araxá, Brasil	9,4	-	Prochnow <i>et al.</i> , 2001
Superfosfato simple	Jacupiranga, Brasil	6,5	-	Prochnow <i>et al.</i> , 2001
Superfosfato simple	Catalao 1, Brasil	5,1	-	Prochnow <i>et al.</i> , 2001
Superfosfato simple	Catalao 2, Brasil	5,5	-	Prochnow <i>et al.</i> , 2001
Superfosfato simple	Tapira, Brasil	5,8	-	Prochnow <i>et al.</i> , 2001
Superfosfato simple	-	32	-	Loganathan <i>et al.</i> , 1997
Superfosfato simple	-	38	-	Williams y David, 1973
Superfosfato simple	-	3	-	Gabe y Rodella, 1999
Superfosfato triple	-	5,0	-	Raven y Loeppert, 1997
Superfosfato triple	-	6,2	-	Raven y Loeppert, 1997
Superfosfato triple	-	2,6	-	Gabe y Rodella, 1999
Superfosfato triple	-	15	-	Charter <i>et al.</i> , 1993
Superfosfato triple	Estados Unidos	6,8 (4,8-11,7)	-	Valenzuela, 2001
Superfosfato triple	México	26 (12,8-55,5)	-	Valenzuela, 2001
Superfosfato Triple granular	GTSP 0-46-0	6,6	32,9	www.cargill.com , 11-Feb-02
Fosfato de roca de Carolina del Norte	-	48,8±0,5	-	Raven y Loeppert, 1997
Fosfato de roca de Tilemsi	-	1,3±0,1	-	Raven y Loeppert, 1997

^a Valores calculados con los antecedentes disponibles.

^b Valor promedio y rango de datos.

Las concentraciones de cadmio encontradas en los superfosfatos mexicanos fluctúan entre 12,8 y 55,5 [mg kg⁻¹ fertilizante] (Cuadro 10). El valor máximo de 55,5 [mg kg⁻¹] es un valor superior a lo investigado por otros autores (Cuadro 9) para el mismo fertilizante.

Valenzuela (2001) estimó el contenido de cadmio de los fertilizantes fosfatados comercializados en Chile. Su investigación consideró el muestreo de embarques llegados a Chile entre junio de 1999 y septiembre del 2000. En el Cuadro 10 se presentan los resultados para 69 embarques investigados y se constata que los fertilizantes con mayores contenidos de cadmio son los superfosfatos provenientes de México y Venezuela. Estos resultados son particularmente interesantes considerando que los mayores volúmenes de fertilizantes fosfatados provienen de México y en la forma de superfosfatos (ODEPA, 2002, ProChile, 2001).

Cuadro 10. Contenido de cadmio en los fertilizantes fosfatados comercializados en Chile, según embarques.

Fertilizante	Origen	Embarques analizados	Contenido de cadmio [mg kg ⁻¹ fertilizante]	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Valor mínimo	Valor máximo
Fosfato diamónico	Estados Unidos	3	7,4	3,5	47,2	2,6	10,5
Fosfato diamónico	México	13	11,3	3	26,4	4,5	20,7
Fosfato diamónico	Rusia	3	0,2	0,08	50	0,002	0,3
Fosfato diamónico	Venezuela	5	12,4	5,2	41,5	2,6	17
Fosfato monoamónico	Estados Unidos	4	3,9	0,7	18	2,2	4,8
Fosfato monoamónico	México	19	12,3	3,4	27,6	0,3	16,2
Fosfato monoamónico	Rusia	2	0,44	0,07	15,9	0,3	0,5
Superfosfato triple	Estados Unidos	7	6,8	1,8	26,4	4,8	11,7
Superfosfato triple	México	13	26	15,5	59,9	12,8	55,5

Fuente: Valenzuela, 2001.

En el Cuadro 11 se muestran las concentraciones de cadmio, expresados en mg de cadmio por kg de P aplicado, de los fertilizantes fosfatados comercializados en Chile.

Cuadro 11. Contenido de cadmio en fertilizantes fosfatados comercializados en Chile, valores expresados en función del P aplicado.

Fertilizante	Origen	Embarques analizados	Fósforo [%]	Contenido de cadmio [mg kg ⁻¹ de P]	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Valor mínimo	Valor máximo
Fosfato diamónico	Estados Unidos	3	19,9	37,2	17,9	48,2	13,1	53,1
Fosfato diamónico	México	13	19,1	56,7	15,0	26,4	22,4	101,7
Fosfato diamónico	Rusia	3	20,1	0,8	0,4	53,6	0,002	1,3
Fosfato diamónico	Venezuela	5	20,0	62,7	26,2	41,8	13,3	86,2
Fosfato monoamónico	Estados Unidos	4	21,5	18,1	3,7	20,4	10,3	22,3
Fosfato monoamónico	México	19	22,8	54,7	15,4	28,2	1,3	72,9
Fosfato monoamónico	Rusia	2	22,7	1,9	0,3	16,8	1,5	2,4
Superfosfato triple	Estados Unidos	7	20,0	34,0	9,8	21,2	24,3	59,8
Superfosfato triple	México	13	20,0	128,2	73,6	57,5	64,1	267,0

Fuente: Valenzuela, 2001.

Respecto de los valores límites para el cadmio en los fertilizantes fosfatados, es necesario contar con los antecedentes detallados de los fertilizantes comercializados en Chile para saber si estos valores superan los límites establecidos en otros países, presentados en el Cuadro 3. En general, los embarques analizados por Valenzuela (2001) no superan los límites máximos de la mayoría de los países mencionados en dicho cuadro. Sin embargo, el contenido promedio de cadmio del SFT mexicano (128,2 [mg kg⁻¹ P]) supera los límites establecidos por Dinamarca, Finlandia, Noruega, Suecia y Suiza. Se debe tener presente que el contenido máximo de cadmio (267 [mg kg⁻¹ P]), para el mismo fertilizante supera los límites de todos los países salvo Australia y Japón.

7.3. Cálculo de la acumulación de cadmio en la capa arable de los suelos

Para la estimación de cadmio en la capa arable de los suelos cultivados con maíz en Chile, se aplicó el modelo de acumulación propuesto por ERM en el marco de los estudios encargados por el European Commission Directorate General III (ERM, 1999; ERM, 2000; ERM, 2001) y también publicado por De Meeûs *et al.* (2002) (ver Marco teórico y Materiales y Métodos).

Se construyeron escenarios para analizar la evolución del cadmio en el tiempo en la capa arable del suelo. La estimación de cada valor usado se explica en detalle en las secciones siguientes.

7.3.1. Concentración inicial de Cd en el suelo, $Cd_s(0)$

Para la construcción de los escenarios y proyección de la concentración de cadmio en el tiempo se utilizaron dos valores de $Cd_s(0)$ o concentración inicial de cadmio en el suelo: 0,110 [mg kg⁻¹] (Valenzuela, 2000) para suelos aluviales de la zona central de Chile y 0,345 [mg kg⁻¹] para suelos de los valles Cachapoal y Tinguiririca de la VI Región, con un rango de 0,180 a 0,510 [mg kg⁻¹] (González, 2002, comunicación personal)⁶.

Comentario [L1]: Verificar datos

7.3.2. Cálculo de K_e (entrada de Cd a la capa arable de los suelos)

El valor de K_e corresponde a la suma de K_{dep} , K_{le} y K_{fer} . Para el presente estudio se ha considerado valor 0 para K_{dep} (tasa anual de entrada de Cd por depositación atmosférica) y K_{le} (aplicación de lodos y/o estiércol). Esto debido a que las investigaciones señalan que la mayor entrada de cadmio a la capa arable de los suelos agrícolas corresponde a la fertilización fosfatada. Por lo tanto, se hará una estimación del mínimo impacto de la entrada de cadmio al suelo.

En el Cuadro 13 se muestra el cálculo de la entrada de Cd a los suelos debido a la fertilización fosfatada y el resultado final de K_e .

⁶ Sergio González, Investigador del Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile, INIA-La Platina, sgonzale@inia.cl

Se han considerado las dosis de fertilización fosfatada, para el cultivo de maíz, recomendadas para suelos aluviales de la zona central de Chile.

Cuadro 12. Cálculo de la entrada anual de fertilizantes fosfatados al suelo (K_{fer}).

Estadígrafo	Dosis de fertilización fosfatada maíz [kg ha ⁻¹ Fertilizante]	Cd en fertilizantes fosfatados [mg kg ⁻¹] ^a	K_{fer} [mg ha ⁻¹]	K_{fer} [g ha ⁻¹]	K_e [g ha ⁻¹]
Promedio	141	26,0	3.666,0	3,666	3,666
Mínimo	43,5	12,8	556,8	0,557	0,557
Máximo	217,5	55,5	12.071,3	12,071	12,071

^a Valenzuela, 2001.

Estos tres valores (promedio, mínimo y máximo) fueron utilizados para la construcción de escenarios en la aplicación del modelo de acumulación de cadmio en los suelos.

La tasa anual de entrada de cadmio en Chile (promedio 3,6 [g ha⁻¹ año⁻¹]), por el uso de fertilizantes, es mayor a la de trece de los Estados Miembros de la Unión Europea (ver Figura 17). La excepción es Bélgica que tiene una tasa anual de entrada de cadmio de 3,7 [g ha⁻¹].

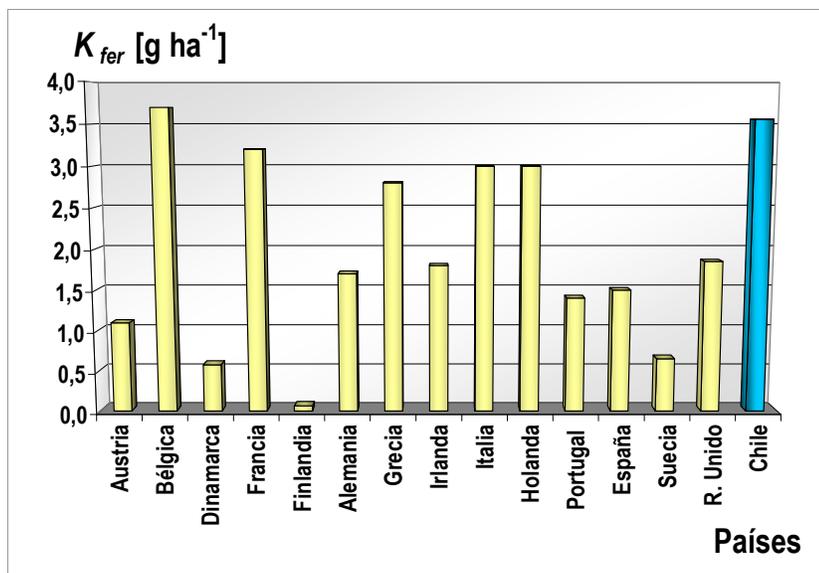


Figura 17. Valores de K_{fer} para los Estados Miembros de la Unión Europea y Chile.
(Elaborado a partir de datos de ERM, 2000).

7.3.3. Cálculo de K_p (tasa de extracción anual de cadmio del cultivo del maíz)

En Austria se ha investigado la extracción de cadmio por el cultivo del maíz (Horak *et al.*, 1995⁷). El rango de valores de K_p para este cultivo estuvo entre 0,09 y 0,17 [$g\ ha^{-1}\ año^{-1}$] y la mediana fue de 0,13 [$g\ ha^{-1}\ año^{-1}$].

Por otro lado, investigaciones realizadas en Dinamarca presentan una metodología de cálculo del K_p en función del rendimiento del cultivo, de la concentración del cadmio en el tejido vegetal y de la concentración de cadmio en el suelo (Ecuación 9) (Hansen, 2000).

$$K_p [g\ ha^{-1}\ año^{-1}] = \frac{Cd_c \times R}{10.000 \times D_a \times p \times Cd_s(0)} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

K_p : tasa de extracción de cadmio del cultivo [$g\ ha^{-1}\ año^{-1}$]

Cd_c : concentración de Cd en el tejido vegetal del cultivo [$mg\ kg^{-1}$ peso seco].

R : rendimiento promedio del cultivo [$kg\ ha^{-1}\ año^{-1}$].

$Cd_s(0)$: concentración de cadmio del suelo [$mg\ kg^{-1}$].

La concentración media de cadmio en una planta de maíz (en función del contenido de cadmio del suelo) es de 0,042 y 0,153 [$mg\ kg^{-1}$ peso seco] (Zhongren *et al.*, 2002) para contenidos de cadmio en el suelo de 0,110 y 0,345 [$mg\ kg^{-1}$] (Valenzuela, 2001, González, 2002⁸), respectivamente. El rendimiento productivo promedio del maíz (temporadas 1995/96-2000/01) para la VI Región fue de 106,2 quintales métricos por hectárea. Aplicando la fórmula (Ecuación 9) se obtuvieron dos valores para K_p , en función de la concentración de cadmio del suelo: 0,0017 y 0,0020 [$g\ ha^{-1}\ año^{-1}$].

Para el presente estudio se utilizaron los siguientes valores de K_p : 0,1300; 0,0017 y 0,0020 [$g\ ha^{-1}\ año^{-1}$] para la aplicación del modelo.

⁷ Citado por Austrian Federal Environmental Agency, 2000.

⁸ Comunicación personal.

7.3.4. Cálculo de K_D (coeficiente de partición)

Para calcular el coeficiente de partición o distribución del cadmio, K_D , se utilizó un conjunto de datos estimados por diversos autores para una amplia variedad de suelos:

- Gerritse and van Driel (1984), en Holanda, Gran Bretaña, Francia.
- Janssen *et al.* (1995), en Holanda.
- Gray *et al.* (1999), en Nueva Zelanda.
- Lee *et al.* (1996), en Estados Unidos.
- Lambkin (1999) en Reino Unido.

Dichos datos corresponden a valores de K_D , pH y porcentaje de materia orgánica de los suelos y se agruparon en una base de datos única. Se aplicó estimación logarítmica múltiple (Microsoft Excel XP) para encontrar la ecuación de ajuste a dichos valores y calcular K_D con los valores de pH y materia orgánica (MO) de los suelos en Chile. En el (ANEXO III) se muestra la base de datos para el cálculo y el resultado de la estimación logarítmica.

La ecuación de cálculo para K_D obtenida es la siguiente ($R^2=0,80$):

$$K_D [Lkg^{-1}] = 0,037 \times 4,140^{pH} \times 1,044^{MO} \quad \text{Ecuación 10}$$

Reemplazando los valores de pH y MO se obtuvieron valores de K_D para las ocho series de suelos analizadas (Cuadro 14).

Cuadro 13. Valores calculados de K_D para ocho series de suelo Mollisol de la VI Región.

Serie	K_D [L kg ⁻¹]
Chépica	327
Cocalán	3.092
Cunaco	439
Millahue	739
San Vicente	313
Graneros	768
Malloa	726
O'Higgins	431

Estos valores señalan la proporción de cadmio adsorbido en la fase sólida del suelo respecto del cadmio en la solución suelo. Así entonces, para la serie Chépica, la razón de cadmio adsorbido en la fase sólida a cadmio en la solución suelo es de 327.

7.3.5. Cálculo de K_f (tasa anual de lixiviación de Cd)

Con los datos de K_D calculados para las ocho series de suelo consideradas se definieron tres intervalos, se eligieron los valores centrales 776, 1.703 y 2.629 [Lkg⁻¹] (Cuadro 14) y aplicando la fórmula dada en la Ecuación 7 se obtuvieron los valores para K_f .

Cuadro 14. Cálculo de K_f para la aplicación del modelo de acumulación de cadmio.

Valores F	Valores K_D^a [L kg ⁻¹]	K_f calculado [g ha ⁻¹]
0,00	776	0,00000
0,00	1.703	0,00000
0,00	2.629	0,00000
0,12	776	0,00064
0,12	1.703	0,00029
0,12	2.629	0,00019

^a Valores centrales de intervalos contruidos para K_D .

El Cuadro 15 muestra las precipitaciones de la VI Región para dos estaciones: Rancagua y San Fernando, monto acumulado a junio del año 2002 y promedio

histórico del periodo 1961-1990. Para la estimación del exceso de precipitación F se usó el promedio histórico de la Región.

Cuadro 15. Precipitaciones VI Región.

Estación	Precipitación anual (P) Acumulado a junio de 2002	Precipitación anual (P) Promedio histórico (1961-1990)
	[m]	[m]
Rancagua	0,37100	0,34040
San Fernando	0,50660	0,59170
Promedio Región	0,43880	0,46605

El modelo para calcular la acumulación de cadmio en la capa arable de los suelos ha sido aplicado en varios países europeos, usando diversos valores de F (exceso de precipitación anual): 0,2 [m año⁻¹] en Bélgica; 0,225 [m año⁻¹] en Reino Unido; 0,4, 0,3 y 0,2 [m año⁻¹] para Noruega y valores entre 0,39 y 0,41 [m año⁻¹] para Dinamarca (Nicholson, 1999; Amundsen *et al.*, 2000; Guns y Pussemier, 2000; Hansen, 2000). En el caso de Chile, utilizando la metodología de Dinamarca se obtienen valores negativos para F (Cuadro 17). Por otro lado, considerando una tasa de infiltración f_{inf} de 0,25 [m año⁻¹] para un país de clima templado (BFDE, 1999; ERM, 2000; De Meeûs, 2002) se obtiene un valor de F de 0,12 [m año⁻¹] (Ecuación 8). Considerando la importancia del cálculo del exceso de precipitación anual en fenómenos de lixiviación que podrían estar afectando la movilidad del cadmio en el suelo se usaron dos valores de F : 0 y 0,12 [m año⁻¹] para la aplicación del modelo. El valor 0 significa que con el déficit de precipitación no se produciría lixiviación del cadmio hacia capas más profundas del suelo por efecto de las precipitaciones, asumiendo que el riego cubre las necesidades mínimas del cultivo.

Cuadro 16. Cálculo del exceso de precipitación anual (F), VI Región.

Precipitación anual (P) Promedio histórico (1961- 1990)	Tipo de maíz	Evapotranspiración del cultivo de maíz, localidad de Graneros	Exceso de precipitación anual F
[m]	[días]	[m]	[m]
0,46605	180	0,8796	-0,41355
0,46605	140	0,7473	-0,28125
0,46605	110	0,5546	-0,08855

7.4. Proyección del cadmio en el tiempo en la capa arable de los suelos

La acumulación de cadmio en la capa arable de los suelos se expresa mediante la Ecuación 1. A continuación se describe en detalle, los parámetros usados para el cálculo, los escenarios construidos y el análisis de la proyección del cadmio en el tiempo en la capa arable de los suelos.

7.4.1. Resumen de parámetros usados

El Cuadro 18 resume los valores de los parámetros usados para la construcción de escenarios y aplicación del modelo (Ecuación 1) a las condiciones del presente estudio.

Cuadro 17. Parámetros usados en la aplicación del modelo a las condiciones del estudio.

Parámetro	Símbolo	Valores	Unidad	Observación/Referencia
Tasa de entrada vía depositación atmosférica	K_{dep}	0	g ha ⁻¹	Asumido por el estudio
Tasa de entrada anual vía lodos/estiércol	K_e	0	g ha ⁻¹	Asumido por el estudio
Tasa de entrada vía fertilización ^a	K_{fer}	0,557; 3,666; 12,071	g ha ⁻¹	Valores calculados
Tasa de entrada anual de Cd	K_e	0,557; 3,666; 12,071	g ha ⁻¹	Valores calculados
Tasa de lixiviación de Cd	K_l	0; 0,00064; 0,00029; 0,00019	g ha ⁻¹	Valores calculados
Tasa de extracción de Cd por las plantas (maíz)	K_p	0,1300; 0,0017; 0,0020	g ha ⁻¹	Valores calculados
Exceso de precipitación anual	F	0; 0,12	m	Valores calculados
Densidad aparente del suelo	D_a	1.201	kg m ⁻³	Valor calculado
Profundidad de la capa arable	p	0,2 ^b	m	Asumido por el estudio
Contenido promedio de Cd del suelo	$Cd_s(0)$	0,110; 0,345	mg kg ⁻¹	Valenzuela, 2001; González, 2002 ^c .
pH del suelo	pH	6,2 - 7,9	Adimensional	Rango de valores para ocho series, CIREN, 1996.
Materia orgánica del suelo	MO	2,5 - 5,7	%	Rango de valores para ocho series, CIREN, 1996.
Coefficiente de partición o distribución	K_D	313 – 3.092	L kg ⁻¹	Rango de valores calculados
Tiempo de proyección	t	50	Años	Asumido por el estudio

^a Sólo se considerará el aporte de cadmio por fertilizantes fosfatados, aún cuando podría existir un aporte de cadmio en la aplicación de fertilizantes nitrogenados (0,05 [mg kg⁻¹], Alloway, 1995).

^b Se considera capa arable de 0 a 20 [cm] por la escasa movilidad del P en el suelo.

^c Comunicación personal.

7.4.2. Escenarios

De acuerdo a los datos del Cuadro 18 se construyeron 48 escenarios para la estimación de la concentración de cadmio en 50 años en la capa arable de los suelos. Se utilizaron tres valores de K_p para el cultivo del maíz, dos valores de $Cd_s(0)$ para los suelos de la VI Región, tres valores de K_e que señalan la entrada de cadmio a los suelos aportada por los fertilizantes fosfatados y cuatro valores para K_l . En el Cuadro

18 se presentan los escenarios de proyección en el tiempo del cadmio en los suelos seleccionados.

Cuadro 18. Escenarios de proyección en el tiempo, de la concentración de cadmio en los suelos seleccionados.

Escenarios	K_f [g ha ⁻¹]	K_p [g ha ⁻¹]	K_e [g ha ⁻¹]	$Cd_s(0)$ [mg kg ⁻¹]	$Cd_s(50)$ [mg kg ⁻¹]	Variación Cd en 50 años [%]	$Cd_s(EE)$ [mg kg ⁻¹]
1	0,00000	0,0017	0,557	0,110	0,11215	1,96	0,136406
2	0,00019	0,0017	0,557	0,110	0,11114	1,04	0,122689
3	0,00029	0,0017	0,557	0,110	0,11060	0,55	0,116326
4	0,00064	0,0017	0,557	0,110	0,10878	-1,11	0,098949
5	0,00000	0,0017	3,666	0,110	0,17419	58,36	0,897781
6	0,00019	0,0017	3,666	0,110	0,17290	57,18	0,807504
7	0,00029	0,0017	3,666	0,110	0,17220	56,54	0,765622
8	0,00064	0,0017	3,666	0,110	0,16985	54,41	0,651253
9	0,00000	0,0017	12,071	0,110	0,34192	210,84	2,956115
10	0,00019	0,0017	12,071	0,110	0,33984	208,95	2,658859
11	0,00029	0,0017	12,071	0,110	0,33872	207,93	2,520956
12	0,00064	0,0017	12,071	0,110	0,33494	204,49	2,144374
13	0,00000	0,0020	0,557	0,345	0,32320	-6,32	0,115945
14	0,00019	0,0020	0,557	0,345	0,32020	-7,19	0,105883
15	0,00029	0,0020	0,557	0,345	0,31858	-7,66	0,101110
16	0,00064	0,0020	0,557	0,345	0,31315	-9,23	0,087720
17	0,00000	0,0020	3,666	0,345	0,38479	11,53	0,763114
18	0,00019	0,0020	3,666	0,345	0,38150	10,58	0,696890
19	0,00029	0,0020	3,666	0,345	0,37972	10,06	0,665473
20	0,00064	0,0020	3,666	0,345	0,37377	8,34	0,577346
21	0,00000	0,0020	12,071	0,345	0,55128	59,79	2,512698
22	0,00019	0,0020	12,071	0,345	0,54722	58,61	2,294641

(continúa).

Cuadro 18. (Continuación)

Escenarios	K_f [g ha ⁻¹]	K_p [g ha ⁻¹]	K_e [g ha ⁻¹]	$Cd_s(0)$ [mg kg ⁻¹]	$Cd_s(50)$ [mg kg ⁻¹]	Variación Cd en 50 años [%]	$Cd_s(EE)$ [mg kg ⁻¹]
------------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	-------------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------

23	0,00029	0,0020	12,071	0,345	0,54502	57,98	2,191197
24	0,00064	0,0020	12,071	0,345	0,53766	55,84	1,901020
25	0,00000	0,1300	0,557	0,110	0,00195	-98,23	0,001784
26	0,00019	0,1300	0,557	0,110	0,00194	-98,23	0,001781
27	0,00029	0,1300	0,557	0,110	0,00194	-98,24	0,001780
28	0,00064	0,1300	0,557	0,110	0,00193	-98,24	0,001775
29	0,00000	0,1300	3,666	0,110	0,01189	-89,19	0,011740
30	0,00019	0,1300	3,666	0,110	0,01187	-89,21	0,011723
31	0,00029	0,1300	3,666	0,110	0,01186	-89,22	0,011714
32	0,00064	0,1300	3,666	0,110	0,01183	-89,25	0,011682
33	0,00000	0,1300	12,071	0,110	0,03876	-64,76	0,038657
34	0,00019	0,1300	12,071	0,110	0,03871	-64,81	0,038600
35	0,00029	0,1300	12,071	0,110	0,03868	-64,84	0,038570
36	0,00064	0,1300	12,071	0,110	0,03857	-64,94	0,038466
37	0,00000	0,1300	0,557	0,345	0,00230	-99,33	0,001784
38	0,00019	0,1300	0,557	0,345	0,00229	-99,34	0,001781
39	0,00029	0,1300	0,557	0,345	0,00229	-99,34	0,001780
40	0,00064	0,1300	0,557	0,345	0,00227	-99,34	0,001775
41	0,00000	0,1300	3,666	0,345	0,01224	-96,45	0,011740
42	0,00019	0,1300	3,666	0,345	0,01222	-96,46	0,011723
43	0,00029	0,1300	3,666	0,345	0,01221	-96,46	0,011714
44	0,00064	0,1300	3,666	0,345	0,01217	-96,47	0,011682
45	0,00000	0,1300	12,071	0,345	0,03912	-88,66	0,038657
46	0,00019	0,1300	12,071	0,345	0,03906	-88,68	0,038600
47	0,00029	0,1300	12,071	0,345	0,03902	-88,69	0,038570
48	0,00064	0,1300	12,071	0,345	0,03891	-88,72	0,038466

De acuerdo a los escenarios presentados en el Cuadro 18 las máximas variaciones positivas de cadmio en 50 años se producen para el valor más bajo de K_p (0,0017 [g ha⁻¹]) y el máximo valor de K_e (12,071 [g ha⁻¹]), es decir, cuando menos extrae el cultivo y mayor es la entrada de cadmio al suelo, cuando la concentración inicial de cadmio en el suelo es de 0,11 [mg kg⁻¹]. El máximo aumento de cadmio se produce en el Escenario 9, es decir, cuando la tasa de lixiviación del suelo es cero, la tasa de extracción de cadmio por el cultivo es la más baja y el aporte de cadmio al suelo es el más alto. Para este escenario se produce un aumento de cadmio de 211% en 50 años, alcanzando una concentración de 0,34 [mg kg⁻¹] de cadmio en el suelo. El cadmio alcanzaría una concentración constante de 2,96 [mg kg⁻¹] en un horizonte de tiempo cercano a los 6.000 años.

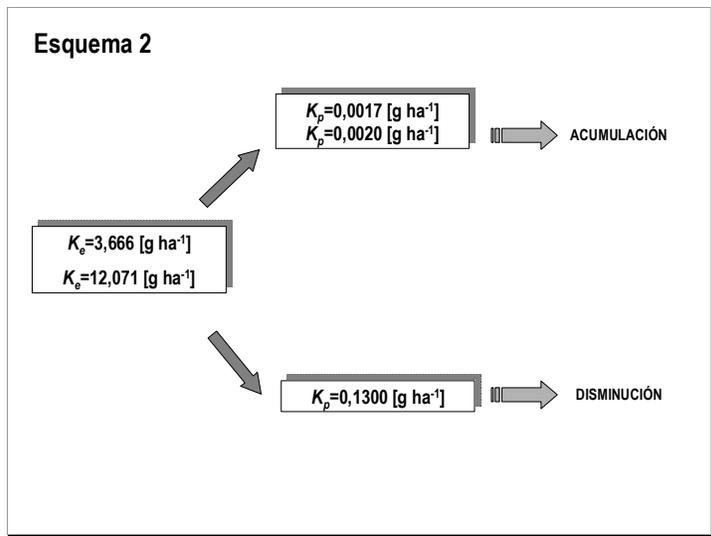
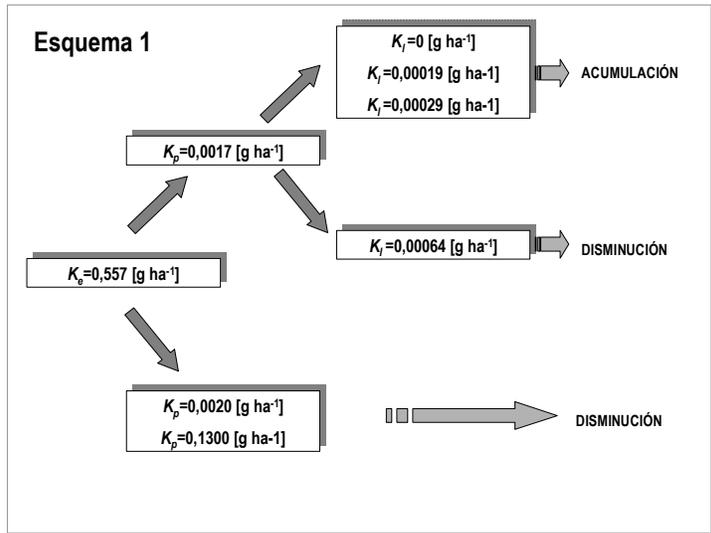
7.4.3. Esquemas de análisis

Los siguientes esquemas (Esquema 1 al 8) resumen el efecto de los distintos escenarios construidos para calcular la concentración de cadmio en la capa arable de los suelos, en 50 años.

Esquema 1: Para $K_e=0,557$ [g ha^{-1}] se produce una tendencia general del cadmio a aumentar (escenarios 1, 2 y 3) cuando la tasa de extracción de cadmio por las plantas es la más baja ($0,0017$ [g ha^{-1}]) y la tasa de lixiviación del cadmio del suelo es igual o inferior a $0,00029$ [g ha^{-1}]. Por el contrario, cuando la tasa de lixiviación es $0,00064$ [g ha^{-1}], el cadmio disminuye (escenario 4).

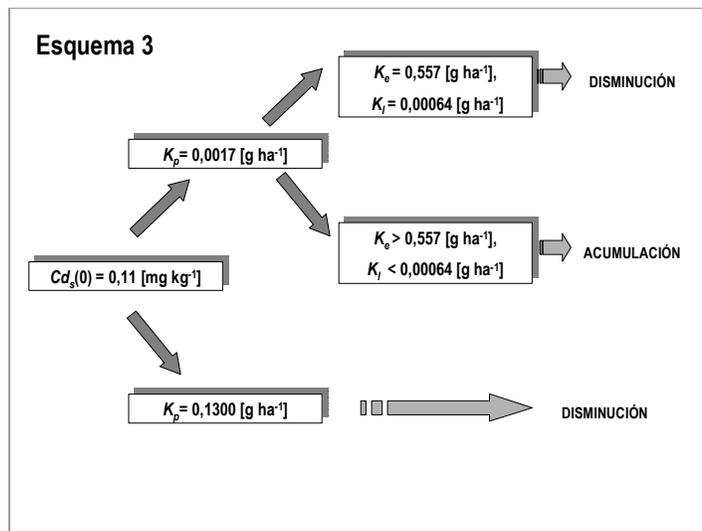
Cuando la tasa de extracción de cadmio del cultivo K_p aumenta a $0,0020$ y $0,1300$ [g ha^{-1}] se produce una tendencia a la disminución de la concentración de cadmio en el suelo, independiente de la tasa de lixiviación de cadmio del suelo (escenarios 13 al 16, 25 al 28 y 37 al 40).

Esquema 2: Para los escenarios con una tasa de entrada anual de cadmio al suelo de $3,666$ y $12,071$ [g ha^{-1}], el Cd aportado por los fertilizantes fosfatados aplicados al cultivo de maíz, se produce una disminución de cadmio en el tiempo para la mayor tasa de extracción del cultivo, $K_p=0,1300$ [g ha^{-1}], para ambas concentraciones iniciales de Cd en el suelo (escenarios 29 al 36 y 41 al 48). Contrariamente la concentración de cadmio en el suelo aumenta con tasas de extracción del cultivo más bajas ($0,0017$ y $0,0020$ [g ha^{-1}]) (escenarios 5 al 12 y 17 al 24).



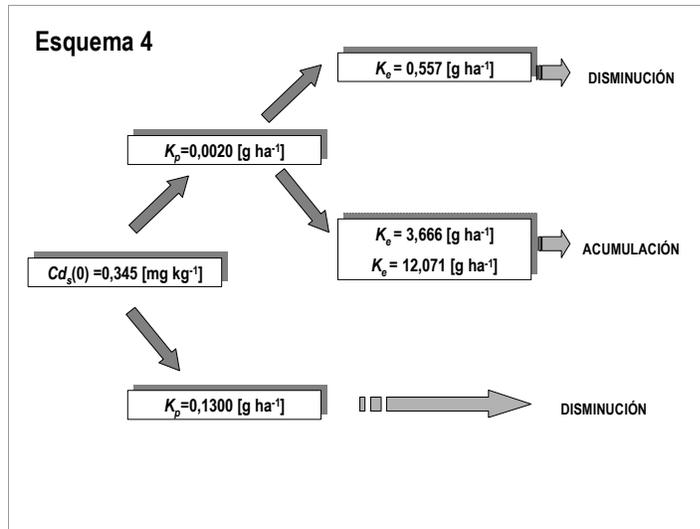
Esquema 3: Para una concentración de cadmio en el suelo de $0,11 \text{ [mg kg}^{-1}\text{]}$ se produce una tendencia general a la acumulación del cadmio en el suelo (escenarios 1 al 3 y 5 al 12) cuando $K_p=0,0017 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$ excepto para el escenario 4 en que disminuye.

Cuando K_p aumenta a $0,1300 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$ el cadmio disminuye en todos los casos restantes (escenarios 25 al 36).



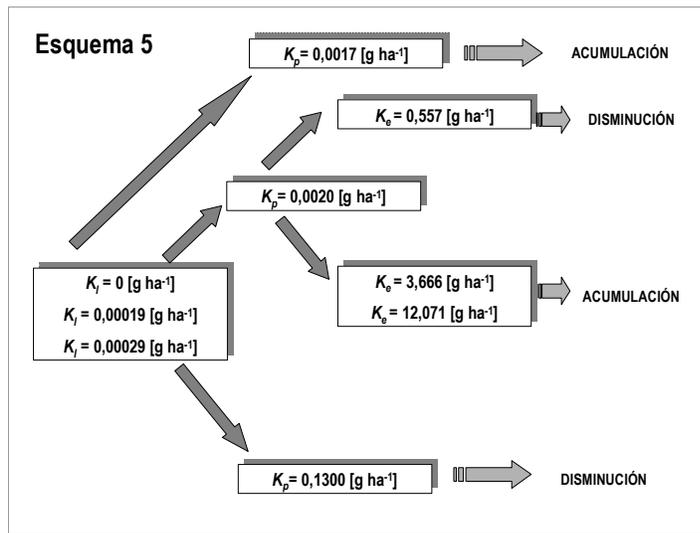
Esquema 4: Para una concentración de cadmio mayor en el suelo ($0,345 \text{ [mg kg}^{-1}\text{]}$), el metal disminuye para la tasa de extracción del cultivo mayor, $K_p=0,1300 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$ (escenarios 37 al 48); asimismo, disminuye cuando tasa de entrada de cadmio al suelo es menor ($K_e=0,557 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$) y la tasa de extracción del cultivo es de $0,0020 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$ (escenarios 13 al 16).

Contrariamente, cuando K_e aumenta a $3,666$ y $12,071 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$ el cadmio tiene una tendencia a la acumulación en el suelo para $K_e = 0,345 \text{ [mg kg}^{-1}\text{]}$ y $K_p = 0,0020 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$ (escenarios 17 al 24).



Esquema 5: Para las tasas de lixiviación del cadmio entre 0 y 0,00029 [g ha⁻¹] se produce una disminución del cadmio para todos los escenarios con la mayor tasa de extracción de cadmio por el cultivo ($K_p=0,1300$ [g ha⁻¹]) (escenarios 25 al 27, 29 al 31, 33 al 35, 37 al 39, 41 al 43 y 45 al 47) para ambas concentraciones iniciales de cadmio en el suelo. Asimismo ocurre para los escenarios 13 al 15 cuando se combina una tasa de extracción del cultivo más baja (0,0020 [g ha⁻¹]) y una tasa de entrada de cadmio al suelo baja (0,557[g ha⁻¹]).

Contrariamente, cuando el K_p es 0,0017 [g ha⁻¹], la tendencia del cadmio en el suelo es a la acumulación (escenarios 1 al 3, 5 al 7 y 9 al 11). Asimismo, para los casos en que se combina $K_p=0,0020$ [g ha⁻¹] y $K_e=3,666$ ó 12,071 [g ha⁻¹] (escenarios 17 al 19 y 21 al 23).



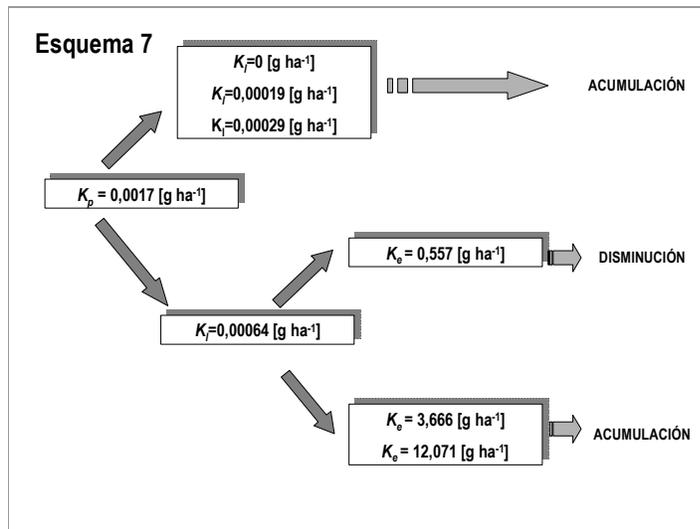
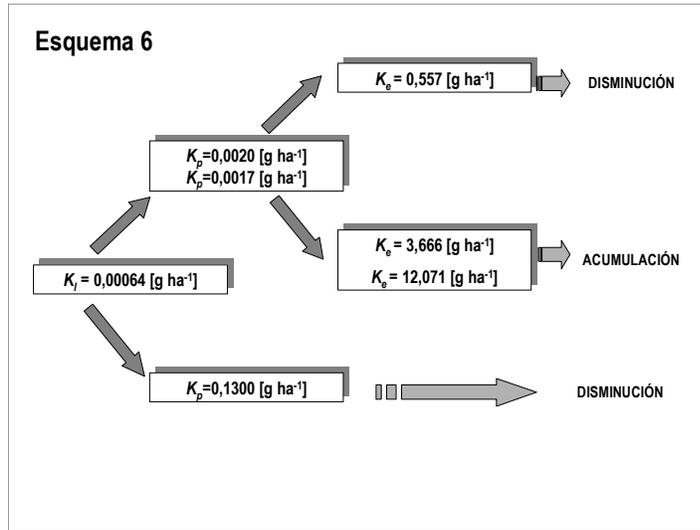
Esquema 6: Al igual que el caso anterior, cuando la tasa de lixiviación aumenta a $0,00064 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$ se produce una disminución de cadmio en 50 años a la mayor tasa de extracción del cultivo ($K_p=0,1300 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$) (escenarios 28, 32, 36, 40, 44, y 48). Esto ocurre también para tasas de extracción K_p más bajas ($0,0017$ y $0,0020 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$), cuando la tasa de entrada de cadmio al suelo por fertilizantes fosfatados es la menor ($0,557 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$) (escenarios 4 y 16).

Contrariamente, el cadmio se acumula en el suelo cuando la tasa de lixiviación es la más alta ($0,00064 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$), el aporte de cadmio al suelo por fertilizantes fosfatados es mayor a $0,557 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$ y la tasa de extracción del cultivo es menor a $0,1300 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$ (escenarios 8, 12, 20 y 24).

Esquema 7: Considerando la tasa de extracción del cultivo más baja el comportamiento del cadmio varía dependiendo de la tasa de lixiviación del cadmio del suelo, cuando ésta es de $0,00029 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$ o menor se produce acumulación de cadmio (escenarios 1 al 3, 5 al 7 y 9 al 11).

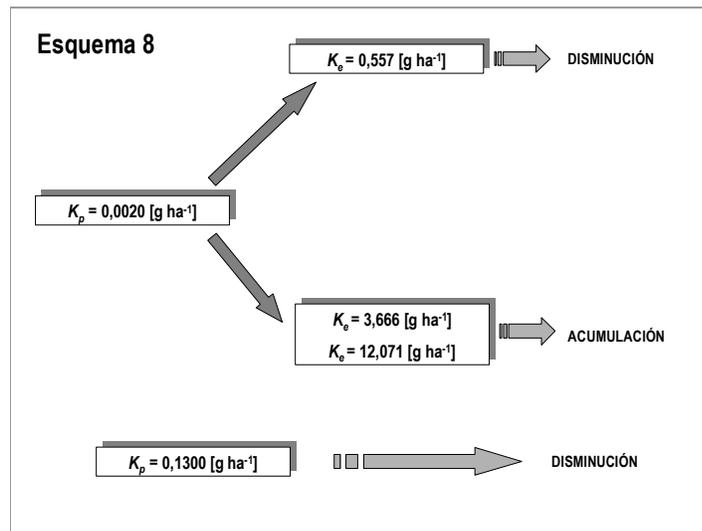
Para la mayor tasa de lixiviación ($0,00064 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$) y la menor tasa de entrada de cadmio al suelo ($0,557 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$) se produce una disminución del cadmio (escenario

4). Contrariamente, para los valores de K_e más altos (3,666 y 12,071 [g ha⁻¹]) el cadmio se acumula en el suelo (escenarios 8 y 12).



Esquema 8: Para una tasa de extracción de cadmio del cultivo K_p de 0,0020 [g ha⁻¹]), el cadmio disminuye en el suelo cuando la tasa de entrada del metal al suelo tiene el menor valor (escenarios 13 al 16) y se acumula para los valores de K_e de 3,666 y 12,071 [g ha⁻¹] (escenarios 17 al 24).

Como se señaló anteriormente, para la mayor tasa de extracción de cadmio del cultivo (Esquema 5 y 6) se produce una disminución de cadmio en el tiempo, para ambas concentraciones de cadmio del suelo (escenarios 25 al 48).



7.4.4. Curvas de proyección

Las curvas de proyección del cadmio en el suelo se presentan desde la Figura 18 a la Figura 25. Los escenarios fueron agrupados en ocho figuras con seis curvas de proyección, según los valores de K_i , K_p y $Cd_s(0)$.

Las figuras señalan claramente una tendencia a la disminución del cadmio en el suelo cuando la tasa de extracción del metal del cultivo alcanza el mayor valor.

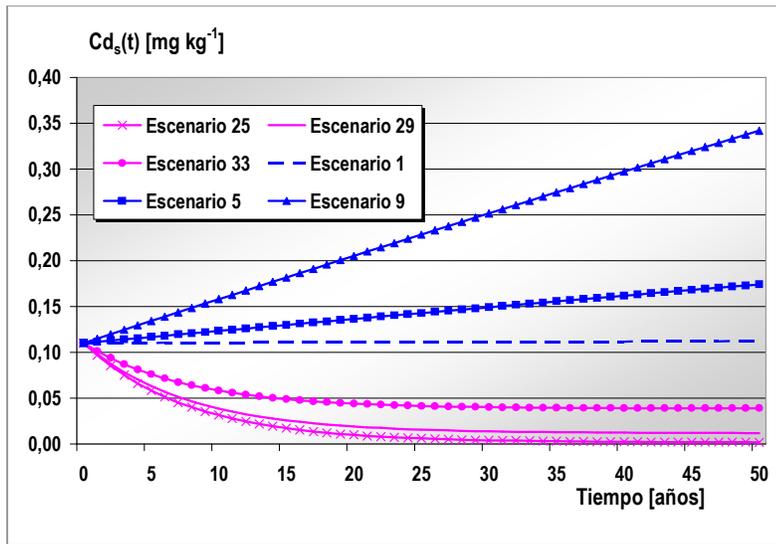


Figura 18. Proyección del Cd en el tiempo para $K_i = 0\ [g\ ha^{-1}]$, $Cd_s(0) = 0,11\ [mg\ kg^{-1}]$, $K_p = 0,0017$ y $0,1300\ [g\ ha^{-1}]$

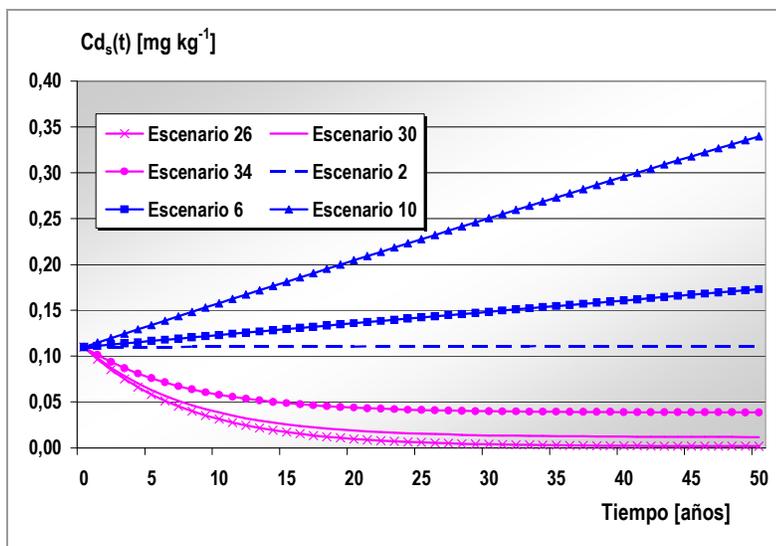


Figura 19. Proyección del Cd en el tiempo para $K_i = 0,00015\ [g\ ha^{-1}]$, $Cd_s(0) = 0,11\ [mg\ kg^{-1}]$, $K_p = 0,0017$ y $0,1300\ [g\ ha^{-1}]$

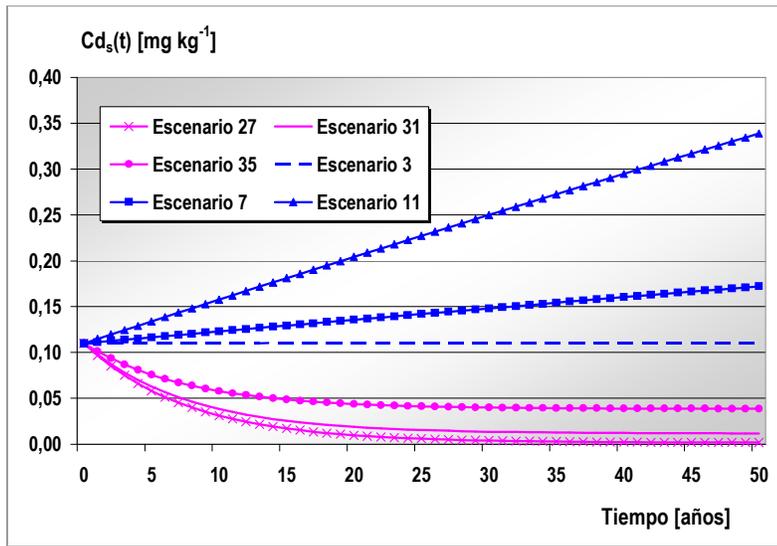


Figura 20. Proyección del Cd en el tiempo para $K_f = 0,00024\ [g\ ha^{-1}]$, $Cd_s(0) = 0,11\ [mg\ kg^{-1}]$, $K_p = 0,0017$ y $0,1300\ [g\ ha^{-1}]$

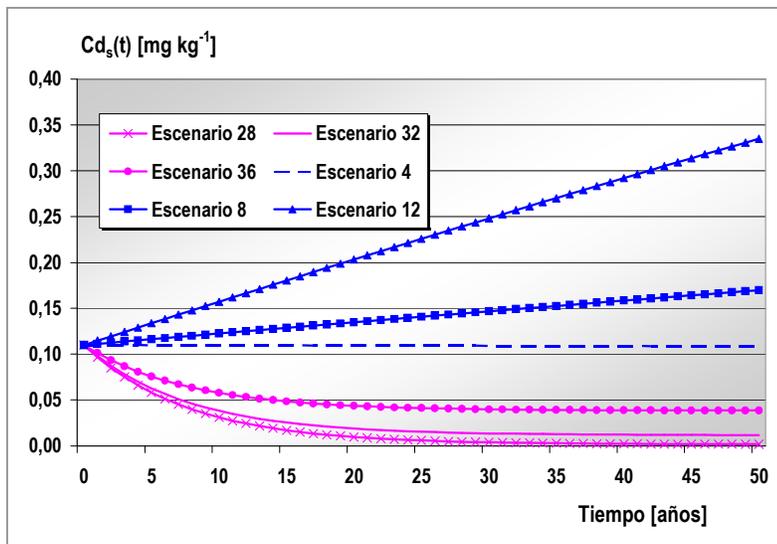


Figura 21. Proyección del Cd en el tiempo para $K_f = 0,00051\ [g\ ha^{-1}]$, $Cd_s(0) = 0,11\ [mg\ kg^{-1}]$, $K_p = 0,0017$ y $0,1300\ [g\ ha^{-1}]$

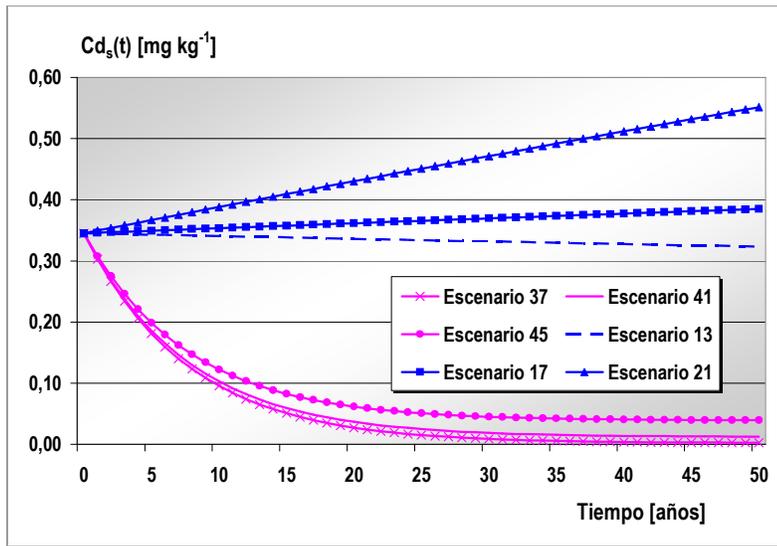


Figura 22. Proyección del Cd en el tiempo para $K_l = 0$ [g ha^{-1}], $Cd_s(0) = 0,345$ [mg kg^{-1}], $K_p = 0,0020$ y $0,1300$ [g ha^{-1}]

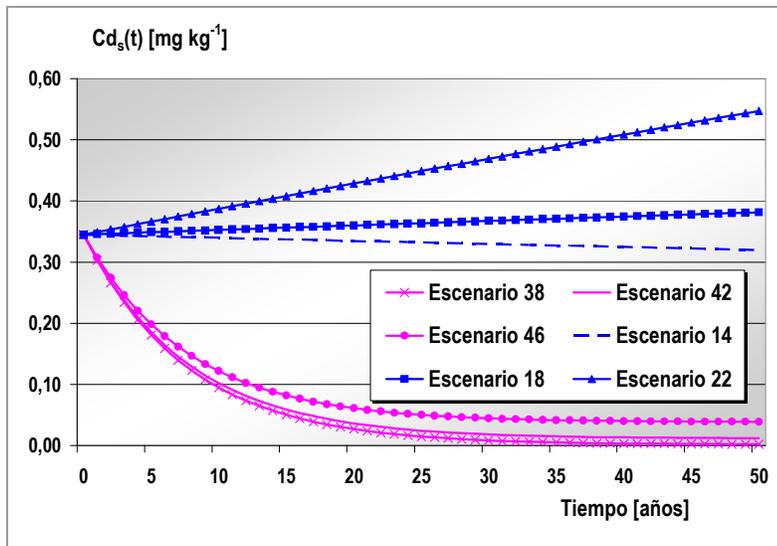


Figura 23. Proyección del Cd en el tiempo para $K_l = 0,00015$ [g ha^{-1}], $Cd_s(0) = 0,345$ [mg kg^{-1}], $K_p = 0,0020$ y $0,1300$ [g ha^{-1}]

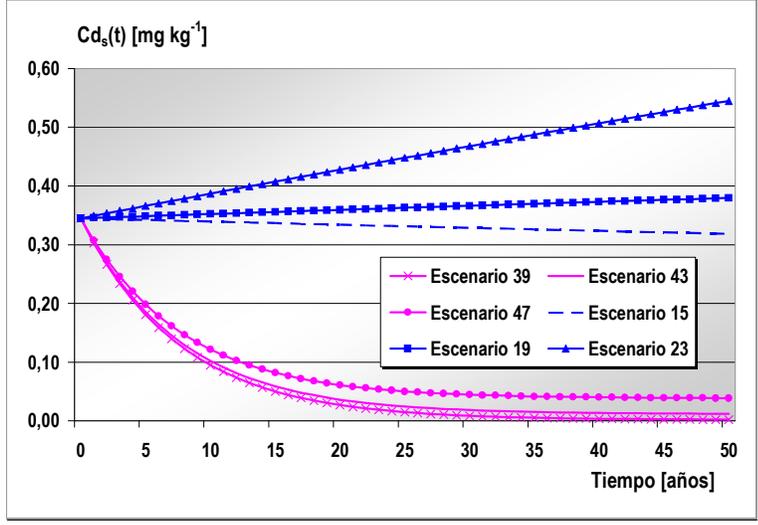


Figura 24. Proyección del Cd en el tiempo para $K_i = 0,00024 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$, $Cd_s(0) = 0,345 \text{ [mg kg}^{-1}\text{]}$, $K_p = 0,0020 \text{ y } 0,1300 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$

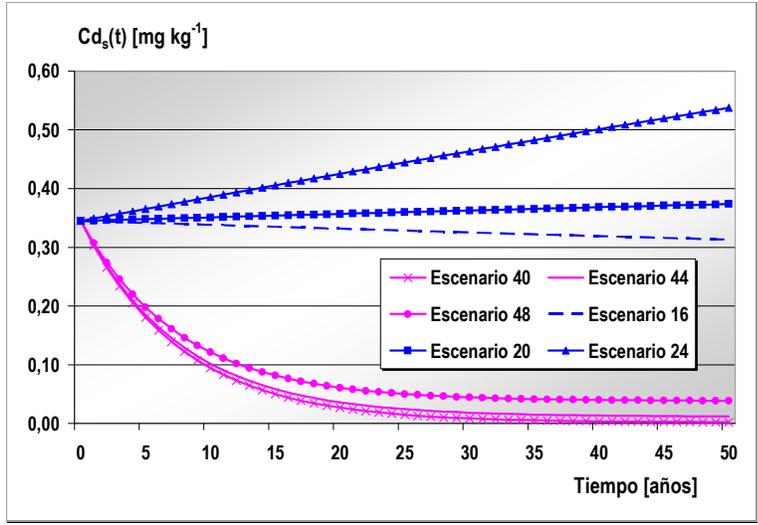


Figura 25. Proyección del Cd en el tiempo para $K_i = 0,00051 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$, $Cd_s(0) = 0,345 \text{ [mg kg}^{-1}\text{]}$, $K_p = 0,0020 \text{ y } 0,1300 \text{ [g ha}^{-1}\text{]}$

7.4.5. Limitaciones de la investigación

La estimación del coeficiente K_D es un aspecto crítico para la aplicación del modelo y la proyección de la acumulación de cadmio en el tiempo. Esto debido a que las proyecciones de las concentraciones de cadmio en el tiempo son muy sensibles al valor del K_D según lo avalan BFDE (1999) y De Meeûs *et al.* (2001).

En la industria fertilizante, se considera que el cadmio sólo puede provenir de la fosforita y no de otros componentes utilizados en la fabricación de los fertilizantes fosfatados. Asimismo, no se considera el aporte de cadmio de la fertilización nitrogenada.

El modelo que se utilizó no considera la biomasa edáfica del suelo y sus interacciones con la acumulación de cadmio en el suelo.

La proyección cuantitativa de esta investigación sólo es generalizable a condiciones edafoclimáticas similares y sólo para el cultivo de maíz.

El cultivo del maíz se trata en forma general, no diferenciando especies o variedades ya que la información disponible, en general, no hace esta diferencia.

7.5. Discusión

Según los escenarios presentados y analizados, la hipótesis se cumple sólo en un 40% de los casos presentados, aumentando la concentración de cadmio respecto del valor inicial en el suelo, en un periodo de 50 años.

Tal como se señaló anteriormente, los resultados muestran una tendencia a la disminución del cadmio en el suelo. Esto es particularmente evidente cuando la tasa de extracción del metal del cultivo alcanza el valor más alto. Si la tasa de extracción del cultivo tiene valores más bajos, la acumulación del cadmio dependerá de su tasa de lixiviación del suelo o de la entrada de cadmio desde los fertilizantes fosfatados al suelo.

En general, se debe tener presente que la disminución de cadmio en el tiempo se producirá cuando la tasa de extracción del cultivo es alta, asimismo, cuando la tasa de lixiviación del metal aumenta, desplazándolo desde el horizonte más superficial

hacia capas más profundas del suelo. Sin embargo, si la tasa de entrada de cadmio al suelo por aporte de la fertilización fosfatada supera la tasa de lixiviación desde el suelo así como la tasa de extracción por el cultivo, el cadmio puede acumularse en el tiempo.

7.5.1. Lixiviación del cadmio del suelo

Matemáticamente, la Ecuación 5, referida al cálculo de K_D , señala que si la concentración de cadmio de la solución suelo Cd_{ss} [$\mu\text{g L}^{-1}$] aumenta, K_D tendría un valor más bajo y, por lo tanto, la tasa de lixiviación de cadmio del suelo (K_i) aumentaría, para las condiciones dadas (valores de F , D_a y p fijos) (Ecuación 6).

Analizando la problemática desde el punto de vista de la conservación del suelo, interesa que la tasa de extracción del cultivo y la tasa de lixiviación de cadmio del suelo sean tan altas como para que se produzca una disminución o no acumulación de cadmio en el suelo, aplicando el modelo de acumulación. Sin embargo, se debe tener presente que el cadmio lixiviado es transportado hacia capas más profundas del suelo, pudiendo alcanzar los recursos de agua subterráneos y contaminarlos, y, por otro lado, el cadmio extraído por el cultivo puede pasar al ser humano a través del consumo de éste (EPA-United States, 1999a; AUSTRIAN FEDERAL ENVIRONMENTAL AGENCY, 2000; ERM, 2000; de Meeûs *et al.*, 2002).

Se hace necesario analizar las vías de lixiviación del cadmio y su entrada a la malla trófica para evaluar posibles riesgos a la salud humana. De hecho el modelo aplicado es parte de un modelo general para evaluar el riesgo del cadmio en la salud del ser humano en el que es posible investigar y cuantificar sus efectos (de Meeûs *et al.*, 2002, Cupit *et al.*, 2002). En esta investigación sólo se ha abordado la problemática desde el punto de vista del recurso suelo y de la acumulación del cadmio en éste.

7.5.2. Efecto del pH del suelo

Las ecuaciones señalan que si el pH aumenta, el coeficiente de partición, K_D , aumenta (Ecuación 10) y baja la tasa de lixiviación de cadmio en el suelo, K_i , (Ecuación 7), y por lo tanto, el metal se acumula en el suelo. Esto ocurre debido a que si el pH sube aumentan las especies menos solubles del cadmio las que quedan atrapadas en

la fracción sólida del suelo. Asimismo disminuye el cadmio soluble que es extraído por los cultivos. Esto implica que la corrección del pH del suelo sería un aspecto importante a considerar en la gestión ambiental para prevenir la extracción de cadmio por el cultivo o que el metal pase a capas más profundas del suelo pasando a cursos de agua subterráneos (WHO, 1992a). Sin embargo, las correcciones de pH deben hacerse a valores tales que un determinado cultivo pueda desarrollarse sin alterar su productividad (Jinadasa *et al.*, 1997).

Además, la tasa de lixiviación del suelo K_f aumenta si el exceso de precipitación F , traducido en escurrimiento superficial, aumenta. Esto implica que la acumulación del cadmio en el suelo estará asociada a las precipitaciones de una determinada localidad. Asimismo, si la cantidad de agua que infiltra el suelo aumenta la lixiviación de cadmio desde él aumentará (AUSTRIAN FEDERAL ENVIRONMENTAL AGENCY, 2000).

7.5.3. Extracción por el cultivo

Por otro lado, entre los escenarios analizados hay casos donde se produce una disminución del cadmio en el suelo cuando la tasa de extracción desde el cultivo es más alta. En estos casos se debe tener presente que el metal queda en el cultivo e ingresa a la malla trófica pudiendo afectar al ser humano y otros seres vivos (WHO, 1992b). En este caso se hace necesario investigar sobre la tasa de extracción de cadmio u otros metales pesados para los diferentes cultivos según sus partes comestibles para hacer una estimación más exacta de los posibles riesgos a la salud (Jinadasa *et al.*, 1997). En el caso del maíz las menores concentraciones de cadmio están en los granos, consumidos por el ser humano y los animales, sin embargo, otras partes de la planta son dadas como alimento a animales o se incorporan al suelo llegando así por otras vías al ser humano. En algunos estudios de maíz (con cultivos hidropónicos) se ha encontrado mayor concentración de cadmio en las raíces del cultivo respecto de sus brotes (WHO, 1992b).

7.5.4. Límites máximos de cadmio

De acuerdo a límites máximos establecidos por los países de la UE (Cuadro 3) para suelos agrícolas, las concentraciones de cadmio proyectadas para las series de

suelos de la VI Región, en 50 años, son muy inferiores a dichos límites salvo en los escenarios 21 al 24 (Cuadro 18). En estos escenarios se sobrepasa el límite máximo establecido por Dinamarca, Finlandia y Holanda de 0,5 [mg kg⁻¹ suelo seco] (menor valor establecido en la Unión Europea) (Oosterhuis *et al.*, 2000). Esto se produce cuando se combina la mayor entrada de cadmio por fertilizantes, 12,071 [g ha⁻¹], con una concentración inicial de cadmio en el suelo de 0,345 [mg kg⁻¹]. Es decir, en 50 años, con una aplicación constante de la máxima tasa de fertilización promedio recomendable para maíz (217,5 [kg ha⁻¹]) se tendrá un contenido de cadmio en el suelo en el rango de 0,540-0,551 [g ha⁻¹] (escenarios 21 al 24), considerando la aplicación de SFT mexicano con un contenido máximo de Cd de 55,5 [mg kg⁻¹ fertilizante]. En estos escenarios y considerando este límite máximo, los suelos agrícolas se considerarían contaminados en un plazo de 38 a 40 años, cuando se supera este valor.

Por otro lado, analizando los límites establecidos para la entrada anual de cadmio a los suelos, los países de la UE han establecido límites que varían entre 0,15 y 150 [g ha⁻¹], el valor mínimo ha sido establecido considerando la aplicación de lodos residuales a los suelos en el Reino Unido (Oosterhuis *et al.*, 2000). En el caso de Chile, según los datos investigados y utilizados en el modelo, la tasa anual de entrada de cadmio varía entre 0,557 y 12,071 [g ha⁻¹], con un valor promedio de 3,666 [g ha⁻¹] (Valenzuela, 2001). El valor máximo para Chile, 12,071 [g ha⁻¹], supera los límites máximos establecidos por el Reino Unido, Suecia, Finlandia y Austria (Oosterhuis *et al.*, 2000). Sólo siete países de la UE han establecido límites para la entrada anual de cadmio a los suelos agrícolas. Bélgica y Luxemburgo han impuesto el límite de 150 [g ha⁻¹] debido a las concentraciones de cadmio de sus suelos, particularmente debido al aporte de los fertilizantes (Oosterhuis *et al.*, 2000). De hecho en Bélgica, el contenido de cadmio de los suelos es 3,5 veces superior a los niveles promedio internacionales (ERM, 1999).

Los valores límites de cadmio aceptados para los fertilizantes fosfatados en los países de la UE y Japón varían entre 40,0 y 343,5 [mg kg⁻¹ de P] (Cuadro 3) (Roberts, 1996; Oosterhuis *et al.*, 2000). En el caso de Chile los fertilizantes que están siendo ingresados al país tienen una concentración que varían entre 0,002 y 267 [mg kg⁻¹ de P] (Cuadro 11). En la legislación chilena, como se planteó anteriormente y como

afirma Valenzuela (2001), no se hace referencia específica al contenido de cadmio en los fertilizantes, o algún otro elemento tóxico y se utiliza una terminología ambigua (por ejemplo “impurezas”) haciendo difícil la fiscalización (Decreto Ley 3.557).

7.5.5. Proyección del cadmio en 50 años

En general, la proyección a 50 años indica que el cadmio no sería un tema de preocupación en el ámbito de la contaminación de suelos por el uso de fertilizantes fosfatados en la VI Región de Chile. Esto, probablemente debido a que las características climáticas (temperatura, precipitación, etc.) donde se localizan las ocho series de suelo estudiadas, condicionarían la tasa de lixiviación del cadmio, el pH, el contenido de materia orgánica y la densidad aparente de los suelos (WHO, 1992b; ERM, 2000).

Cabe hacer notar que los escenarios 3 y 4 (Cuadro 18) donde la variación de cadmio en el tiempo es cercana a cero (0,55% y -1,1% en 50 años, respectivamente), tienen los mismos valores para K_p , K_e y $Cd_s(0)$ (0,0017 [g ha⁻¹], 0,557 [g ha⁻¹] y 0,11 [mg kg⁻¹], respectivamente). El cadmio variará dependiendo del cambio en el valor de K_f desde 0,00029 a 0,00064 [g ha⁻¹]. Este aspecto es relevante considerando que la lixiviación del cadmio del suelo dependerá del exceso de precipitación local y que este factor puede manejarse con el riego. Es esperable que con riegos que produzcan el mismo efecto que el exceso de precipitación o una alta tasa de infiltración en el suelo (Ecuación 8), el cadmio se lixivie más rápidamente desde la capa arable hacia capas más profundas (Nicholson, 1999; Amundsen *et al.*, 2000; ERM, 2000; Guns y Pussemier, 2000; Hansen, 2000; de Meeûs *et al.*, 2002).

En los escenarios 21 al 24 se estarían contaminando los suelos de la VI Región (para las series consideradas) debido a que se sobrepasan los valores límites de cadmio usados como referencia, con un horizonte de 50 años. En estos casos se ha considerado el uso de fertilizante fosfatado con la mayor concentración de cadmio, superfosfato importado desde México. En este sentido sería importante mejorar varios aspectos en relación al ingreso de fertilizantes fosfatados a nuestro país. Entre ellos cabe mencionar: exigencia de etiquetado indicando los compuestos contenidos en el producto y sus concentraciones, cambio de terminología ambigua en la legislación

chilena (Decreto Ley 3.557) e incorporación de valores límites, de metales u otros elementos dañinos. Asimismo, se hace necesaria la categorización de los fertilizantes y agroquímicos en general de acuerdo a sus contenidos en compuestos tóxicos o no tóxicos para que esta información sea considerada en las decisiones de los agricultores con el propósito de mejorar las condiciones ambientales de su entorno (McLaughlin, 2001; Senn y Milham, 2001).

Considerando el programa de fertilización fosfatada del Sistema de Incentivos para la Recuperación de Suelos Degradados del Estado (Decreto con fuerza de Ley 235/99) (<http://www.sag.gob.cl/framearea.asp?cod=8>) es necesario tener presente que, junto con la recuperación de los suelos, se podría estar aumentando la concentración de elementos tóxicos, por ejemplo el cadmio, si los productores utilizan como fuente de fósforo los superfosfatos mexicanos con mayor contenido de cadmio.

7.5.6. Exactitud del modelo

Se debe tener presente que parte de la información utilizada para la aplicación del modelo al caso chileno debe ser mejorada. Para una mejor aproximación sobre la acumulación de cadmio, con el modelo utilizado, se hace necesario estimar el valor de K_D de forma más exacta ya que es una condicionante crítica del modelo. De Meeûs *et al.* (2002), demostraron la sensibilidad del modelo de acumulación de cadmio (propuesto por la ERM) frente a los cambios en el valor de K_D , dado por las diferentes características de los suelos en cuanto a pH y contenido de MO, en países de la UE. Estos autores recomiendan realizar una caracterización de los suelos en cuanto a su contenido de cadmio, materia orgánica y pH, para estimar matemáticamente el valor de K_D (EPA-United States, 1999a; de Meeûs *et al.*, 2002). Esto es igualmente válido para Chile, donde existen distintos tipos de suelos, unos con carga superficial constante y otros con carga superficial dependiente del pH, lo cual afectará de manera distinta la adsorción de cadmio por el suelo. Además, los suelos pueden tener distintos contenidos de cadmio u otros metales que compiten con el cadmio por los sitios de adsorción. También debiera considerarse determinar experimentalmente la capacidad de retención de cadmio por el suelo ya que permitiría pronosticar si el cadmio que ingresa al suelo será adsorbido por el suelo o permanecerá en la solución del suelo.

Una aproximación más exacta obliga a considerar otras variables en el análisis para Chile, tales como las actividades industriales aledañas al sitio de la evaluación del estado de contaminación con cadmio que condicionan el valor de K_e . Se debe tener presente el aporte por depositación atmosférica, lodos residuales y estiércol (ERM, 2000; de Meeûs *et al.*, 2002). La fertilización nitrogenada también es una entrada adicional de cadmio al suelo (Alloway, 1995). La futura aplicación de lodos provenientes del tratamiento de las aguas servidas podría aumentar el contenido de cadmio y otros metales en los suelos (Kaemmerer, 2001, Lavado, 2001). Adicionalmente, se debe considerar los alimentos fosfatados para animales que tienen origen en la roca fosfórica y por lo tanto contienen cadmio al igual que los fertilizantes fosfatados (www.cargill.com).

La simulación realizada sólo considera ocho series de suelos de la VI Región y sus características específicas. La exactitud de la simulación para esta región mejoraría si se consideraran las actividades industriales aledañas así como otras series de suelos correspondientes a otros órdenes de suelos. En general, las investigaciones señalan que la concentración de cadmio de un suelo aumenta en áreas cercanas a zonas mineras, particularmente la minería del zinc y cobre (WHO, 1992b; González, 2001). Asimismo, la zonificación de las actividades industriales y mineras en una determinada localidad ayudará a la mejor interpretación de los resultados de la aplicación del modelo (ERM, 2001).

Entre la información chilena que se debe mejorar para la aplicación del modelo está la tasa de extracción de cadmio del cultivo K_p . No hay registros para este parámetro en Chile. Sin este valor, tampoco se puede hacer una estimación exacta de los efectos en la salud humana (ERM, 2000).

Un aspecto adicional que mejoraría la exactitud del modelo es la actividad biológica del suelo, es decir, añadir el factor tasa de extracción de cadmio por la micro fauna o flora del suelo (WHO, 1992b).

7.5.7. Importancia del K_D

Como se señaló anteriormente, el coeficiente de distribución del cadmio K_D es un valor altamente dependiente de las características de un suelo, especialmente pH,

por ello su valor será diferente para cada tipo de suelo y características particulares dadas por las condiciones climáticas locales (EPA-United States, 1999a). Con un valor de K_D más exacto se podría hacer una mejor estimación del valor de K_f para la aplicación del modelo.

7.5.8. Impacto de la fertilización fosfatada

Como es esperable, y de acuerdo a las ecuaciones matemáticas utilizadas, el aumento progresivo de la fertilización fosfatada conlleva un aumento del contenido de cadmio en el suelo, por lo tanto, se hace necesario limitar estas entradas de manera de restringir la entrada del metal al suelo. La fertilización fosfatada debe hacerse de acuerdo a las necesidades básicas de fertilización y usando fertilizantes fosfatados con contenidos de cadmio menores a 267 [mg kg⁻¹ de P] para disminuir el ingreso de Cd al suelo y evitar su acumulación en el tiempo (Fernández, 1995; CONAMA, 2001).

7.5.9. Efectos en la salud humana

Asumiendo que la legislación extranjera es aplicable en Chile y que se considera la ingesta diaria admisible (IDA) del cadmio en ésta, sería esperable que los niveles de cadmio alcanzados en los suelos en 50 años, no sean dañinos a la salud humana (valores inferiores a 0,5 [mg kg⁻¹ peso seco] (Oosterhuis *et al.*, 2000). Sin embargo, en estas mismas condiciones, cuando se amplía el horizonte de análisis y se alcanza el estado estable del cadmio, éste alcanza concentraciones superiores a 0,5 [mg kg⁻¹ peso seco] y por lo tanto podrían esperarse daños a la salud de las personas.

7.5.10. Alternativas para manejar el Cd

Entre las posibles alternativas preventivas para evitar la disponibilidad de cadmio para el cultivo está la de favorecer su permanencia en el suelo. Una medida puede ser la corrección del pH aplicando compuestos específicos para ello, tales como cal, siempre y cuando las especies cultivadas no se afecten por la posible modificación del pH (WHO, 1999b; McLaughlin, 2001).

Las propuestas crecientes por utilizar fertilizantes fosfatados con bajo contenido en cadmio (Australia y los países de UE) hacen suponer un agotamiento de los yacimientos con bajos contenidos de Cd por su mayor demanda (Hunter *et al.*, 1985).

En el futuro los contenidos de cadmio en los fertilizantes aumentarían por lo que será necesario recurrir a tecnologías especializadas de decadmación, de alto costo (Steen, 1998).

Esto es particularmente preocupante debido a que Chile importa cerca de 376 mil toneladas de fertilizantes fosfatados, principalmente desde Estados Unidos y México (ODEPA, 2002; ProChile, 2001). Este último país con embarques a Chile con contenidos altos de cadmio (Valenzuela, 2001).

8. CONCLUSIONES

A partir del análisis y discusión de los resultados de la presente investigación es posible formular las siguientes conclusiones:

- ▶ Los fertilizantes fosfatados, importados y comercializados en Chile, tienen contenidos promedio de cadmio tales que la entrada de cadmio a los suelos (K_{fer}) por el uso de fertilizantes es superior a trece países de la Unión Europea.
- ▶ Los fertilizantes fosfatados comercializados y usados en Chile, con mayores concentraciones de cadmio, provienen de México, con un 83% de las importaciones de superfosfato.
- ▶ Los niveles de cadmio en las series de suelo analizadas en la VI Región, en un periodo de 50 años con fertilización fosfatada, están dentro de los valores límites de otros países y no constituirían un riesgo para la salud humana.
- ▶ El uso de fertilizantes fosfatados con las mayores concentraciones de cadmio así como la máxima tasa de fertilización recomendada para el cultivo del maíz estaría provocando contaminación de los suelos en un plazo de 38 a 40 años usando como referencia la concentración límite de cadmio de 0,5 [mg kg⁻¹ suelo seco].
- ▶ El cadmio se acumula en el suelo cuando se combina, en general, una baja tasa de extracción del metal por el cultivo, una baja tasa de lixiviación del suelo y una tasa de entrada de cadmio al suelo alta.
- ▶ La disminución de cadmio en el suelo durante la explotación agrícola implica que se deben tener presentes otras vías del cadmio en la gestión ambiental para prevenir el deterioro de los recursos hídricos subterráneos y la posible transferencia de cadmio al ser humano a niveles que pudieran ser riesgosos a la salud.
- ▶ Cálculos más exactos de la acumulación de cadmio en los suelos chilenos requieren:
 - La realización de ensayos de campo para la estimación del parámetro crítico del modelo, K_D .

- ❑ Caracterización de los suelos en cuanto a su contenido de cadmio y probablemente otros metales que compiten con él.
- ❑ Estimación de K_{dep} y K_{le} realizando una evaluación de las entradas locales de cadmio a los suelos debido a la actividad industrial aledaña, aplicación de lodos (biosólidos), fertilización nitrogenada, alimentación animal fosfatada, etc.
- ❑ Estimación de K_p para cultivos en una rotación típica del país y según sus partes comestibles (hojas, raíces o granos), considerando que los cultivos altamente extractores de cadmio tales como *Lactuca sativa* bajan la concentración de cadmio del suelo, pero, el cultivo puede convertirse en un factor de riesgo para la salud humana.
- ❑ Estimación de otros posibles extractores de cadmio del suelo tales como la micro fauna o flora del suelo.

Las evaluaciones de la Unión Europea sobre el estado de la contaminación de los suelos con cadmio así como la evaluación de los riesgos en la salud humana por el uso de fertilizantes pone de manifiesto que el tema abordado por la presente investigación es relevante en el marco de la comercialización internacional de fertilizantes fosfatados.

El uso de fertilizantes fosfatados en la agricultura y la presión internacional por usar fertilizantes con bajo contenido en cadmio podrían agotar rápidamente los yacimientos con bajos índices de este metal haciendo necesario recurrir a la decadmación; tecnología a la cual no se tiene acceso en Chile y que pudiera afectar los precios de los fertilizantes que son requeridos en el país.

9. RECOMENDACIONES

Los resultados y conclusiones de la presente investigación permiten formular las siguientes recomendaciones:

Parámetros propios y elaboración de indicadores. La evaluación del impacto del cadmio en los suelos chilenos requeriría de una verificación de los parámetros o determinación de aquellos no existentes, necesarios para el análisis. La información debería generarse a través del tiempo para tener aproximaciones más exactas del comportamiento del cadmio en el suelo en el largo plazo para relacionarlo con el efecto sobre la salud de las personas. Asimismo, se hace necesario la elaboración de indicadores para Chile para establecer el estado del recurso suelo en cuanto a la concentración de tóxicos tales como el cadmio.

Evaluación del riesgo del uso de fertilizantes. La aplicación del modelo utilizado en la presente investigación permite evaluar el estado del recurso suelo en el corto y largo plazo de manera de prevenir la contaminación por cadmio. Sin embargo, es necesario mejorar la información utilizada evaluando algunos parámetros en condiciones de campo y evaluar los riesgos en la salud del uso de los fertilizantes fosfatados. La continuidad de la presente investigación, aplicando el modelo de exposición y el modelo de evaluación del riesgo del cadmio en la salud humana por el uso de fertilizantes fosfatados, permitiría prevenir el deterioro del recurso suelo, proponer una mejor propuesta legislativa para la internación y comercialización de estos productos y, por lo tanto, prevenir daños a la salud de las personas.

Recuperación de suelos. Se sugiere considerar los avances de la presente investigación para el “Programa de Recuperación de Suelos Degradados” (PRSD), particularmente en su componente de “Fertilización Fosfatada”. Se sugiere el uso de fertilizantes con concentraciones de cadmio medias a bajas de modo de evitar la acumulación de cadmio en el suelo o su transferencia a los cultivos consumidos por el hombre. Se debe tener presente que en el caso de los cultivos hortícolas (hortalizas de raíces y hojas) se tienen tasas mayores de extracción de cadmio desde el suelo respecto de cultivos frutales o cereales.

Zonificación de áreas según tóxicos. La zonificación de los suelos respecto de concentraciones de cadmio considerando actividades aledañas, condiciones climáticas, etc., permitiría realizar una gestión ambiental más integral en determinadas áreas de manera de prevenir el deterioro de los recursos naturales y posibles riesgos a la salud humana.

Evaluar el impacto del uso de biosólidos. Considerando el tratamiento de las aguas servidas con la consecuente generación de lodos residuales con posibles aplicaciones a la agricultura chilena, se hace necesario evaluar el impacto de esta entrada de cadmio adicional a los suelos. Esta entrada se debe considerar en el modelo de acumulación del modelo general usado en la presente investigación.

Aspectos legislativos. Considerando los elevados niveles de cadmio de algunos fertilizantes fosfatados ingresados al país, particularmente el proveniente de México, y la posibilidad de contaminar los suelos, sería necesario hacer efectiva la exigencia de etiquetado indicando los compuestos contenidos en el producto y sus concentraciones. Además, la legislación chilena (Decreto Ley 3.557) debería incorporar un cambio de la terminología ambigua e incorporar valores límites de metales u otros elementos dañinos.

Se sugiere elaborar una propuesta legislativa con uso de terminología común a otros países y con términos no ambiguos para facilitar la fiscalización. Dicha propuesta debiera incluir la exigencia del etiquetado y establecimiento de límites máximos de contaminantes en fertilizantes. Alternativamente, se debería evaluar los límites máximos de otros países para aplicarlos a la realidad chilena, como normativa de referencia.

BIBLIOGRAFÍA

- AGROCHILE. 2000. Agroficha ficha técnico económica del maíz dulce. [en línea]. <<http://www.agrochile.cl/fichas/maiz.htm>>. [consulta: 24 abril 2002].
- ALLOWAY, B.J. 1995. Cadmium. En: Heavy metals in soils. Second edition. Blackie Academy and Professional. Pp.122-150.
- AMUNDSEN, C.E., ALMÁS, Á. and SINGH, B.R. 2000. Risk assessment of Cd in mineral fertilisers in Norway using model calculations. Norwegian Centre for Soil and Environmental Research. Report 85/00. 39p.
- ANONYMOUS. 1999. A bit more about...Phosphoric acid filters--the heavyweights are not standing still. London. Phosphorus and Potassium 224:26.
- AUER, C. 1977. Cadmium in phosphate fertilizer production. US EPA Midwest Research Instruction report, October 1977. (United States Environmental Protection Agency: Cincinnati, OH, US.)
- AUSTRIAN FEDERAL ENVIRONMENTAL AGENCY. 2000. A risk assessment for cadmium in Austria based on the recommendations of ERM. Final Report. 10.X.2000. [en línea]. <<http://europa.eu.int/comm/enterprise/chemicals/fertilizers/riskassest/reports.htm>>. [consulta: 25 abril 2002].
- BESOAIN, E. 1999. Mineralogía de las rocas fosfóricas. En: INIA-LA PLATINA. Las rocas fosfóricas y sus posibilidades de uso agrícola en Chile. Chile. pp. 53-54.
- BESOAIN, E., LEÓN, L., CHIEN, S., VAN KAUWENBERGH, S. y AMBERGER, A. 1999. Las rocas fosfóricas. En: INIA-LA PLATINA. Las rocas fosfóricas y sus posibilidades de uso agrícola en Chile. Chile. pp. 41-43.
- BRADY, N.C. 1974. The Nature and properties of soils. McMillan, New York, NY. En: Sumner, M. 2000. Handbook of soil science. CRC Press LLC. United States. 2048p.
- BRAMLEY, R.G.V. 1990. Cadmium in New Zealand agriculture. N.Z. J. Agricultural Research 33:505-519.
- CARBONELL, A.A., PORTHOUSE, J.D., MULBAH, C.K., DELAUNE, R.D. and PATRICK JR., W.H. 1999. Metal solubility in phosphogypsum-amended sediment under controlled pH and redox conditions. Madison. Journal of Environmental Quality 28(1):232.
- CARRASCO M., A. 1994. Química de metales pesados en suelos de Chile. pp. 137-149. En: SEMINARIO-TALLER: Impacto ambiental de metales pesados en Chile. Santiago, Chile. INIA – La Platina. 261 p.
- CECW-EH-Y. 1994. Flood Run-off Analysis. Engineer Manual. EM 1110-2-1417. 213p.
- CEPAL – IICA. 2001. Panorama de la agricultura de América Latina y El Caribe, 1990-2000. Santiago, Chile. Editorial Trineo S.A. 219p.
- CHARTER, R.A., TABATABAI, M.A. and SCHAFER, J.W. 1993. Metals contents of fertilizers marketed in Iowa. Commun. Soil Sci. Plant. Análisis 24:961-972.

- CIREN. 1996. Descripciones de suelos materiales y símbolos: estudio agrológico VI Región / CIREN-CORFO. Centro de Información de Recursos Naturales - CIREN. Volumen I y II. 489p.
- CONWAY, H.L. 1978. Sorption of arsenic and cadmium and their effects on growth, micronutrient utilization, and photosynthetic pigment composition of *Asterionell Formosa*. J. Fish Res. Board. Can. 35:286-294.
- CUPIT, M., LARSSON, O., DE MEEÛS, C., EDULJEE, G.H. and HUTTON, M. 2002. Assessment and management of risks arising from exposure to cadmium in fertilizers II. The Science of the Total Environment ...
- DAVID, D.K., PINKERTON, A. AND WILLIAMS, C.H. 1978. Impurities in Australian phosphate fertilizers. Journal Aust. Inst. Agric. Sci. 44:132-135.
- DAVIS, L. 2000. New developments for the new century. London. Phosphorus and Potassium 225 : 17.
- DE MEEÛS, C., EDULJEE, G. and HUTTON, M. 2002. Assessment and management of risks arising from exposure to cadmium in fertilizers. I The Science of the Total Environment 291:167-187.
- DRIVER, J. 1998. Phosphates recovery for recycling from sewage and animal wastes. London. Phosphorus and Potassium 216:17.
- DEY, S. and DWIVEDI, S.K. 2000. Toxic metals in hens' eggs in India : A preliminary report. Archives of Environmental Health 55(5): 365.
- EMMONS, W., ALLISON, I., STAUFFER, C. and THIEL, G. 1965. Geología: principios y fundamentos. Quinta Edición. Ed. McGraw Hill. 491p.
- EPA (Environmental Protection Agency) – UNITED STATES. 1999a. Understanding variation in partition coefficient, K_D , values. Volume I and II. [en línea]. <<http://www.epa.gov/radiation/technology/partition.htm>>. [consulta: 26 abril 2002].
- EPA (Environmental Protection Agency) – UNITED STATES. 1999b. Biosolids Generation, Use, and Disposal in The United States. Municipal and Industrial Solid Waste Division Office of Solid Waste. EPA530-R-99-009. September 1999. 74p.
- ERM (Environmental Resources Management). 1999. Study on data requirements and programme for data production and gathering to support a future evaluation of the risks to health and environment from cadmium in fertilisers. Final report to European Commission Directorate General III. 110p.
- ERM (Environmental Resources Management). 2000. A Study to Establish a Programme of Detailed Procedures for the Assessment of Risks to Health and the Environment from Cadmium in Fertilisers (ETD/99/502247). Final report to European Commission Directorate General III. 89p.
- ERM (Environmental Resources Management). 2001. Analysis and conclusions from Member States' assessment of the risk to health and the environment from cadmium in fertilizers.
- FERNÁNDEZ, M. 1995. Fertilización. En: PARATORI, O. Y ALTAMIRANO, S. (Eds.). El cultivo del maíz. Santiago de Chile. INIA – La Platina. pp. 33-47.

- FERNÁNDEZ, M., NOVOA, R. y RIQUELME, J. 1995. Suelos. En: PARATORI, O. Y ALTAMIRANO, S. (Eds.). El cultivo del maíz. Santiago de Chile. INIA – La Platina. pp. 33-47.
- FNSP (FUNDACIÓN NACIONAL DE SUPERACIÓN DE LA POBREZA). 1998. Agricultura y Medio Ambiente : Manual de Gestión Ambiental a Nivel Local. [en línea]. <www.fundacionpobreza.cl> [consulta: 25 agosto 2001].
- GABE, U. y RODELLA, A.A. 1999. Trace elements in brazilian agricultural limestones and mineral fertilizers. *Commun. Soil Science Plant Analysis* 30(5&6):605-620.
- GAVI, F., BASTA, N.T. and RAUN, W.R. 1997. Wheat grain cadmium as affected by long-term fertilization and soil acidity. *Journal of Environmental Quality* 26 (1): 265.
- GILLETT, S. 1999. Unresources. Sometimes we run out of things we need. Other times ... *Analog*: 30-37.
- GLENDINING, J.S. 2000. Heavy metals in fertilizers and agriculture. In: Australian soil fertility manual. Fertilizer Industry Federation of Australia, Inc. Australia. pp 99-102.
- GONZÁLEZ, S. 1994. Geoquímica de metales pesados en Chile. pp. 10-29. En: Seminario-Taller: Impacto ambiental de metales pesados en Chile. Santiago, Chile, 261 p.
- GONZÁLEZ, S. 2001. Estado de la Contaminación de Suelos en Chile. [en línea]. <<http://lauca.usach.cl/ima/cap11.htm>>. [consulta: 25 agosto 2001]
- GRZMIL, B. 1998. Variable solubility with low waste. *Phosphorus and Potassium* 218:30.
- GUNS, M. and PUSSEMIER, L. 2000. Risk assessment to health and the environment from cadmium in fertilizers. Scientific report by Belgium. September 2000. Veterinary and Agrochemical Research Centre (VAR) and Ministry of Small Enterprises, Traders and Agriculture. 24p.
- BMZ-GTZ. 1995. Guía de protección ambiental -Material auxiliar para la identificación y evaluación de impactos ambientales. GTZ, Alemania. CD-ROM Humanity Development Library for sustainable development and basic human needs. CD-ROM creation & logistics: HumanityCD Ltd. Greenstone Software of the New Zealand Digital Library.
- HANSEN, O.C. 2000. Cadmium in fertilizers, Risks from cadmium accumulation in agricultural soils due to the use of fertilisers containing cadmium. Model estimations. Danish report. 96p.
- HENRY, J.G. Y HEINKE, G.W. 1999. Ingeniería Ambiental. Segunda Edición. Ed. Pearson, México. 778p.
- HORAK, O., ECKER, S. HERGER P. AND BENETKA E. 1995. Ermittlung und Bewertung von Basis-daten zur Bilanzierung umweltrelevanter Schwermetalle in Landwirtschaftlich genutzten Bo-den. Schriftenreihe der U-AW 4/95 Hrsg. Amt der o. Landesregierung, Linz.
- HOVMAND, M., TJELL, J. and MOSBACK, H. 1983. Plant uptake of airborne cadmium. *Environmental Pollution* 30:27-38.
- HUNTER, D., HOPE, A. and KENNETH, B. 1985. Low-Cadmium H₃PO₄ for fertilizer use. New York, United States. *Chemical Week* 136 (8):25.

- CONAMA. 2001. Manual de buenas prácticas agrícolas para evitar la contaminación difusa de aguas. INIA-LA PLATINA. Santiago, Chile. 180 p.
- IRETSKAYA, S.N., CHIEN, S.H. Y MENON, R.G. 1998. Effect of acidulation of high cadmium containing phosphate rocks on cadmium uptake by upland rice. *Plant and Soil* 201:183-188.
- ISHERWOOD, K.J. 1992. Phosphate industry and the environment. In: proceedings of an international workshop: phosphate fertilizers and the environment. March 23-27, Tampa, Florida, US. pp 115-123.
- JINADASA, K., MILHAM, P., HAWKINS, P. and CORNISH, S. 1997. Survey of cadmium levels in vegetables and soils of Greater Sydney, Australia. Madison, United States. *Journal of Environmental Quality* 26(4):924.
- KAEMMERER, M. 2001. Curso aplicación benéfica de Biosólidos a suelos. Aguas Andinas. Noviembre 26 al 30 de 2001.
- LAVADO, R. 2001. Curso aplicación benéfica de Biosólidos a suelos. Aguas Andinas. Noviembre 26 al 30 de 2001.
- LOGANATHAN, P., HEDLEY, M.J., GREGG, P.E. Y CURRIE, L.D. 1997. Effect of phosphate fertilizer type on the accumulation and plant availability of cadmium in grassland soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystem* 47:169-178.
- McLAUGHLIN, M.J. 2001. Cadmium clean up for Australian agriculture. M2 Presswire CSIRO July 2001. [en línea] [consulta: enero 04 de 2002].
<wysiwyg://97//http://proquest.umi.com/pq...&Idx=309&Fmt=7&DFmt=6&Mtd=1&Sid=2>
- McLAUGHLIN, M.J., MAIER, N.A., FREEMAN, K., TILLER, K.G., WILLIAMS, C.M.J. and SMART, M.K. 1995. Effect of potassic and phosphatic fertilizer type, phosphatic fertilizer Cd content and additions of zinc on cadmium uptake by commercial potato crops. *Fet. Res.* 40:63-70.
- McLAUGHLIN, M.J., TILLER, K.G., NAIDU, R. y STEVENS, D.P. 1996. Review: the behaviour and environmental impact of contaminants in fertilizers. *Australian Journal of Soil Research* (34):1-54.
- McLAUGHLIN, M.J., SIMPSON, P.G., FLEMING, N., STEVENS, D.P., COZENS, G. Y SMART, M.K. 1997. Effect of fertilizer type on cadmium and fluorine concentrations in clover herbage. *Australian Journal of Exp. Agr.* 37:1019-1026.
- MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES. 1998. Primer Seminario sobre política exterior y medio ambiente. 1 y 2 de octubre de 1998, Santiago, Chile. 524 p.
- MORTVEDT, J.J., MAYS, D.A., and OSBORN, G. 1981. Uptake by wheat of cadmium and other heavy metal contaminants in phosphate fertilizers. *Journal on Environmental Quality* 10(2):193-197.
- MORTVEDT, J.J. 1996. Heavy metals contaminants in inorganic and organic fertilizers. *Fertilizer Research* 43:55-61.
- NACIONES UNIDAS. 1980. Tecnologías de procesos para la fabricación de fertilizantes fosfatados. Serie Desarrollo y transferencia de tecnología N°8. 51p.

- NATH, R., PRASAD, R., PALINAL, V.K. and CHOPRA, R.K. 1984. Molecular basis of cadmium accumulation. *Science* 18:109-163.
- NEBEL, B.J. Y WRIGTH, R.T. 1999. *Ciencias ambientales : Economía y desarrollo sostenible*. Editorial Pearson, sexta edición. 698p.
- NICHOLSON. 1999. Report on Cadmium Assessment to the Fertilisers Working Group by the United Kingdom. Report for United Kingdom. 19p.
- NORDBERG, G.F. 1974. Health hazards of environmental cadmium pollution. *Ambio* 3:51-65.
- NORVELL, W.A., WU, J., HOPKINS, D.G. and WELCH, R. 2000. Association of cadmium in durum wheat grain with soil chlorine and chelate-extractable soil cadmium. *Madison, United States. Soil Science Society of America Journal* 64(6) :2162-2168.
- NÚÑEZ, R. 1987. Aplicación directa de roca fosfórica en suelos de México, p:73-98. En: *Alternativas sobre el uso como fertilizantes de fosfatos nativos en América tropical y subtropical*. Seminario, CIAT-Colombia. 319p.
- ODEPA. 2002. Estadísticas Macrosectoriales y Productivas. Subsector Agrícola. Cultivos Anuales: superficie, producción y rendimiento. [en línea]. <www.odepa.cl> [consulta: 16 abril 2002]
- OECD. 1994. Risk reduction monograph No.5: Cadmium, background and national experience with reducing risk. Environment Directorate, Organization for Economic Co-operation and Development Monograph Series No. 104, OECD/GD(94)97.
- OOSTERHUIS, F.H., BROUWER, F.M. y WIJNANTS, H.J. 2000. A possible EU wide charge on cadmium in phosphate fertilizers: economic and environmental implications. Final Report to the European Commission, Brussels.
- PARATORI, O. y ALTAMIRANO, S. 1995. *El cultivo del maíz*. Ediciones INIA-La Platina. 173p.
- PROCHNOW, L., PLESE, L. y ABREU, M. 2001. Bioavailability of cadmium contained in single superphosphates produced from different brazilian raw materials. [Online published] *Journal Article*. 02-28-2001. p:283-294. <<http://members.aol.com/liprochnow/initeng.html>>. [consulta: 01 abril 2002].
- RAVEN, K. and LOEPPERT, R. 1997. Trace element composition of fertilizers and soil amendments. *Journal of Environmental Quality* 26(2):551.
- RAYMENT, G.E. 1995. Sources of cadmium in agricultural products. Workshop on cadmium levels in food and agricultural products, Canberra, Australia. 1-2 May 1995. National Food Authority of Australia.
- ROBERTS, M. 1996. EU eyes cadmium in phosphate fertilizers. *New York, United States. Chemical Week* 158(23):13.
- ROBERTS, T. 1996. Cadmium and phosphate – issues and options. Simposio New Developments in Fertilizer Manufacture. 25 al 29 de agosto, Canadá.
- RÖMKENS P.F., A.M. and SALOMONS W. 1998. Cd, Cu and Zn solubility in arable and forest soils: consequences of land use changes for metal mobility and risk assessment. *Soil Science* 163:859 –871.

- SENN, A. and MILHAM, P. 2000. Managing cadmium in vegetables. Agfact H8. AC.2. second edition. May 2000. [en línea] <<http://www.tocal.nsw.edu.au/reader/7187>> [consulta: diciembre 20 de 2001]
- SINGH, B.R. 1991. Unwanted Components of commercial fertilizers and their agricultural effects. Proc. Fertilizer Society. London, December 1991:2-28.
- STAESSEN, J., ROELS, H., EMELIANOV, D. AND KUZNETSOVA, T. 1999. Environmental exposure to cadmium, forearm bone density, and risk for fractures : Prospective population study. London. The Lancet 353(9159):1140-1144.
- STEEN, I. 1998. Phosphorus availability in the 21st century: Management of a non-renewable resource. London. Phosphorus and Potassium (217):25.
- SUMNER, M. 2000. Handbook of soil science. CRC Press LLC, United States. 2048p.
- SYERS, J.K., MACKAY, A.D., BROWN, M.W. AND CURRIE, L.D. 1986. Chemical and physical characteristics of phosphate rock materials of varying reactivity. Journal Science Food Agriculture 37:1057-1064.
- TAN, K. 2000. Environmental Soil Science. Second Edition, Revision and Expanded. Marcel Dekker Ed. New York. 452p.
- TANG, W. 2000. Mechanisms of cadmium nephrotoxicity. Summary, Doctoral Thesis. University of Rhode Island. 159p.
- TAPIA, R. 1994. Toxicidad de metales pesados en seres humanos. Págs:63-69. En: Seminario – Taller: Impacto ambiental de metales pesados en Chile. Santiago, Chile. 261p.
- TYLER, R. and BARNES, S. 1999. State fertilizer officials focus on compost. Emmaus, United States. BioCycle 40 (3):59-60.
- UNIÓN EUROPEA 2002a. Notificación con arreglo al apartado 4 del artículo 95 del Tratado CE sobre legislación nacional que se aparta de las disposiciones de una medida comunitaria de armonización (2002/C 23/03). Diario Oficial de las Comunidades Europeas. 25 de enero de 2002.
- UNIÓN EUROPEA 2002b. Notificación con arreglo al apartado 4 del artículo 95 del Tratado CE sobre legislación nacional que se aparta de las disposiciones de una medida comunitaria de armonización (2002/C 23/04). Diario Oficial de las Comunidades Europeas. 25 de enero de 2002.
- UNIÓN EUROPEA 2002c. Fertilizers. Risk assessment reports on cadmium in fertilizers. [en línea]. <<http://europa.eu.int/comm/enterprise/chemicals/fertilizers/riskassess/reports.htm>>. [consulta: 24 abril 2002].
- UNIÓN EUROPEA. 2002d. Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de septiembre de 2001, relativo a los abonos (COM(2001) 508 final - Diario Oficial C 51 E de 26.02.2002). [en línea]. <<http://europa.eu.int/scadplus/leg/es/lvb/l21278.htm>> [Consulta: abril 15 de 2003].
- VALENZUELA P., A. 2001. Determinación de los niveles de cadmio en distintos fertilizantes fosforados y su acumulación en el suelo. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias

Agropecuarias con Mención Producción de Cultivos. Santiago, Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile. 80p.

WHO. 1972. Technical Report Series. No. 505, WHO, Geneva.

WHO. 1992a. Cadmium. Environmental Health Criteria 134. United Nations Environmental Programme, International Labour Organization and World Health Organization. 280p.

WHO. 1992b. Cadmium – Environmental aspects. Environmental Health Criteria 135. United Nations Environmental Programme, International Labour Organization and World Health Organization. 156p.

WILLIAMS, C.H. Y DAVID, D.J. 1973. The effect of superphosphate on the cadmium content of soils and plants. Aust. Journal of Soil Research 11:43-56.

ZHONGREN, N., JIJUN, L., JIANMING, Z. and GUODONG, C. 2002. Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions. The Science of the Total Environment 285:187-195.

GLOSARIO

Bioacumulación

Acumulación de una sustancia en sistemas biológicos.

Biodisponibilidad

Disponibilidad de una sustancia para funciones biológicas. Estar disponible significa que parte de cualquier elemento o compuesto, en el suelo, puede ser absorbido y asimilado para el crecimiento vegetal (Brady, 1974, Sumner, 2000).

Biomagnificación

Es un caso especial de bioacumulación; manifiesta la tendencia de algunos productos químicos a acumularse en la malla trófica, exhibiendo concentraciones sucesivamente mayores al ascender el nivel trófico. La concentración del producto en el organismo consumidor es mayor que la concentración del mismo producto en el organismo consumido. Los contaminantes sujetos a biomagnificación son generalmente liposolubles, almacenándose en el tejido graso de los sucesivos consumidores (ejemplo clásico: DDT) (<http://www.pes.fvet.edu.uy/cienmar/madid/glosario.html>, 2003).

Biosólido

Es un subproducto del tratamiento de las aguas servidas domésticas conocidos también como lodos residuales (sewage sludge) (EPA-United States, 1999b).

“Buenas prácticas agrícolas”

Se refiere al manejo de un sistema agrícola con un conjunto de técnicas conservacionistas que consisten en el uso de agroquímicos y del recurso hídrico de manera de suplir los requerimientos mínimos del cultivo de manera de prevenir la contaminación y controlar la erosión.

Capa arable

Se refiere a la capa superficial del suelo de 0 a 20 cm de profundidad que puede ser arada y cultivada.

Depositación atmosférica

Ingreso indirecto de tóxicos al suelo después de su diseminación por vía aérea, como depositación (sedimentación) líquida o sólida (aerosoles y sustancias arrastradas por las precipitaciones) (BMZ-GTZ, 1995, Henry y Heinke, 1999).

Elemento traza

Elemento presente en la corteza terrestre en contenidos inferiores a 0,1%.

Elemento traza metálico

Nueva denominación propuesta para referirse a los elementos tradicionalmente denominados metales pesados y que causan deterioro en el ambiente y en la salud humana (Kaemmerer, 2001).

Estado estable del cadmio (EE)

Concentración de cadmio constante alcanzada en un suelo independientemente de la variable tiempo.

Evapotranspiración

El efecto combinado de evaporación y transpiración se denomina Evapotranspiración. Evaporación se define como la transformación del agua de la fase sólida y líquida del suelo en vapor de agua, y liberación desde el suelo. Transpiración es la pérdida de agua por procesos activos de plantas y organismos del suelo (Tan, 2000).

Fertilizante fosfatado

Son compuestos de origen natural o artificial que se agregan al suelo para aumentar su productividad. Son fuentes de fósforo fácilmente aprovechables por las plantas cuyo objetivo es proporcionar este nutriente para su crecimiento y desarrollo. Presentan distintos porcentajes de fósforo y diversas denominaciones.

Fitotoxicidad

Se refiere al deterioro que sufren las plantas frente a un elemento tóxico que es absorbido y metabolizado.

Fosforita

Designa una roca fosfórica sedimentaria, usualmente marina (Besoain, 1999).

Infiltración

Parte de la precipitación llega a penetrar la superficie del terreno a través de los poros y fisuras del suelo o las rocas, rellenando de agua el medio poroso (Sumner, 2000; <http://www.miliarium.com/Proyectos/Agenda21/Anejos/SectoresClave/Cicloagua.asp>, 2003).

Lixiviación

Pérdida de elementos solubles (nutritivos u otros componentes) desde el suelo en el agua percolada a través del perfil del suelo (Tan, 2000).

Metal pesado

Nombre que se aplica a la mayoría de los metales con densidad superior a $6 \text{ [g cm}^{-3}\text{]}$. El concepto también se ha usado para elementos químicos que, según su concentración, son peligrosos para las plantas y animales. La lista de estos elementos es variable según distintos autores (Carrasco, 1994).

Micronutrientes

Son elementos esenciales (B, Cu, Fe, Mn, Zn, Cl) para el crecimiento de las plantas que son requeridos en cantidades mucho menores que los elementos mayores o macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S). También son denominados elementos menores, indicando que su contenido en el tejido vegetal es menor en relación a los macronutrientes. Otro término usado es elemento traza debido a que se encuentra en concentraciones traza en el tejido vegetal (Sumner, 2000).

Nefrotoxicidad

Mecanismo en que el cadmio produce daño al riñón. Mecanismo: En la exposición con Cd, el Cd es primeramente depositado en el hígado, donde induce y se liga a la metalotioneina (MT). El CdMT es liberado desde el hepatocito y reabsorbido desde el filtrado del glomérulo por las células epiteliales tubulares próximas al riñón. El CdMT reabsorbido es rápidamente degradado por los lisosomas liberando Cd^{2+} en el citoplasma, el cual se liga a la MT del riñón. El exceso de Cd^{2+} produce estrés oxidativo. (Tang, 2000).

Suelo

Cuerpo natural tridimensional con capas definibles que comúnmente, pero no siempre, consisten en horizontes formados de materiales minerales y orgánicos que contienen materia orgánica viviente y pueden ser medio de soporte a la vegetación (Sumner, 2000).

Roca

Es toda masa natural que forma parte apreciable de la corteza terrestre. La mayor parte de las rocas son mezclas físicas de minerales. Los elementos químicos de los minerales están combinados químicamente en proporciones determinadas, pero, los minerales de las rocas están nada más que unidos químicamente en variadas proporciones. La misma mezcla puede presentarse en diferentes sitios. Algunas rocas están formadas por sólo un mineral, otras además contienen materia orgánica o vidrios volcánicos (Emmons, 1965).

Roca fosfórica

Es un nombre general para rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas con alto contenido de fósforo (Besoain, 1999).

Roca ígnea

Roca formada por el endurecimiento del magma o rocas en estado de fusión (Emmons, 1965).

Roca sedimentaria

Roca formada por la depositación de sedimentos (Emmons, 1965).

Roca metamórfica

Es una roca ígnea o sedimentaria que ha sufrido cambios por el calor o la presión (Emmons, 1965).

Sostenible

Adj. Dicho de un proceso, que puede mantenerse por sí mismo, como lo hace, por ejemplo, un desarrollo económico sin ayuda exterior ni merma de los recursos existentes (Real academia de la lengua española, <www.rae.es>, 2002).

SIGLAS

ACE	: Acuerdo de Complementación Económica.
BMZ	: Bundesminister für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de Alemania).
CEPAL	: Comisión Económica para América Latina y El Caribe.
CIREN	: Centro de Información de Recursos Naturales (Chile).
CONAMA	: Comisión Nacional del Medio Ambiente (Chile).
CORFO	: Corporación de Fomento de la Producción (Chile).
EE	: Estado estable.
ERM	: Environmental Resources Management (Gestión de Recursos Ambientales).
FDA	: Fosfato diamónico.
FMA	: Fosfato monoamónico.
GTZ	: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (Agencia de cooperación técnica alemana).
IDA	: Ingesta Diaria Admisible.
IICA	: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
INIA	: Instituto de Investigaciones Agropecuarias (Chile).
IPCS	: International Programme of Chemical Safety (Programa internacional de seguridad química).
LAC	: Latino América y El Caribe.
ODEPA	: Oficina de Planificación y Políticas Agrarias (Chile).
OMS	: Organización Mundial de la Salud.
PROCHILE	: Dirección de Promoción de Exportaciones (Chile).
PRSD	: Programa de Recuperación de Suelos Degradados (Chile).
SAG	: Servicio Agrícola y Ganadero (Chile).
SFT	: Superfosfato triple.
UE	: Unión Europea.
WHO	: World Health Organization (Organización Mundial de la Salud).

ANEXO I

Cuadro I. 1. Características físico químicas de las series analizadas, VI Región.

Serie	Chépica	Cocalán	Cunaco	Millahue	San Vicente	Graneros	Malloa	O'Higgins	promedio series	Mediana (Valor central)	Valor Mínimo	Valor Máximo	Desviación estándar
Distribución partículas [%]													
2-1 [mm]	0,70	0,98	0,40	2,70	1,05	0,40	0,09	0,49	0,85	0,60	0,09	2,70	0,81
1-0,5 [mm]	3,10	8,16	1,00	10,10	2,91	2,00	0,40	2,07	3,72	2,49	0,40	10,10	3,50
0,5-0,25 [mm]	4,30	11,46	2,40	7,50	3,19	4,50	0,56	2,71	4,58	3,74	0,56	11,46	3,43
0,25-0,10 [mm]	6,20	29,78	1,60	10,90	9,79	16,20	0,86	7,03	10,29	8,41	0,86	29,78	9,31
0,10-0,05 [mm]	7,40	19,38	18,60	12,60	13,09	17,30	1,60	7,13	12,14	12,85	1,60	19,38	6,33
2-0,05 [mm]	21,70	69,81	24,00	43,80	30,02	40,40	3,50	19,43	31,58	27,01	3,50	69,81	19,94
0,05-0,002 [mm]	38,40	24,82	49,20	40,00	39,36	41,00	48,30	64,05	43,14	40,50	24,82	64,05	11,26
<0,002 [mm]	39,90	5,37	26,80	16,20	30,54	18,60	48,20	16,52	25,27	22,70	5,37	48,20	13,99
Textura	FA	Fa	FA	F	FA	F	A	FL	--				
D _a [g cm ⁻³]	--	1,20	--	1,16	1,70	1,10	--	1,48	1,33	1,20	1,10	1,70	0,25
Retención agua 33 kPa [%]	39,00	20,07	36,00	24,30	34,52	26,03	39,40	30,21	31,19	32,36	20,07	39,40	7,18
Retención agua 1.500 kPa [%]	28,00	11,50	22,00	12,44	19,96	14,41	30,80	17,26	19,55	18,61	11,50	30,80	7,08
Agua aprovechable [%]	11,00	8,57	14,00	11,86	14,63	11,62	8,60	12,95	11,65	11,74	8,57	14,63	2,25

(continúa).

Cuadro I. 1. (Continuación)

Serie	Chépica	Cocalán	Cunaco	Millahue	San Vicente	Graneros	Malloa	O'Higgins	promedio series	Mediana (Valor central)	Valor Mínimo	Valor Máximo	Desviación estándar
Carbono orgánico [%]	2,00	--	2,10	--	--	--	--	--	2,05	2,05	2,00	2,10	0,07
MO [%]	3,40	2,59	3,60	2,50	5,65	3,40	3,91	3,52	3,57	3,46	2,50	5,65	0,97
pH agua 1:1	6,30	7,91	6,50	6,90	6,20	6,90	6,85	6,49	6,76	6,67	6,20	7,91	0,54
CE [dS m ⁻¹]	--	0,23	--	0,05	--	0,12	--	--	0,13	0,12	0,05	0,23	0,09
Carbonato de calcio [%]	--	0,59	--	--	--	--	--	--	0,59	0,59	0,59	0,59	--
Complejo de cambio [me/100g]													
Ca [cmol (+) kg ⁻¹]	23,60	--	22,90	10,58	22,55	18,19	26,89	18,33	20,43	22,55	10,58	26,89	5,31
Mg [cmol (+) kg ⁻¹]	7,70	--	4,60	1,93	5,33	1,46	5,89	1,45	4,05	4,60	1,45	7,70	2,47
K [cmol (+) kg ⁻¹]	0,40	0,36	0,70	0,29	0,37	0,59	0,74	1,07	0,56	0,50	0,29	1,07	0,26
Na [cmol (+) kg ⁻¹]	0,40	0,34	0,40	0,20	0,72	0,23	0,40	0,23	0,37	0,37	0,20	0,72	0,17
Suma de bases [cmol(+) kg ⁻¹]	32,10	--	28,60	13,00	28,97	20,47	33,92	21,07	25,45	28,60	13,00	33,92	7,50
Capacidad total de intercambio	36,70	21,91	34,50	14,23	29,48	22,41	33,59	23,65	27,06	26,56	14,23	36,70	7,76
Saturación de bases [%]	87,00	100,00	83,00	91,00	98,55	91,00	99,25	89,20	92,38	91,00	83,00	100,00	6,26

Nota: Los valores de cada serie de suelo del Cuadro anterior se han estimado para la capa arable, 20 cm de profundidad.

ANEXO II

Cuadro II. 1. Contenido de cadmio en las rocas fosfóricas de diferentes orígenes.

País de origen	Localidad y/o tipo de roca	Cadmio [mg kg ⁻¹ roca]	Cadmio [mg kg ⁻¹ P]	Referencia
Australia	Isla Nauru	86,0	-	Williams y David, 1973.
Australia	Isla Nauru	100,0	641,0	Syers <i>et al.</i> , 1986, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Australia	Islas Christmas	-	600,0	FIFA ^a , citado por Glendining, 2000.
Australia	Islas Christmas	76,0	-	Williams y David, 1973.
Australia	Duchess	7,0	50,0	Williams, 1974, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Brasil	Catalaos	3,6	-	Gabe y Rodella, 1999.
Brasil	Catalao	3,7	-	Gabe y Rodella, 1999.
Brasil	Tapira	3,0	-	Gabe y Rodella, 1999.
Brasil	Jacupiranga	4,0	-	Gabe y Rodella, 1999.
Canadá	Christmas Island	43,0	275,0	David <i>et al.</i> , 1978, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
China	Yunan	5,0	35,0	Bramley, 1990, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Egipto	Hamrawein	5,3	42,0	McLaughlin <i>et al.</i> , 1997.
Egipto	Hamrawein	9,0	67,0	FIFA, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Egipto	Quseir	8,0	61,0	McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Estados Unidos	Carolina del Norte	48,0	278,0	Syers <i>et al.</i> , 1986.
Estados Unidos	Carolina del Norte	40,0	312,0	Bokcman <i>et al.</i> , 1990 citado por Isherwood, 1992.
Estados Unidos	Carolina del Norte	40,0	-	McLaughlin <i>et al.</i> , 1997.

(continúa)

Cuadro II. 1. (Continuación)

País de origen	Localidad y/o tipo de roca	Cadmio [mg kg ⁻¹ roca]	Cadmio [mg kg ⁻¹ P]	Referencia
Estados Unidos	Carolina del Norte	47,0	-	Iretskaya <i>et al.</i> , 1998.
Estados Unidos	Carolina del Norte	48,0	-	Raven y Loeppert, 1997.
Estados Unidos	Carolina del Norte	-	380,0	FIFA, citado por Glendining, 2000.
Estados Unidos	Carolina del Norte	47,0	311,0	McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Estados Unidos	Carolina del Norte (calcinada)	43,0	300,0	FIFA, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Estados Unidos	Norte de Florida	41,0	-	Loganathan <i>et al.</i> , 1997.
Estados Unidos	Norte de Florida	3,0	56,0	Syers <i>et al.</i> , 1986.
Estados Unidos	Norte de Florida	8,0	45,0	Bokcman <i>et al.</i> , 1990 citado por Isherwood, 1992.
Estados Unidos	Florida 72%	9,0	63,0	FIFA, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Estados Unidos	Florida 73,5%	13,0	89,0	FIFA, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Estados Unidos	Florida 74/75%	17,0	114,0	FIFA, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Estados Unidos	Florida 68%	16,0	115,0	FIFA, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Estados Unidos	Oeste de Estados Unidos	60-340	-	Auer, 1977, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Israel	Arad	12,0	85,0	Syers <i>et al.</i> , 1986, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Israel	Neguev	20,0	-	Bokcman <i>et al.</i> , 1990 citado por Isherwood, 1992.
Israel	Zin	32,0	228,0	Bramley, 1990, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Jordania	s/l	4,0	-	Syers <i>et al.</i> , 1986.
Jordania	s/l	-	34,0	Bokcman <i>et al.</i> , 1990 citado por Isherwood, 1992.
Jordania	s/l	-	35-135	FIFA, citado por Glendining, 2000.

(continúa)

Cuadro II. 1. (Continuación)

País de origen	Localidad y/o tipo de roca	Cadmio [mg kg ⁻¹ roca]	Cadmio [mg kg ⁻¹ P]	Referencia
Jordania	s/i	5,0	-	Loganathan <i>et al.</i> , 1997.
Jordania	s/i	6,0	27,0	Bramley, 1990, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Marruecos	Khouribga 68 K11	12,0	88,0	FIFA, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Marruecos	Khouribga 72 K20	24,0	167,0	FIFA, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Marruecos	Youssoufia 68 Y1	23,0	169,0	FIFA, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Marruecos	Youssoufia 73,5 Y2	33,0	225,0	FIFA, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Marruecos	Boucraa	38,0	240,0	McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
México	s/i	8,0	57,0	Syers <i>et al.</i> , 1986.
Perú	Sechura	11,0	84,0	Syers <i>et al.</i> , 1986, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Rusia	Kola	0,2	0,9	Bokcman <i>et al.</i> , 1990 citado por Isherwood, 1992.
Rusia	Kola	0,2	1,0	Singh, 1991, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Rusia	Otros	0,1	-	Finck, 1972, citado por Mortvedt, 1996.
Senegal	s/i	90,0	570,0	FIFA, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Siria	Khneifiss	5,0	36,0	FIFA, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Siria	Sector Este	5,0	38,0	FIFA, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Sud Africa	Phalaborwa	4,0	23,0	Williams, 1974, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Tilemsi	s/i	1,3	-	Raven y Loeppert, 1997.

(continúa)

Cuadro II. 1. (Continuación)

País de origen	Localidad y/o tipo de roca	Cadmio [mg kg ⁻¹ roca]	Cadmio [mg kg ⁻¹ P]	Referencia
Túnez	Gafsa	38,0	108,0	Syers <i>et al.</i> , 1986, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Vanuatu	Makatea	10,0	77,0	Syers <i>et al.</i> , 1986, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Mali (Africa)	Togo	54,0	350,0	Iretskaya <i>et al.</i> , 1998.
Mali (Africa)	Togo	51,0	320,0	FIFA, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.
Africa	Otros	55,0	-	Bokcman <i>et al.</i> , 1990 citado por Isherwood, 1992.
Otros orígenes	Banaba (Isla Oceánica)	99,0	563,0	Williams, 1974, citado por McLaughlin <i>et al.</i> , 1996.

^aFIFA: Federación de Industrias de Fertilizantes de Australia.

Fuente: Elaborado con datos recopilados por Valenzuela, 2001

ANEXO III

Cuadro III. 1. Base de datos determinados experimentalmente, por distintos autores, utilizada para estimar el valor de K_D [L kg⁻¹] en las series de suelos estudiadas.

N	K_D [Lkg ⁻¹]	pH	MO[%] ^a	Ref. ^b	N	K_D [Lkg ⁻¹]	pH	MO[%] ^a	Ref. ^b
1	1.743,00	7,90	2,40	1	50	25,51	4,90	4,10	3
2	337,00	6,15	5,00	1	51	31,77	5,00	8,10	3
3	123,00	4,70	13,10	1	52	548,32	6,10	8,40	3
4	1.039,00	6,95	5,20	1	53	185,89	5,50	6,20	3
5	4.647,00	7,90	6,40	1	54	146,65	5,40	4,50	3
6	868,00	7,30	2,70	1	55	175,69	5,40	12,80	3
7	589,00	7,40	1,60	1	56	16,90	5,10	9,00	3
8	1.743,00	7,90	2,40	1	57	40,00	5,30	8,30	3
9	799,00	7,90	1,10	1	58	305,90	6,10	8,80	3
10	717,00	6,80	4,40	1	59	80,70	5,10	22,80	3
11	505,00	6,65	3,80	1	60	154,20	5,40	23,10	3
12	1.922,00	7,25	6,40	1	61	1.147,50	6,20	21,90	3
13	103,00	4,55	13,50	1	62	45,60	4,90	29,80	3
14	874,00	6,00	15,90	1	63	108,10	5,30	29,50	3
15	46,00	5,15	2,65	1	64	595,50	5,90	30,50	3
16	494,00	5,80	11,80	1	65	385,10	5,00	51,20	3
17	61,00	4,70	6,50	1	66	451,90	5,30	47,90	3
18	6,00	4,30	1,10	1	67	895,90	5,90	49,30	3
19	43,00	4,85	3,70	1	68	236,10	4,90	59,00	3
20	757,00	6,60	6,10	1	69	392,20	5,10	59,10	3
21	446,00	5,70	12,20	1	70	1.163,50	5,80	57,10	3
22	640,00	6,15	9,50	1	71	91,40	5,10	19,70	3
23	3.012,00	7,10	12,30	1	72	251,90	5,70	15,90	3
24	2.213,00	7,70	4,00	1	73	348,20	6,10	17,90	3
25	550,00	5,10	34,00	1	74	155,00	5,69	2,20	4
26	1.580,00	6,80	9,70	1	75	57,00	4,12	5,30	4

(Continúa).

Cuadro III. 1. (Continuación)

N	K_D [Lkg ⁻¹]	pH	MO[%]	Ref.	N	K_D [Lkg ⁻¹]	pH	MO[%]	Ref.
---	----------------------------	----	-------	------	---	----------------------------	----	-------	------

27	396,00	5,50	14,20	1	76	314,00	5,14	8,60	4
28	1.825,00	6,60	14,70	1	77	18,00	4,74	0,80	4
29	5.437,00	7,10	22,20	1	78	116,00	5,57	1,90	4
30	475,00	5,15	27,40	1	79	28,00	4,77	1,20	4
31	1.010,00	6,65	7,60	1	80	35,00	6,44	0,20	4
32	424,00	6,80	2,60	1	81	97,00	5,22	2,40	4
33	717,00	6,80	4,40	1	82	325,00	6,02	3,10	4
34	810,00	6,00	7,00	2	83	6,00	4,18	0,50	4
35	583,00	4,70	73,30	2	84	27,00	4,67	1,30	4
36	2.864,00	6,00	39,10	2	85	104,00	4,69	4,90	4
37	9,00	4,00	2,60	2	86	47,00	5,78	0,60	4
38	18,00	5,10	0,50	2	87	308,00	6,03	2,90	4
39	719,00	6,50	4,40	2	88	288,00	6,17	2,30	4
40	5,00	4,20	2,70	2	89	140,00	6,00	5,38	5
41	1.211,00	6,70	5,40	2	90	117,00	6,14	3,88	5
42	83,00	4,50	7,60	2	91	193,00	6,15	9,73	5
43	70,00	5,50	3,90	2	92	101,00	6,12	3,68	5
44	1.294,00	6,00	4,40	2	93	52,00	4,85	6,50	5
45	39,34	5,00	16,60	3	94	1.398,00	7,14	2,93	5
46	80,40	4,90	22,40	3	95	1.326,00	7,08	23,91	5
47	107,21	5,20	11,60	3	96	6,00	3,33	6,39	5
48	107,21	4,80	14,30	3	97	199,00	5,69	7,92	5
49	136,41	5,20	9,50	3					

^a Materia Orgánica.

^b Referencias: (1) Gerritse and van Driel, 1984, (2) Janssen *et al.*, 1995, (3) Gray *et al.*, 1999, (4) Lee *et al.*, 1996, (5) Lambkin, 1999.

Cuadro III. 2. Estimación logarítmica múltiple: coeficientes y errores estándares.

	Coeficientes	Error estándar
Intercepto	0,03660953	0,46148755
Variable pH	4,14038908	0,07670625
Variable MO	1,04442125	0,00500300

Cuadro III. 3. Estadígrafos de la estimación logarítmica múltiple.

Estadígrafo	Valor
R^2	0,80
Error estándar de la correlación	0,72
Estadístico F	186,53
Grados de libertad	94,00
Suma Cuadrados Regresión	195,16
Suma Cuadrados Error	49,18