



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE CONTAMINAR
MANTOS FREÁTICOS POR INFILTRACIÓN DE
HERBICIDA ATRAZINA EN DISTRITOS DE RIEGO
EN MÉXICO”**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

(AMBIENTAL-AGUA)

P R E S E N T A:

MARIANA VILLADA CANELA

TUTOR:

DRA. ANNE M. HANSEN HANSEN



2006

Esta tesis esta dedicada al primer motor de mi vida - lo esencial -, es decir, todas aquellas personas que amaré y me amarán por siempre: mi familia, mis verdaderos amigos y yo misma.

Finalmente, después de un gran esfuerzo, he aquí lo que considero es cierto; no es todo, pero sí una parte importante para mí y para los lectores interesados. Este es un documento que traté de expresar de una forma clara para que encuentren en mi argumentación suficientes razones para estar de acuerdo con ello o al menos para reconsiderar lo que creen.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca otorgada para la realización de estudios de la maestría en Ingeniería Ambiental, así como a la Dirección General de Estudios de Posgrado (DGEP) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por la beca complementaria.

A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería (DEPFI), Campus Morelos, que se ubica dentro de las instalaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Al Dr. Manfred van Afferden, por su paciencia, entusiasmo y compromiso en la dirección de esta tesis.

A la Dra. Anne Hansen Hansen, por ser mi tutor principal y permitirme participar en los proyectos de investigación a su cargo.

A la Dra. Rosario Iturbe Argüelles y Dra. Frida León Rodríguez, como tutoras para la revisión de esta tesis de maestría, por sus comentarios y sugerencias.

A los sinodales Dr. Simón González Martínez y a la M. en A. Ma. Antonieta Gómez Balandra, por aceptar ser parte del jurado.

A Luis Carlos González Márquez, Rosa Angélica Guillen Garcés, y Diana Navarro por su colaboración y compañerismo en el laboratorio de Hidrogeoquímica del IMTA.

A mis compañeros y amigos del IMTA, por su apoyo y consejos.

Agradezco también a los funcionarios que proporcionaron información para la realización de este trabajo de investigación:

A los Jefes de los 49 distritos de riego de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) siguientes:

066	SANTO DOMINGO, B.C.S.	090	BAJO RIO CONCHOS, CHIH.
037	ALTAR PITIQUITO, SON.	017	REGION LAGUNERA, COAH. Y DGO.
038	RIO MAYO, SON.	053	EDO. DE COLIMA, COL.
083	PAPIGOCHIC, CHIH.	094	JALISCO SUR, JAL.
051	COSTA DE HERMOSILLO, SON.	020	MORELIA, MICH.
076	VALLE DEL CARRIZO, SIN.	087	ROSARIO-MEZQUITE, MICH.
108	ELOTA-PIAXTLA, SIN.	085	LA BEGOÑA, GTO.
063	GUASAVE, SIN.	093	TOMATLAN, JAL.
030	VALSEQUILLO, PUE.	033	EDO. DE MEXICO, MEX.
056	ATOYAC-ZAHUAPAN, TLAX.	024	CIENEGA DE CHAPALA, MICH.
068	TEPECOACUILCO, GRO.	096	ARROYO ZARCO, MEX.
016	EDO. DE MORELOS, MOR.	002	MANTE, TAMPS.
057	AMUCO-CUTZAMALA, GRO.	086	SOTO LA MARINA, TAMPS.
105	NEXPA, GRO.	029	XICOTENCATL, TAMPS.
104	CUAJINICUILAPA, GRO.	044	JILOTEPEC, MEX.
095	ATOYAC, GRO.	092	RÍO PÁNUCO, VER-TAMPS
006	PALESTINA, COAH.	035	LA ANTIGUA, VER.
031	LAS LAJAS, N.L.	059	RIO BLANCO, CHIS.
042	BUENAVENTURA, CHIH.	101	CUXTEPEQUES, CHIS.
103	RIO FLORIDO, CHIH.	107	SAN GREGORIO, CHIS.
026	BAJO RIO SAN JUAN, TAMPS.	048	TICUL, YUC.
005	DELICIAS, CHIH.	073	LA CONCEPCION, MEX.
025	BAJO RIO BRAVO, TAMPS.	088	CHICONAUTLA, MEX.
004	DON MARTIN, COAH. Y N.L.	011	ALTO RIO LERMA, GTO.
089	EL CARMEN, CHIH.		

Al Ing. Jorge A. Lomelí Osuna, jefe de distrito, y al Ing. Belisario Armenta Bojórquez, técnico del área de Tecnología de Riego y Drenaje (063 – Guasave, Sinaloa); al Ing. Tirso Margarito Lobato Posadas, jefe de distrito, y al Ing. Joaquín Márquez Castillo, subjefe de distrito (035 – La Antigua, Veracruz); al Ing. Margarito de la Cruz Gallegos, jefe de distrito, y al Ing. Leopoldo Bravo Villanueva, subjefe de distrito (087 – Rosario-Mezquite, Michoacán), por las facilidades otorgadas para la realización de los muestreos de agua subterránea en estos distritos de riego.

A los Ing. Vicente Grosvenor Galaz López (Guasave, Sinaloa), Ing. Jorge A. Mendoza Galarza (006 La Antigua, Veracruz), e Ing. Héctor Rojas Romero (090 La Piedad, Michoacán), jefes de Distrito de Desarrollo Rural (DDR's), por la información sobre el uso de Atrazina en los distritos de riego de estudio.

A la Lic. Sara Ávila Forcada y Q.B. Ma. Teresa Ortuño Arzate, del Instituto Nacional de Ecología (INE), por la información sobre el uso de Atrazina en México.

CONTENIDO

	PAGINA
INTRODUCCIÓN.....	1
JUSTIFICACIÓN.....	2
OBJETIVOS.....	2
1. ANTECEDENTES	
1.1 Situación actual del uso de Atrazina en el mundo.....	4
1.2 Situación actual del uso de Atrazina en México.....	5
1.3 Normatividad en México y el mundo para el uso de Atrazina.....	8
1.4 Convenios internacionales y Atrazina.....	10
1.5 Tratamiento de agua potable que contiene Atrazina.....	12
2. MARCO TEORICO	
2.1 Herbicidas.....	13
2.2 Características de la Atrazina.....	13
2.3 Efectos sobre la salud y ambientales.....	16
2.4 Factores que influyen en la infiltración de contaminantes hacia suelo y aguas subterráneas.....	17
2.5 Procesos de transporte de contaminantes.....	19
2.4.1 Adsorción.....	19
2.4.2 Biodegradación.....	20
2.4.3 Advección.....	22
2.4.4 Dispersión.....	22
2.4.5 Difusión.....	23
3. BASE DE DATOS	
3.1 Diseño de la Base de datos.....	24
3.2 Recopilación de información.....	26

3.3	Resultados de la Base de datos.....	29
3.3.1	<i>Información agrícola.....</i>	31
3.3.2	<i>Información de las características del suelo.....</i>	32
3.3.3	<i>Infraestructura para el abastecimiento de agua.....</i>	34
3.3.4	<i>Aplicación de Atrazina.....</i>	35
4.	SELECCIÓN DE DISTRITOS DE RIEGO DE ESTUDIO	
4.1	Filtrado de información de la base de datos.....	37
4.1.1	<i>Resultados del caso 1: Profundidad mínima de manto freático.....</i>	37
4.1.2	<i>Resultados del caso 2: Número de pozos para consumo humano.....</i>	39
4.1.3	<i>Resultados del caso 3: Información agrícola.....</i>	39
4.1.4	<i>Resultados del caso 4: Características del suelo.....</i>	39
4.1.5	<i>Resultados del caso 5: Aplicación de Atrazina.....</i>	41
4.2	Identificación de los distritos de riego de estudio.....	41
5.	CARACTERIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE DISTRITOS DE RIEGO DE ESTUDIO	
5.1	Distrito de riego 063 - Guasave, Sinaloa.....	43
5.1.1	<i>Ubicación.....</i>	43
5.1.2	<i>Clima.....</i>	43
5.1.3	<i>Geología y edafología.....</i>	43
5.1.4	<i>Hidrología.....</i>	44
5.1.5	<i>Agricultura.....</i>	44
5.2	Distrito de riego 035 – La Antigua, Veracruz.....	47
5.2.1	<i>Ubicación.....</i>	47
5.2.2	<i>Clima.....</i>	48
5.2.3	<i>Geología y edafología.....</i>	48
5.2.4	<i>Hidrología.....</i>	49
5.2.5	<i>Agricultura.....</i>	49

5.3	Distrito de riego 087 – Rosario - Mezquite, Michoacán.....	52
5.3.1	<i>Ubicación.....</i>	52
5.3.2	<i>Clima.....</i>	52
5.3.3	<i>Geología y edafología.....</i>	52
5.3.4	<i>Hidrología.....</i>	53
5.3.5	<i>Agricultura.....</i>	53
6.	MUESTREO	
6.1	Plan de muestreo.....	55
6.2	Métodos y procedimientos de campo.....	57
6.3	Métodos y procedimientos de laboratorio.....	59
6.4	Muestreo en el Distrito de riego 063 – Guasave, Sinaloa.....	60
6.4.1	<i>Zona de muestreo I (7/12/2004).....</i>	62
6.4.2	<i>Zona de muestreo II (8/12/2004).....</i>	63
6.4.3	<i>Zona de muestreo II (9/12/2004).....</i>	64
6.4.4	<i>Cuantificación de Atrazina en muestras de agua subterránea.....</i>	66
6.5	Muestreo en el Distrito de riego 035 – La Antigua, Veracruz.....	67
6.5.1	<i>Zona de muestreo I (18/04/2005).....</i>	69
6.5.2	<i>Zona de muestreo II (19/04/2005).....</i>	70
6.5.3	<i>Zona de muestreo III (19/04/2005).....</i>	71
6.5.4	<i>Cuantificación de Atrazina en muestras de agua subterránea.....</i>	73
6.6	Muestreo en el distrito de riego 087 – Rosario-Mezquite, Michoacán.....	74
6.6.1	<i>Zona de muestreo I (23/05/2005).....</i>	76
6.6.2	<i>Zona de muestreo II (23/05/2005).....</i>	77
6.6.3	<i>Zona de muestreo III (23/05/2005).....</i>	78
6.6.3	<i>Zona de muestreo IV (24/05/2005).....</i>	78
6.6.3	<i>Zona de muestreo V (24/05/2005).....</i>	79
6.6.6	<i>Cuantificación de Atrazina en muestras de agua subterránea.....</i>	80

7.	MODELACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE CONTAMINAR MANTOS FREÁTICOS	
7.1	Modelación matemática del transporte de plaguicidas hacia aguas subterráneas.....	81
7.2	Programa PELMO (Pesticide Leaching Model).....	81
7.2.1	Descripción del modelo numérico.....	84
7.3	Diseño de escenarios para la simulación.....	89
7.4	Resultados de la simulación en los distritos de riego de estudio.....	90
7.4.1	Simulación en el distrito de riego 063 - Guasave, Sinaloa.....	90
7.4.2	Simulación en el distrito de riego 035 – La Antigua, Veracruz.....	92
7.4.3	Simulación en el distrito de riego 087 – Rosario-Mezquite, Michoacán.....	93
8.	ESTIMACIÓN DE RIESGOS	
8.1	Estimación del riesgo de contaminar mantos freáticos.....	96
8.2	Resultados de la estimación de riesgos.....	97
8.3	Medidas para la reducción de Atrazina en agua subterránea.....	98
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
9.1	Conclusiones.....	100
9.2	Recomendaciones.....	102
10.	REFERENCIAS.....	103
11.	ANEXOS	
	Anexo A. Base de datos de los distritos de riego en México.....	111
	Anexo B. Datos climatológicos de precipitación de los distritos de riego de estudio.....	112
	Anexo C. Descripción de los parámetros empleados para la simulación en PELMO.....	121
	Anexo D. Concentraciones de Atrazina de las simulaciones con PELMO.....	125
	Anexo E. Análisis de sensibilidad del modelo PELMO.....	127

INDICE DE FIGURAS

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Molécula de Atrazina ($C_8H_{14}ClN_5$).....	14
Figuras 2.2. Efectos de Atrazina en maleza.....	14
Figura 2.3. Aplicación del herbicida Atrazina con tractor y con mochila.....	15
Figura 2.4 Procesos que afectan el transporte de contaminantes.....	19
Figura 3.1. Formato de los datos solicitados a los distritos de riego.....	28
Figura 3.2. Regionalización de los distritos de riego en la base de datos.....	29
Figura 3.3. Triángulo de clasificación de suelos.....	32
Figura 4.1. Base de datos con criterios para el filtrado y elección de los distritos de riego.....	38
Figura 5.1. Mapa del distrito de riego 063 - Guasave, Sinaloa.....	45
Figura 5.2. Mapa del distrito de riego 035 – La Antigua, Veracruz.....	51
Figura 5.3. Mapa del distrito de riego 087 – Rosario-Mezquite, Michoacán.....	54
Figura 6.1. Equipo para colecta de muestras y medición de conductividad eléctrica.....	56
Figura 6.2. Localización de puntos de muestreo en el distrito de riego 063.....	61
Figura 6.3. Pozo de uso agrícola en la zona de muestreo I.....	62
Figura 6.4. Colecta de muestras de agua en zona de muestreo I.....	63
Figura 6.5. Pozo de uso agrícola en la zona de muestreo II.....	63
Figura 6.6. Colecta de muestras de agua en zona de muestreo II.....	64
Figura 6.7. Pozo de consumo humano en zona de muestreo III.....	65
Figura 6.8. Colecta de muestras de agua de grifo y de noria en zona de muestreo III.....	65
Figura 6.9. Localización de puntos de muestreo en el Distrito de Riego 035.....	68
Figura 6.10. Pozo de uso agrícola y colecta de muestra de suelo en la zona de muestreo I.....	69
Figura 6.11. Colecta de muestras de agua en zona de muestreo I.....	70
Figura 6.12. Pozo de uso agrícola en la zona de muestreo II.....	70
Figura 6.13. Colecta de muestras de agua en zona de muestreo II.....	71
Figura 6.14. Pozos agrícolas en zona de muestreo III.....	72

Figura 6.15. Colecta de muestras de agua y suelo en zona de muestreo III.....	72
Figura 6.16. Localización de puntos de muestreo en el distrito de riego 087.....	75
Figura 6.17. Pozo de uso agrícola y colecta de muestra de suelo en la zona de muestreo I.....	76
Figura 6.18. Pozo de consumo humano en la zona de muestreo I.....	76
Figura 6.19. Pozo de uso agrícola y muestra de suelo en la zona de muestreo II.....	77
Figura 6.20. Noria y pozo de consumo humano en la zona de muestreo II.....	77
Figura 6.21. Pozo - Noria y muestra de suelo en zona de muestreo III.....	78
Figura 6.22. Pozo doméstico y pozo de uso agrícola en zona de muestreo IV.....	78
Figura 7.1. Concentración de Atrazina en el manto freático del DR 063.....	91
Figura 7.2. Infiltración de Atrazina en el DR 063.....	91
Figura 7.3. Concentración de Atrazina en el manto freático del DR 035.....	92
Figura 7.4. Infiltración de Atrazina en el DR 035.....	93
Figura 7.5 Concentración de Atrazina en el manto freático del distrito de DR 087.....	94
Figura 7.6. Infiltración de Atrazina en el DR 087.....	94

INDICE DE TABLAS

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Comercialización en México de herbicidas que contienen Atrazina.....	6
Tabla 1.2. Datos de la utilización en México de herbicidas que contienen Atrazina.....	7
Tabla 1.3. Situación legal de Atrazina en agua para consumo humano.....	9
Tabla 1.5. Eficiencias de remoción de Atrazina según tecnología de tratamiento de agua.....	12
Tabla 2.1. Propiedades de la Atrazina.....	15
Tabla 3.1. Listado de distritos de riego con información para la selección.....	30
Tabla 3.2. Total de distritos de riego con información.....	30
Tabla 3.3. Información agrícola de los distritos de riego en México.....	31
Tabla 3.4. Resultados de la información de suelo de los distritos de riego en México.....	33
Tabla 3.5. Profundidades promedio de manto freático por intervalo en los distritos de riego.....	33
Tabla 3.6. Resultados del total de pozos en los distritos de riego en México.....	34
Tabla 3.7. Resultados de dosis de Atrazina empleadas en los distritos de riego en México.....	35
Tabla 3.8. Resultados del uso de Atrazina en los distritos de riego en México.....	36
Tabla 3.9. Resultados de estimaciones de Atrazina en los distritos de riego en México.....	36
Tabla 4.1. Resultados del prefiltrado de información de los distritos de riego.....	37
Tabla 4.2. Resultados del filtrado de los distritos de riego por profundidad mínima de manto freático.....	38
Tabla 4.3. Resultados del filtrado de los distritos de riego por número de pozos para consumo humano.....	39
Tabla 4.4. Resultados del filtrado de los distritos de riego por superficie de cultivo.....	40
Tabla 4.5. Resultados del filtrado de los distritos de riego por textura de suelo.....	40
Tabla 4.6. Resultados del filtrado de los distritos de riego por aplicación de Atrazina.....	41
Tabla 4.7. Resultados del filtrado de los distritos de riego.....	42
Tabla 4.8. Características de los distritos de riego más vulnerables.....	42
Tabla 5.2. Principales plaguicidas utilizados en el distrito de riego 063 (ciclo otoño-invierno 1998 -1999).....	46
Tabla 5.3. Herbicidas aplicados en el distrito de riego 063.....	47
Tabla 5.4. Principales plaguicidas utilizados en el distrito de riego 035.....	50

Tabla 5.5. Principales plaguicidas utilizados en el distrito de riego 087.....	54
Tabla 6.1. Requisitos de envasado y preservación de muestras.....	57
Tabla 6.2. Datos generales de los sitios de muestreo en el distrito de riego 063.....	66
Tabla 6.3. Resultados de laboratorio de las concentraciones de Atrazina en muestras de agua subterránea del distrito de riego 063.....	67
Tabla 6.4. Datos generales de los sitios de muestreo distrito de riego 035.....	73
Tabla 6.5. Resultados de laboratorio de las concentraciones de Atrazina en muestras de agua subterránea del distrito de riego 035.....	74
Tabla 6.6. Datos generales de los sitios de muestreo en el distrito de riego 087.....	79
Tabla 6.7. Resultados de laboratorio de las concentraciones de Atrazina en muestras de agua subterránea del distrito de riego 087.....	80
Tabla 7.1. Parámetros de entrada para PELMO.....	82
Tabla 7.2. Resumen de los procesos simulados en PELMO.....	83
Tabla 7.3. Cuadro resumen de escenarios simulados.....	89
Tabla 7.4. Factores de transformación con respecto a la profundidad.....	73
Tabla 7.5. Resultados de la simulación para los diferentes escenarios.....	95
Tabla 8.1. Riesgo por infiltración de Atrazina (Precipitación pluvial alta).....	97
Tabla 8.2. Riesgo por infiltración de Atrazina (Precipitación pluvial baja).....	97
Tabla 8.3. Impacto de prácticas de manejo de Atrazina.....	98
Tabla 9.1. Resumen de concentraciones de Atrazina en muestreos y simulación.....	101
Tabla A.1. Base de datos con información de los distritos de riego.....	111
Tabla B.1. Precipitación pluvial mensual (mm), distrito de riego 063. Periodo 1969-1996.....	112
Tabla B.2. Precipitación pluvial alta en el distrito de riego 063 (año 1983).....	113
Tabla B.3. Precipitación pluvial baja en el distrito de riego 063 (año 1987).....	114
Tabla B.4. Precipitación pluvial mensual (mm), distrito de riego 035. Periodo 1961 – 1996.....	115
Tabla B.5. Precipitación pluvial alta en el distrito de riego 035 (año 1974).....	116
Tabla B.6. Precipitación pluvial baja en el distrito de riego 035 (año 1962).....	117
Tabla B.7. Precipitación pluvial mensual (mm), distrito de riego 087. Periodo 1974 – 1988.....	118
Tabla B.8. Precipitación pluvial alta en el distrito de riego 087 (año 1983).....	119
Tabla B.9. Precipitación pluvial baja en el distrito de riego 087 (año 1977).....	120
Tabla C.1. Datos de entrada para el archivo de características del herbicida (*.PSM).....	121

Tabla C.2. Datos de entrada para el archivo de características de suelo y cultivo (*.SZE).....	122
Tabla C.3. Datos de entrada para el archivo de datos meteorológicos (*.CLI).....	124
Tabla D.1. Concentraciones de Atrazina que entran al manto freático ($\mu\text{g L}^{-1}$).....	125
Tabla D.2. Concentraciones de lixiviado que entra al manto freático (g ha^{-1}).....	126
Tabla E.1. Valores del índice MAROV.....	128

NOTACIÓN

AMIPFAC	Asociación Mexicana de la Industria de Plaguicidas y Fertilizantes, A.C.
CAS	Chemical Abstrac Service
CICOPLAFEST	Comisión Intersecretarial para el Control del proceso y uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas
CNA o CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
DDR	Distrito de Desarrollo Rural
DR	Distrito de Riego
ERIC II	Extractor Rápido de Información Climatológica II
FOCUS	Co-ordination of Pesticide Fate Models and their Use
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
MAROV	Maximun Absolute Ratio Of Variation
PELMO	Pesticide Leaching Model
OMS / WHO	Organización Mundial de la Salud
SAGARPA	Secretaria de Agricultura, Ganadería, desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SARH	Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIAP	Servicio de Información y estadística Agroalimentaria y Pesquera
SINHDR	Sistema de Información Hidroagrícola de Distritos de Riego
UE	Unión Europea
USDA	United States Department of Agriculture
USEPA	United States Environmental Protection Agency
X_A :	Masa de A adsorbida por la fase sólida, [g]
m :	Masa de la fase sólida, [g]
K_F :	Coefficiente de adsorción, [L g ⁻¹]
C_{Ae} :	Concentración de A en la fase líquida, [g L ⁻¹]
n :	Coefficiente empírico o parámetro de ajuste, adimensional
S:	Es la concentración del compuesto orgánico, que va desde la concentración inicial (S_0) hasta la concentración en un tiempo determinado (S), [g L ⁻¹]
k_1 :	Velocidad de biodegradación, [d ⁻¹]
t:	Tiempo, de 0 a t, [s]
Q:	Gasto que pasa a través de la muestra, [m ³ s ⁻¹]
K:	Conductividad hidráulica, [m s ⁻¹]

A:	Área transversal de la muestra, [m ²]
i:	Gradiente hidráulico, [m m ⁻¹]
α:	Dispersividad, [m]
v:	Velocidad de poro, [m s ⁻¹]
D _m :	Difusión molecular, [m ² s ⁻¹]
F _m :	Flujo de masa del soluto, [g cm ⁻² •s ⁻¹]
D:	Coefficiente de difusión, [cm ² s ⁻¹]
C:	Concentración, [g mL ⁻¹]
x:	Longitud en la dirección del movimiento, [cm]
(SW) _i [†] :	Agua en el suelo, en la capa i, en el día t [cm]
P:	Precipitación [cm d ⁻¹]
SM:	Nieve derretida [cm d ⁻¹]
E _i :	Evaporación en la capa i [cm d ⁻¹]
U _i :	Transpiración en la capa i [cm d ⁻¹]
L _i :	Percolación fuera de la zona i [cm d ⁻¹]
Θ _i ^{†*} :	Contenido de agua en el suelo, en la capa i en el día t, más precolación de la capa de suelo i-1, antes de la ocurrencia de cualquier drenaje [m ³ m ⁻³]
Θ _i [†] :	Contenido de agua en el suelo, en la capa i y al final del día t [m ³ m ⁻³]
Θ _{FCi} :	Contenido de agua en el suelo a la capacidad de campo, en la capa i [m ³ m ⁻³]
α :	Parámetro de la velocidad de drenaje [L d ⁻¹]
Δt :	Paso de tiempo [d]
Θ _{FC} :	Capacidad de campo [cm ³ cm ⁻³]
F _{CL} :	Contenido de arcilla [%]
F _{Sl} :	Contenido de limo [%]
F _{SA} :	Contenido de arena [%]
E _{pot} :	Potencial diario de evapotranspiración [mm d ⁻¹]
f _{Haude} :	Factor mensual de Haude [mm h Pa ⁻¹]
ES _{In} :	Presión de vapor saturado a las 2:00 p.m. [h Pa]
RH:	Humedad relativa del aire a las 2:00 p.m. [%]
L _d :	Posibles horas de la luz solar por día [h]
ES _O :	Presión de vapor saturado a la temperatura media del aire [h Pa]
T :	Temperatura media del aire [°C]

T_t :	Temperatura del suelo, en el día t [°C]
$T_{t,aire}$:	Temperatura media del aire, en el día t [°C]
α :	Profundidad de la capa de suelo [cm]
K_f :	Constante de sorción en la ecuación de Freundlich [$(\mu\text{g g}^{-1})/(\mu\text{g mL}^{-1})$]
C_{sol} :	Concentración del plaguicida en el agua del suelo [$\mu\text{g mL}^{-1}$]
n :	Exponente de Freundlich
C_s :	Concentración adsorbida [$\mu\text{g g}^{-1}$]
C_{Si} :	Adsorción del día i , después de la primera aplicación
C_{Si+1} :	Adsorción del día $i+1$, después de la primera aplicación
F_{tiempo} :	Incremento anual de adsorción [%]
K_{Temp} :	Factor de corrección para la biodegradación, con base a la temperatura actual
Q :	Factor de incremento de la velocidad de degradación, dada por un incremento en la temperatura de 10°C
T_o :	Temperatura durante el experimento de biodegradación [°C]
T :	Temperatura actual del suelo [°C]
K_{moi} :	Factor de corrección para la biodegradación, con base a la humedad actual del suelo
θ :	Contenido de humedad actual del suelo [vol. %]
θ_o :	Humedad del suelo durante la prueba de biodegradación [%]
e :	Exponente
D :	Coefficiente de difusión en el aire [$\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$]
J_v :	Velocidad de volatilización [$\text{g cm}^{-2} \text{d}^{-1}$]
d :	Capa activa [cm]
H :	Constante de Henry
c_1 :	Concentración del plaguicida disuelto en la capa superficial [g cm^{-1}]
F_{UP} :	Factor de captura por las plantas
c_i :	Plaguicida disuelto en la capa de suelo i [g cm^{-3}]
ET_i :	Evapotranspiración actual [cm d^{-1}]
CS :	Concentración encontrada en la simulación [$\mu\text{g L}^{-1}$]
CL :	Concentración Límite (Límite Máximo Permisible) [$\mu\text{g L}^{-1}$]

INTRODUCCIÓN

El uso de herbicidas en la agricultura se ha incrementado significativamente en las últimas décadas, ya que estos contribuyen a la productividad agrícola por el control de malezas y la reducción de costos de producción. Sin embargo, representan un riesgo potencial para la salud humana y ambiental, debido a la posibilidad de contaminar el suelo y el agua superficial y/o subterránea. El efecto de los agroquímicos ha ganado considerable y seria atención por parte de investigadores, instituciones y múltiples autoridades en todo el mundo.

Por otro lado, la investigación en agroquímicos a nivel nacional es escasa y no está relacionada con su utilización en las diversas zonas agrícolas del país, ni con la variedad y existencia de estos, al igual que la ausencia de información para el uso de muchos herbicidas que han sido restringidos o limitados en algunos países, no así en México o América Latina.

En este estudio se analiza el caso de la Atrazina, un herbicida del grupo químico triazínico, empleado para el control de malezas en cultivos de maíz, cereales, pastos y frutas.

En México, los distritos de riego son áreas agrícolas administradas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), con una superficie que cuenta con infraestructura de riego de 3.4 millones de hectáreas, distribuidas en 82 distritos de riego (Yuso, 2003). Los distritos de riego cumplen de este modo con la función económica de aumentar el volumen de la producción mediante la modernización de los métodos de riego y de las prácticas agrícolas, lo que incluye el uso de herbicidas, tales como la Atrazina.

A nivel mundial, este herbicida se encuentra entre los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP's), formando parte del Anexo del Convenio de Estocolmo y su uso está prohibido en varios países de la Unión Europea, ya que ha sido detectado en cuerpos de agua en zonas agrícolas (Franti *et al.*, 1996). El alcance del trabajo de tesis es el de determinar el riesgo asociado al uso de Atrazina en distritos de riego previamente seleccionados en función de la aplicación de este herbicida, debido a la posibilidad de contaminar el suelo y manto

freático por infiltración, de manera que dicho estudio permita establecer los riesgos por su empleo y posteriormente el antecedente normativo que limite o restrinja su uso en México.

La importancia de la evaluación del riesgo por la infiltración de Atrazina en el agua, radica en investigar las bases que permitan balancear los aspectos de fertilidad del suelo y la calidad del agua para abastecimiento y uso humanos.

JUSTIFICACIÓN

La Atrazina es uno de los compuestos más utilizados en México del grupo de los herbicidas triazínicos. El uso de dicho compuesto está restringido en países como Italia, Alemania, Suecia, Dinamarca, Países Bajos, Austria, Hungría, Reino Unido y Estados Unidos. Se asocia con toxicidad crónica y potencial por su acumulación como sustancia recalcitrante en cuerpos de agua y la exposición en agua para consumo humano. En México no está regulado el uso de Atrazina y se utiliza actualmente en varias regiones para control de hierbas en cultivos de maíz, sorgo, caña de azúcar, piña, etc., por lo que es necesario investigar el riesgo por su empleo en distritos de riego en el país.

OBJETIVOS

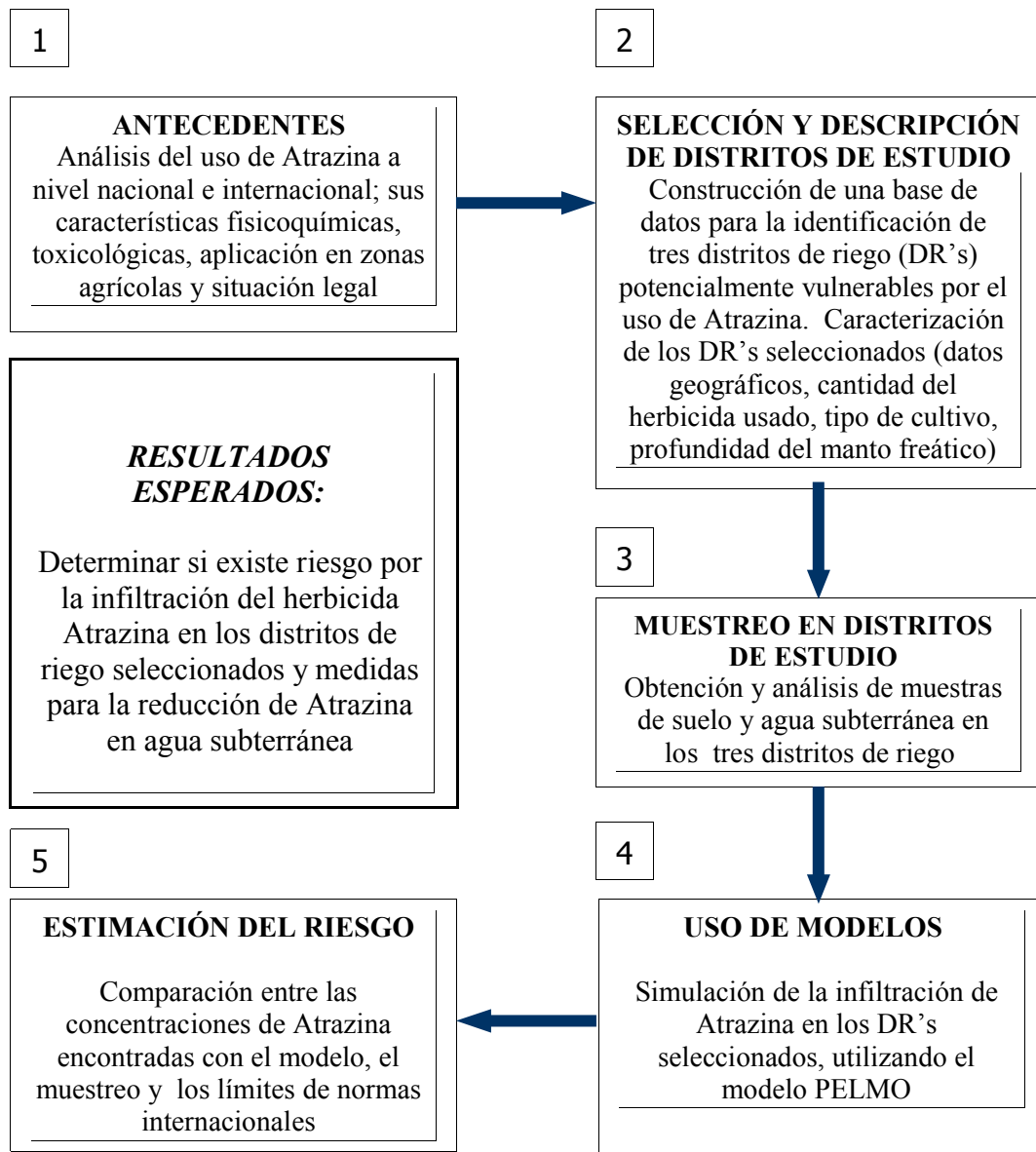
Objetivo general

- ❑ Determinar el riesgo de contaminación por infiltración de Atrazina a agua subterránea en tres distritos de riego de México.

Objetivos específicos

- ❑ Especificar el uso del herbicida en el país.
- ❑ Seleccionar y caracterizar tres distritos de riego.
- ❑ Cuantificar las concentraciones de Atrazina en el manto freático en los tres distritos de riego mediante muestreos de agua subterránea y empleando la simulación numérica.
- ❑ Describir medidas para reducir las concentraciones de Atrazina en el agua subterránea.

La metodología llevada a cabo durante el desarrollo de la presente tesis se muestra en el siguiente diagrama:



RESUMEN

La Atrazina es actualmente uno de los herbicidas más empleados a nivel mundial, de degradación biológica variable y un contaminante detectado en cuerpos de agua en las zonas agrícolas. Forma parte del Anexo del Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes (COP's), y su uso está restringido o prohibido en varios países de la Unión Europea, ya que se asocia con una alta toxicidad crónica y potencial de acumular como sustancia recalcitrante en agua superficial y subterránea. En México, la utilización de este herbicida no está regulada y es de amplia aplicación en zonas del cultivo del país, tales como los distritos de riego (DR's).

Con base en ello, el objetivo principal de esta investigación fue determinar el riesgo de contaminación por infiltración de Atrazina a mantos freáticos en tres distritos de riego.

En la presente investigación se expuso la situación actual del uso del herbicida a nivel nacional e internacional y sus características fisicoquímicas, toxicológicas, su aplicación en zonas agrícolas y situación legal. Se describieron los factores que permiten el transporte de contaminantes en suelos y hacia agua subterránea.

Se elaboró una base de datos con información de los DR's a nivel nacional para identificar aquellos que son potencialmente vulnerables a presentar contaminación del agua subterránea por este herbicida. Se eligieron tres DR's de estudio: 063 – Guasave, Sinaloa; 035 – La Antigua, Veracruz; y 087 – Rosario-Mezquite, Michoacán, definiéndose para cada uno datos geográficos (clima, hidrología, geología, edafología) y datos de campo (cantidad del herbicida usado, tipo de cultivo, situación del manto freático, entre otros). Mediante la aplicación de encuestas en los DR's del país, se encontró que se emplean dosis de Atrazina del orden $4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, con una dosis recomendada de $1-2 \text{ kg ha}^{-1}$ por aplicación.

Se describieron los resultados de los muestreos realizados en suelos agrícolas y aguas subterráneas en los distritos de riego seleccionados, con el fin de alimentar un modelo con

datos de campo y datos experimentales, así como para conocer la calidad del agua subterránea de los distritos de estudio con relación al uso de Atrazina.

Respecto a los resultados obtenidos por el muestreo, se realizó la simulación para la estimación de riesgos de contaminación del agua subterránea con base en el programa Pesticide Leaching Model (PELMO). Se estudió la infiltración del herbicida bajo dos diferentes escenarios para cada distrito, considerando eventos de alta y baja precipitación pluvial. Para el caso de precipitación pluvial alta en dos de tres DR's, bajo las condiciones y escenarios descritos, es probable que presenten concentraciones de Atrazina en el agua subterránea que exceden los límites establecidos por la normatividad internacional, como la de la OMS, con $2 \mu\text{g L}^{-1}$, y el de la USEPA, con $3 \mu\text{g L}^{-1}$ en agua para consumo humano. En el caso de precipitación pluvial baja, se observa que existe riesgo de infiltración de Atrazina al manto freático para los mismos DR's.

Se realizó la estimación del riesgo con base a los resultados de la modelación y se describieron medidas para la reducción de Atrazina en el agua subterránea. De esta forma, la metodología expuesta en este trabajo puede constituir una base de toma de decisiones para la reglamentación del uso de Atrazina en México.

1. ANTECEDENTES

1.1 Situación actual del uso de Atrazina en el mundo

La Atrazina, nombre con que se identifica al 6-cloro-*N*-etil-*N'*-(1-metiletil)-1,3,5-triazina- 2,4-diamina (No. CAS 1912-24-9), es un herbicida selectivo aplicado al suelo, registrado en 1958 y ampliamente usado desde principios de la década de 1960 en Norteamérica, Australia, Sudáfrica, Venezuela y la mayoría de los países europeos para controlar la aparición de malezas en cultivos, principalmente de maíz, sorgo, caña de azúcar, trigo, y varios tipos de pastos, el crecimiento de malezas acuáticas en lagos y estanques, en campos de golf, en céspedes y a lo largo de carreteras o vías férreas. A nivel mundial se emplean aproximadamente entre 70 y 90 millones de kilogramos de Atrazina por año (Steinberg *et al.*, 1995).

Actualmente, la Atrazina esta siendo asociada a un gran número de riesgos para la salud, ya que puede contaminar las fuentes de abastecimiento de agua potable, introduciéndose en las aguas superficiales cuando el agua y el suelo destinados a la agricultura contienen residuos de ésta. Se estima que este herbicida es el que más se utilizó a finales de 1980 en EUA, encontrándose concentraciones de $5.4 \mu\text{g L}^{-1}$ en abastecimientos de agua potable. En 1988, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) inició una Revisión Especial del posible riesgo cancerígeno de Atrazina. En 1991 esta agencia fijó una concentración máxima de Atrazina en agua potable, de $3 \mu\text{g L}^{-1}$. Asimismo, para proteger la calidad de agua para consumo humano, en 1993 el gobierno de los EUA restringió el uso de Atrazina para control de la vegetación en zonas no agrícolas. En noviembre de 1994, la EPA inicia una Revisión Especial a los herbicidas triazínicos basada en el riesgo potencial cancerígeno debido a la exposición y consumo de alimentos y agua potable. En enero del 2003, la USEPA emitió una *Decisión Provisional* para una evaluación multianual, que aclare si existe riesgo de contraer cáncer como consecuencia a la exposición por Atrazina. También concluyó que la Atrazina puede continuar siendo utilizada, siempre y cuando se sigan las precauciones y las medidas específicas para reducir los riesgos de contaminación del agua para consumo y que ayuden a asegurar su continua protección. En noviembre de 2003 se

publicó que la USEPA debe completar una evaluación del riesgo para los plaguicidas triazínicos. La revisión del documento de Propuesta Provisional de Reregistro de la Atrazina (IRED) no se considera un registro final, por lo que queda pendiente hasta febrero de 2004 determinar si los niveles de Atrazina en agua rebasan el límite definido por la USEPA mediante un programa de monitoreo de cuencas en varios estados. Se espera que EPA termine una evaluación de riesgo acumulativo en el invierno del 2005 (USEPA, 2003).

En el caso de los países europeos como Italia y Alemania, han prohibido el uso de este herbicida debido a que se han encontrado residuos de Atrazina en cuerpos de agua que exceden las concentraciones establecidas por cada país (Giupponi, 2001 y Tappe *et al.*, 2002). Aún después de varios años de haber prohibido este herbicida, considerables cantidades de Atrazina y sus metabolitos siguen encontrándose en el agua subterránea. La peligrosidad que representa la presencia de Atrazina en los alimentos y agua, incluso a niveles muy bajos, afecta de tal manera a los ecosistemas que la Unión Europea (UE) redactó la "Decisión de la Comisión del 10 de marzo del 2004" por el que se insta a todos los estados miembros a que en un plazo breve sean retiradas todas las licencias de fabricación de productos fitosanitarios que contengan Atrazina. En la citada decisión, se insta a España, Irlanda, Portugal y el Reino Unido para que únicamente se utilice Atrazina en los cultivos de maíz y hasta Junio del 2007, donde quedará definitivamente prohibido su uso (CEE, 2004).

La Autoridad de Inscripción Nacional de Australia (NRA) ha realizado revisiones de la seguridad del uso de Atrazina por varios años. En abril del 2002, la NRA emitió un reporte en el que a partir de varios muestreos de calidad del agua superficial y subterránea, se recomienda incluir cambios en las etiquetas de productos que contienen atrazina (NRA, 2002).

1.2 Situación actual del uso de Atrazina en México

El uso de la Atrazina no ha sido ni prohibido ni restringido en México, aún cuando es de amplia utilización en distritos de riego del país. Este herbicida se introdujo al mercado nacional en 1975 y las empresas productoras en el país son Monsanto, Agrícola Nacional

Jalisco, Syngenta Agro, Ducor Agro, PYOSA, Cheminova, Koor Internacional, Agronova, Ingeniería Industrial, Polaquimia, Versa Agro, CAMSA y Velsimex. El nombre comercial más conocido de la Atrazina en México es Gesaprim, entre otros, como Aatrex, Aterbutox, Arrasina, Atranex, Atranova, Atraplex 90, Atrapol, Atraz 500 FW, Boxer, Desyerbal, Novaprim y Sanazina. En 1995, el empleo de herbicidas que contienen Atrazina como ingrediente activo fue de 2,012 t, (12.80% del total de herbicidas usados en México) de acuerdo a la Asociación Mexicana de la Industria de Plaguicidas y Fertilizantes (AMIPFAC).

En el 2003, la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), aplicó una encuesta a 18 estados de la República Mexicana con el objetivo de conocer los plaguicidas más consumidos y con ello estimar el volumen de ventas a nivel nacional. En la encuesta se describen las cantidades de los plaguicidas comercializados en ese año por varias empresas dedicadas al ramo. Para el caso de la Atrazina, un total de 27 empresas localizadas en 11 estados (Aguascalientes, Baja California Norte, Chihuahua, Colima, Durango, Guerrero, Morelos, Oaxaca, Sinaloa, San Luís Potosí y Tamaulipas), reportaron distribuir productos que la contienen como ingrediente activo (Tabla 1.1)

Tabla 1.1. Comercialización en México de herbicidas que contienen Atrazina

Nombre comercial	Ingredientes activos	Volumen comercializado	Unidad
Agrox 50SC	Atrazina	620	L
Anajalsa	Atrazina + terbutrina	500	L
Aterbutox	Atrazina + terbutrina	120	L
Gesaprim Autosuspendible	Atrazina	534,910	L
Gesaprim Combi 500 FW	Atrazina + terbutrina	25,425	L
Guardman	Atrazina + dimetenamida	1,224	L
Nikko	Atrazina + terbutrina	204	L
Primagram 500 FW	Atrazina + metolaclor	1,502	L
Primagram Gold	Atrazina + metolaclor	3,000	L
Sanazina 500	Atrazina	2,675	L
		570,180	L
Marvel	Atrazina + dicamba	47	kg
Gesaprim Calibre 90	Atrazina	18,215	kg
Gesapax Combi 80	Atrazina + ametrina	3,000	kg
Stratus	Atrazina + dicamba	141	kg
		21,403	kg

Fuente: SAGARPA, 2003

Esto a su vez, permitió realizar una encuesta por el Instituto Nacional de Ecología (INE) entre diciembre del 2002 y enero de 2003 a una muestra representativa de 300 unidades de riego en 16 estados de la República Mexicana. Con ella se pretendía conocer la función y producción de las unidades de riego a fin de estimar la incidencia de diferentes políticas agrícolas y ambientales, particularmente en relación con los subsidios al agua, la electricidad e insumos agrícolas, teniendo el proyecto por nombre “Demanda de Agua y Tarifa Eléctrica para el Bombeo Agrícola y Consumo de Plaguicidas”.

De acuerdo a esta encuesta, los estados de Coahuila, México, Guanajuato, Jalisco y Michoacán registraron Distritos de Desarrollo Rural (DDR's, pertenecientes a la SAGARPA) con unidades de riego que utilizan herbicidas con Atrazina. Los cultivos de maíz, caña de azúcar, sorgo, maíz forrajero y trigo fueron los más comunes y susceptibles del uso del herbicida. La forma de aplicación de los agroquímicos fue por vía terrestre (tractor o mochila), con una única aplicación del herbicida al año. Los resultados de la encuesta también permitieron conocer que malezas controlan, las dosis aplicadas y los precios de adquisición de productos que contienen Atrazina como ingrediente activo, y que fueron empleados por los usuarios de las unidades de riego de la muestra (Tabla 1.2)

Tabla 1.2. Datos de la utilización en México de herbicidas que contienen Atrazina

Nombre comercial	Ingredientes activos	Maleza que combate	Dosis aplicada	Precio
Atrazina	Atrazina	Hoja ancha y angosta	2 L ha ⁻¹	75 \$ L ⁻¹
Azinotox	Atrazina y otras triazinas	Hoja ancha	1.5 L ha ⁻¹	94 a 120 \$ L ⁻¹
Gesaprim	Atrazina	Hoja ancha	1 a 2 L ha ⁻¹	110 a 125 \$ L ⁻¹
Gesaprim Calibre 90	Atrazina	Acahual, chayotillo, gigantón y hoja ancha	1 a 2 kg ha ⁻¹	75 a 135 \$ kg ⁻¹
Gesaprim Autosuspendible	Atrazina	Hoja ancha y angosta	1 a 4 L ha ⁻¹	110 a 125 \$ L ⁻¹
Gesaprim combi 500 FW	Atrazina + terbutrina	Hoja ancha y angosta	1 a 4 L ha ⁻¹	110 a 150 \$ L ⁻¹
Harness	Atrazina + acetoclor	Hoja ancha y angosta; quelite y zacate	1 a 4 L ha ⁻¹	120 a 130 4 L ⁻¹
Primagram Gold	Atrazina + metolaclor	Hoja ancha y angosta	1 a 4 L ha ⁻¹	95 a 120 \$ kg ⁻¹

Fuente: INE, 2003

En México se han desarrollado estudios de la migración de plaguicidas (Német, 1996), de agroquímicos (Hansen *et al.*, 2001) y de biodegradación de plaguicidas organoclorados (Hansen *et al.*, 1999). Estos estudios se han realizado en la parte central, sudeste (Guillén, 2001) y en el noroeste del país (González, 2005). Sin embargo, aún no se han evaluado los riesgos ambientales que su uso conlleva, para saber si en México debería ser o no restringido o prohibido.

1.3 Normatividad en México y el mundo para el uso de Atrazina

En México, la Comisión Intersecretarial para el Control del proceso y uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas (CICOPLAFEST) se limita a controlar y normalizar la comercialización de estos agroquímicos con la finalidad de evitar que su aplicación indiscriminada ocasione daños al ambiente y seres humanos (Jiménez, 2001).

A nivel nacional existe la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (DOF, 2000) “Salud Ambiental, Agua para Uso y Consumo Humano”, la cual menciona los Límites Máximos Permisibles a que debe someterse su potabilización, pero no considera límites para la Atrazina. Por otro lado, la Organización Mundial de la Salud (OMS) del año 1993, marca un valor de $2 \mu\text{g L}^{-1}$ para este herbicida para calidad del agua de consumo humano (WHO, 2004). Considerando los riesgos a la salud y el ambiente que implica la exposición a largo plazo a la Atrazina y sus metabolitos, la USEPA determinó un valor de $3 \mu\text{g L}^{-1}$. En México existen listas de plaguicidas prohibidos y restringidos (CICOPLAFEST, 2002), pero no incluyen Atrazina. Por ello es necesario definir si se requiere normalizar su uso en el país.

Se prohíbe el uso de Atrazina en varios países de la Unión Europea (CEE, 2004) y actualmente se están definiendo restricciones en los EUA (USEPA, 2003). En la Tabla 1.3 se presenta información sobre restricción de uso y límites en agua para consumo humano en diferentes países.

Tabla 1.3. Situación legal del uso de Atrazina y límites en agua para consumo Humano

Región	País u organización	Uso	Límite en agua para consumo humano [$\mu\text{g L}^{-1}$]
Todo el mundo	OMS	Permitido ¹	2.0 ¹
Norteamérica	Estados Unidos	Restringido ³	3.0 ³
	Canadá	Permitido ⁴	5.0 ⁴
	México	Permitido ⁷	No se incluye en la normatividad ⁷
Europa	Italia, Alemania, Suecia, Austria, Hungría, Francia, Finlandia, Noruega, Dinamarca	Prohibido ⁶	0.1 ⁶
	Resto de la Unión Europea	En proceso de retiro de licencias de fabricación de productos fitosanitarios que contengan Atrazina ⁵	
	Suiza, Bélgica, Luxemburgo	Permitido ⁶	
Asia	China, Taiwán, Tailandia, Indonesia, Malasia	Permitido ²	No se incluye en la normatividad ²
Oceanía	Australia	Restringido ⁸	0.1 ⁸
Centro y Sudamérica	Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Chile, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Perú, República Dominicana, Uruguay, Venezuela	Permitido ²	No se incluye en la normatividad ²
	Costa Rica, Nicaragua, Antigua y Barbuda, Bahamas, Barbados, Bermuda, Belice, Dominica, Granada, Guyana, Haití, Jamaica, Saint Wits y Nevis, Saint Lucia, San Vicente y las Granadinas, Surinam, Trinidad y Tobago	Permitido ²	Adoptaron el valor de la OMS ²

¹ WHO (2004); ² OPS (2002); ³ USEPA (2003); ⁴ CCME (1999); ⁵ CEE (2004); ⁶ CRE (2003); ⁷ DOF (2000);

⁸ NRA (2002);

1.4 Convenios Internacionales y Atrazina

La existencia de miles de formulaciones químicas, con efectos desconocidos para la salud y el ambiente hizo que las Naciones Unidas a través de sus programas iniciaran acciones concertadas para establecer mecanismos normativos internacionales y cronogramas para regular el comercio, movilización y eliminación de una serie de sustancias químicas peligrosas. En la actualidad existen varias convenciones internacionales orientadas básicamente a prevenir los riesgos del comercio, uso, manejo y disposición final de los desechos tóxicos y productos químicos, utilizados en la agricultura y la industria (RAP-AL, 2005).

El Código Internacional de Conducta para la Distribución y Utilización de Plaguicidas, establecido, por la FAO en 1985, parte de la idea de que la utilización de plaguicidas conlleva efectos benéficos a la sociedad, al librarla de plagas que tienen un impacto económico, sanitario y social considerable; a la vez, reconoce que por haber sido desarrollados para provocar efectos tóxicos en organismos biológicos, dichos efectos pueden también extenderse a otros seres vivos y poblaciones humanas que puedan verse expuestos a ellos. Entre las directrices derivadas del Código, se encuentran las relativas al registro y control de los plaguicidas; su etiquetado; envasado; vigilancia post-registro; eliminación de desperdicios de plaguicidas y envases usados; buenas prácticas de aplicación; almacenamiento; fumigación aérea; protección de las personas que los manipulan y relativas a los criterios para su clasificación (RAP-AL, 2005). El Convenio de Rotterdam sobre el *Procedimiento de Consentimiento Fundamentado Previo Aplicable a Ciertos Plaguicidas y Productos Químicos Peligrosos Objeto de Comercio Internacional* es una continuación de este código.

El Convenio de Rotterdam que ha sido suscrito por mas de 150 países, cuyo propósito es supervisar y controlar el comercio de las sustancias peligrosas de origen agrícola e industrial; esta Convención conocida también como el Principio de Información y Previo Consentimiento (PIC) identifica los plaguicidas más peligrosos y sustancias químicas usados en la industria para regular su comercio global, pero no incluyen Atrazina (RAP-AL, 2005).

En mayo de 2001, en Estocolmo, Suecia, un total de 127 países adoptaron un tratado de las Naciones Unidas para prohibir o minimizar el uso de doce de las sustancias tóxicas más utilizadas en el mundo, consideradas causantes de cáncer y defectos congénitos en personas y animales. Los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP's) objeto de este convenio, incluyen ocho plaguicidas, entre ellos el DDT, dos productos industriales y dos subproductos de diversos procesos de combustión, incluyendo los incendios accidentales de desechos y materiales plásticos: las dioxinas y los furanos. Así mismo es el caso de otros grupos de sustancias que son candidatas a ser incluidas en el convenio, tales como la Atrazina (Yarto *et al.*, 2003). Las propiedades que caracterizan a estas sustancias son: a) altamente tóxicos; b) persistentes, es decir que pueden durar muchos años e incluso décadas antes de degradarse en otras formas menos peligrosas; c) se pueden evaporar y viajar grandes distancias por el aire y el agua; y d) se acumulan en los tejidos grasos. La Convención de Estocolmo fue firmada por el gobierno de México el 22 de mayo del 2001 y se aprobó por el senado en octubre del 2002. Posteriormente se ratifica en febrero del 2003 y entra en vigor el 17 de mayo del 2004 (Yarto *et al.*, 2003).

Estos instrumentos legales a nivel internacional son marcos normativos muy importantes que contribuyen a la regulación del comercio y uso de sustancias peligrosas; sin embargo su implementación en cada uno de los países es limitada a pesar de haberlos suscrito. Una de las mayores dificultades para implementar estas convenciones son los intereses económicos, la falta de información oportuna, el desconocimiento de las convenciones por parte de la ciudadanía y en algunos casos la falta de voluntad política para adoptar y aplicar las normas establecidas (RAP-AL, 2005).

Es fundamental el desarrollo de actividades de investigación para identificar sustancias que requieren de reducción de riesgos a través de la eliminación o disminución de su uso y establecer cuales de ellas son de mayor importancia para el país. De esta forma, es necesario reunir suficiente evidencia científica que permita decidir qué COP's representan un riesgo para la salud y el ambiente (Hansen *et al.*, 2005).

1.5 Tratamiento de agua que contiene Atrazina

A partir de la existencia de residuos de Atrazina en cuerpos de agua superficial, y debido a la posibilidad de contaminar acuíferos, se hizo necesario establecer algunas medidas que permitieran tratar, o bien, que tendieran a reducir la cantidad de Atrazina en ellos a consecuencia de su aplicación.

Información de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 2003), indica que el tratamiento del agua que contiene trazas de este herbicida es posible mediante carbón activado granular, debido a la relativamente baja partición suelo/agua de Atrazina y sus metabolitos, aunque esto depende de su concentración en cuerpos de agua, así como de la frecuencia y condiciones de su uso en cultivos. Otros métodos como carbón activado en polvo, osmosis inversa, intercambio iónico, ozono y radiación ultravioleta han sido utilizados para remover este herbicida y sus metabolitos. En la Tabla 1.4 se indican eficiencias esperables en la remoción de Atrazina asociadas a diversas tecnologías de tratamiento.

Tabla 1.4. Eficiencias de remoción de Atrazina según tecnología de tratamiento de agua

Tratamiento	Remoción esperable [%]	Observaciones
Convencional (cloración)	0 ¹	Ensayos de coagulación con Al ₂ (SO ₄) ₃ han evidenciado eficiencia nula en la remoción de Atrazina
Ablandamiento	0 ¹	Ensayos a escala real de ablandamiento/clarificación han indicado eficiencia nula en la remoción de Atrazina
Carbón activado en polvo	28-87 ^{1,2}	Corresponden a ensayos a escala completa, incluyendo experiencias con agua clarificada y con agua cruda
Carbón activado granular	47 ²	Sin información
Osmosis inversa	29-100 ³	Corresponden al uso de membranas de diferente tipo
Procesos de oxidación avanzados	Sin información ⁴	En tratamientos con UV/H ₂ O ₂ se obtienen degradaciones muy rápidas (2.2 minutos). Con otros tratamientos se forman metabolitos.

⁽¹⁾ Miltner *et al.* (1989), ⁽²⁾ Miltner *et al.* (1987), ⁽³⁾ Fronk, *et al.* (1990), ⁽⁴⁾ Prado, *et al.* (1997)

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Herbicidas

Uno de los factores que afectan los rendimientos de los cultivos es la maleza, restándole agua, nutrientes y luz solar, dificultando el combate de insectos y obstaculizando la recolección de la cosecha manual o mecanizada. Para evitar o reducir al mínimo los inconvenientes ocasionados por las malezas, es necesario utilizar métodos de prevención y control eficaces y económicos. Los herbicidas son químicos utilizados para destruir o inhibir el crecimiento de maleza (Radke, 2002). Sus beneficios son alta producción alimentaria, mejora de la calidad de los alimentos y disminución de enfermedades, entre otros.

La selectividad de los herbicidas (distinción entre las especies que controlan y aquéllas a las que no afectan, puesto que las plantas objetivo no poseen la misma capacidad de metabolizar el compuesto que los cultivos sobre los que es aplicada) puede modificarse ajustando el volumen de producto aplicado por hectárea y la estación de aplicación.

Los conceptos de la tecnología de herbicidas se desarrollaron alrededor de 1900. Los herbicidas orgánicos se empezaron a utilizar con el fin de combatir selectivamente a las hierbas indeseables y lograr que las sustancias empleadas no afectaran a los cultivos. En los últimos años se ha incrementado notablemente el uso de los herbicidas orgánicos y cada vez son menos los agricultores que utilizan otros métodos de control de malezas.

2.2 Características de Atrazina

Entre los grupos de herbicidas más importantes por su amplio uso en la agricultura y que han generado gran interés a nivel mundial están los herbicidas triazínicos. La Atrazina es actualmente uno de los herbicidas más usados, de persistencia moderada, y un contaminante detectado en aguas subterráneas y superficiales en zonas agrícolas. La estructura química de este herbicida se muestra en la Figura 2.1.

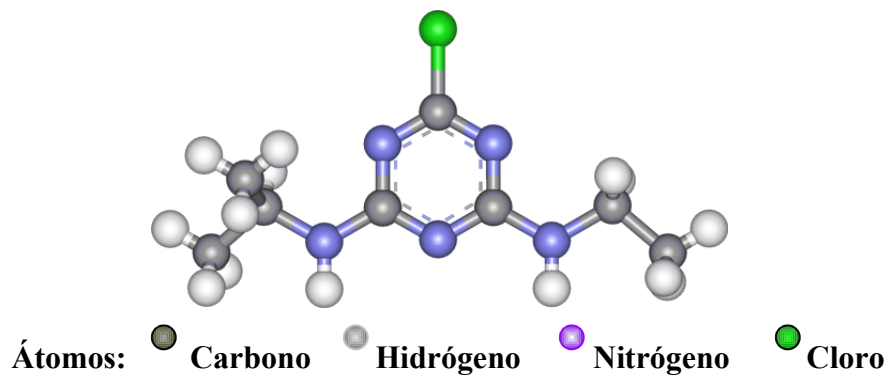


Figura 2.1. Molécula de Atrazina (C₈H₁₄ClN₅)

Por su constitución química, la Atrazina pertenece al grupo de los herbicidas triazínicos organoclorados. Es un herbicida pre y post-emergente (puede aplicarse antes de la siembra y después, cuando el cultivo ya tiene varios centímetros, siendo absorbido por las raíces y las hojas), ampliamente usado para el control selectivo de malezas, principalmente en cultivos de maíz y caña de azúcar, así como en malezas de hoja ancha. El mecanismo bioquímico consiste en bloquear la fotosíntesis: las hierbas nacen, se forman las primeras hojas, se amarillean con la aplicación, y mueren dentro de los 5-10 días posteriores, notándose el efecto a los 10-15 días o antes si hay humedad (un tiempo excesivamente seco, perjudica su efectividad) (Figura 2.2).



Figura 2.2. Efectos de Atrazina en maleza

La Atrazina es un polvo blanco o sólido blanco cristalino (gránulos), no muy volátil e inflamable. También se produce en suspensión acuosa. Sus propiedades se muestran en la Tabla 2.1. De acuerdo con las etiquetas de productos comerciales que contienen Atrazina, dicho herbicida se aplica en un rango de 1.0 a 3.0 kg ha⁻¹, dependiendo del tipo de cultivo y del suelo. Se comercializa con una pureza (ingrediente activo) de aproximadamente 25 a 95% del compuesto total. Las formas de aplicación del herbicida se muestran en la Figura 2.3.



Figura 2.3. Aplicación del herbicida Atrazina con tractor y con mochila

Tabla 2.1. Propiedades de la Atrazina

Parámetro	Característica
Peso molecular	215.7 g mol ⁻¹ ¹
Puntos de fusión	171-177°C ¹
Presión de vapor	3.0 x 10 ⁻⁷ mm Hg a 20°C ¹
Solubilidad	33 mg L ⁻¹ en agua a 25°C ¹
Vida media (por biodegradación)	10 días ⁶ a 5824 días ²
K _H	3.04 x 10 ⁻⁹ atm • m ³ mol ⁻¹ ¹
pK _a	1.62 a 20°C, 1.70 a 21°C ³
Log K _{oc}	1.95 – 2.71 L kg ⁻¹ ¹
Log K _{ow}	2.27 ⁴
Hidrólisis	Estable 30 días a pH 5-9 y 25°C ⁵
Fotólisis acuosa (luz natural t ^{1/2})	335 días a pH 7 ⁵
Fotólisis en suelo (luz natural t ^{1/2})	12 días ⁵

¹ Montgomery, 1997, ² Abdelhafid *et al.*, 2000, ³ Bailey *et al.*, 1968, ⁴ Liu y Quian, 1995, ⁵ Navarro, 1998,

⁶ Schoen y Winterlin, 1987

Entre las propiedades que determinan la alta movilidad de la Atrazina y sus metabolitos en el ambiente están su alta solubilidad en agua y su baja constante de adsorción octanol-agua (k_{ow}) (Afferden y Hansen, 2001); el valor de la vida media por hidrólisis y por fotólisis. Los valores de la presión de vapor y la constante de la Ley de Henry se reflejan en su baja volatilidad (CICOPLAFEST, 2002).

2.3 Efectos sobre la salud y ambientales

La exposición humana a la Atrazina puede darse en el ambiente laboral, cuando los trabajadores se exponen al herbicida durante las actividades de producción, formulación y aplicación, ya sea por vía inhalatoria o dérmica. En cuanto a su toxicidad aguda, la Atrazina produce irritación severa de ojos, piel (dermatitis), nariz y garganta. Por sus efectos crónicos, produce alteraciones en las funciones del corazón, hígado y riñón; problemas en la reproducción y alteración en los niveles de hormonas que afectan la ovulación; defectos de nacimiento en humanos; incidencia de nacimientos de bebés con piernas reducidas y otras malformaciones congénitas (ATSDR, 2001).

La toxicidad de un compuesto se representa por la DL_{50} , que es la dosis necesaria para que el 50 % de una población de especie animal sea envenenada y muera. La DL_{50} oral de la Atrazina en ratas es de 3,090 mg/kg y la DL_{50} cutánea es mayor de 3,000 mg/kg. Se considera no tóxica para aves y ligeramente para vida acuática (Yarto, 2003). Este herbicida también ha sido considerado como inductor de hermafroditismo en ranas, en concentraciones tan bajas como $0.1 \mu\text{g L}^{-1}$. Sin embargo, la USEPA determinó que existe suficiente evidencia de carcinogenicidad del herbicida en animales, más no en humanos (USEPA, 2003).

Por ser un contaminante persistente, representa un riesgo de contaminación al ambiente. La Atrazina y sus metabolitos (productos de la biodegradación) pueden ser transportados desde el suelo hasta cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Hidroxiatrazina es un metabolito resultado de la degradación química; Detilatrazina y Desisopropilatrazina son productos de la degradación biológica, y son considerados más tóxicos que el compuesto original (USEPA, 2003).

2.4 Factores que influyen en la infiltración de contaminantes hacia suelo y aguas subterráneas

La contaminación del agua subterránea por herbicidas en las prácticas de agricultura rutinarias ha llegado a ser un tema trascendente en todo el mundo, debido a la importancia del agua subterránea como recurso de agua para beber, siendo de especial interés las áreas caracterizadas por un nivel de manto freático superficial. De esta forma, el comportamiento ambiental y el transporte de los compuestos químicos son esenciales para caracterizar adecuadamente el riesgo de contaminar el subsuelo o agua subterránea.

Una vez que ha ocurrido una infiltración de herbicidas en el suelo, estos podrían llegar hacia las aguas subterráneas, lo que hace necesario entender la forma en que migran y se dispersan en el subsuelo. Dicho comportamiento está en función de sus características fisicoquímicas y de las características del medio que los rodea (suelo). Otros factores climatológicos como la temperatura y la lluvia, también tienen una gran influencia. En general, se tienen los siguientes factores: a) naturaleza del herbicida, b) tipo de suelo y profundidad de manto freático, c) clima, d) labores agrícolas y d) comunidad de microorganismos (SEMARNAT-INE, 2002).

Características del herbicida

Las más importantes son la volatilidad, la solubilidad y la persistencia. La volatilidad afecta la distribución del herbicida entre el suelo, el agua y el aire. La solubilidad se define como la concentración de saturación del herbicida en el agua pura a una temperatura determinada. Es un parámetro importante para determinar el transporte y distribución de los herbicidas a través de los sistemas ecológicos: los que son muy solubles en agua tienen más tendencia a alcanzar los sistemas hídricos que los menos solubles, los cuales no son lixiviados con facilidad. La persistencia se define como la capacidad de un producto químico para conservar su integridad molecular y, por consiguiente, sus características físicas, químicas y funcionales en el medio ambiente a través del cual es transportado y distribuido después de haberse vertido al mismo. Si la velocidad de descomposición en el medio ambiental es superior a la velocidad de entrada

del contaminante, la probabilidad de que alcance niveles significativos de concentración ambiental en ese medio es menor (SEMARNAT-INE, 2002).

Características del suelo

La textura se cuantifica en función del porcentaje de arena, limo y arcilla que contiene el suelo. La estructura es la forma en que se agrupan las partículas del suelo para formar unidades más o menos complejas denominadas agregados. Tiene gran importancia analizar el tipo de estructura existente, puesto que influye en la aireación del suelo y en su permeabilidad. La porosidad es la relación existente entre el volumen de huecos respecto al volumen total del sedimento. La existencia de una cubierta vegetal produce una disminución de la energía luminosa en la superficie del suelo, al incrementar la cantidad de luz que es reflejada. La cubierta vegetal también actúa como un aislante, reduciendo la conducción de calor hacia y desde el suelo, lo que provoca un proceso de difusión de vapor más lento y por ello, los suelos con cubierta vegetal son más fríos que los que no la tienen. Estas características influyen en la volatilidad del herbicida (dispersión en el aire). La humedad se refiere a la presencia de agua en el suelo. Si el suelo se satura con agua, el medio se transforma a condiciones anaerobias y la mayoría de los compuestos se degradan mucho mejor en presencia de oxígeno. La disminución de la temperatura influye en la degradación de los herbicidas, pues ésta es mayor con temperaturas elevadas (SEMARNAT-INE, 2002)

Condiciones climatológicas y ambientales

El grado y extensión en que un herbicida puede infiltrarse a través del suelo hacia las aguas subterráneas, depende en gran parte de factores climáticos externos, como son la temperatura ambiente, el régimen de lluvias y el régimen de vientos. La lluvia puede actuar eliminando el herbicida del lugar donde fue aplicado con base a procesos de escorrentía superficial. El transporte de herbicidas debido a la escorrentía superficial es función del tiempo que puede transcurrir entre su aplicación y la precipitación en forma de lluvia. También depende de la naturaleza y la persistencia del herbicida, las características hidrológicas, tipo de suelo y vegetación de la zona, así como del método y forma de aplicación del compuesto. La velocidad y el régimen de vientos actúan favoreciendo las pérdidas de herbicida por volatilización, aumentando su dispersión en el ambiente (SEMARNAT-INE, 2002).

2.5 Procesos de Transporte de Contaminantes

Al llegar al suelo, herbicidas como la Atrazina se distribuyen entre las fases sólida, líquida y gaseosa. La fracción gaseosa se pierde por volatilidad. La fracción que permanece en la solución es la que está disponible para efectuar los mecanismos que influyen en el transporte de contaminantes. (Figura 2.4), y que son:

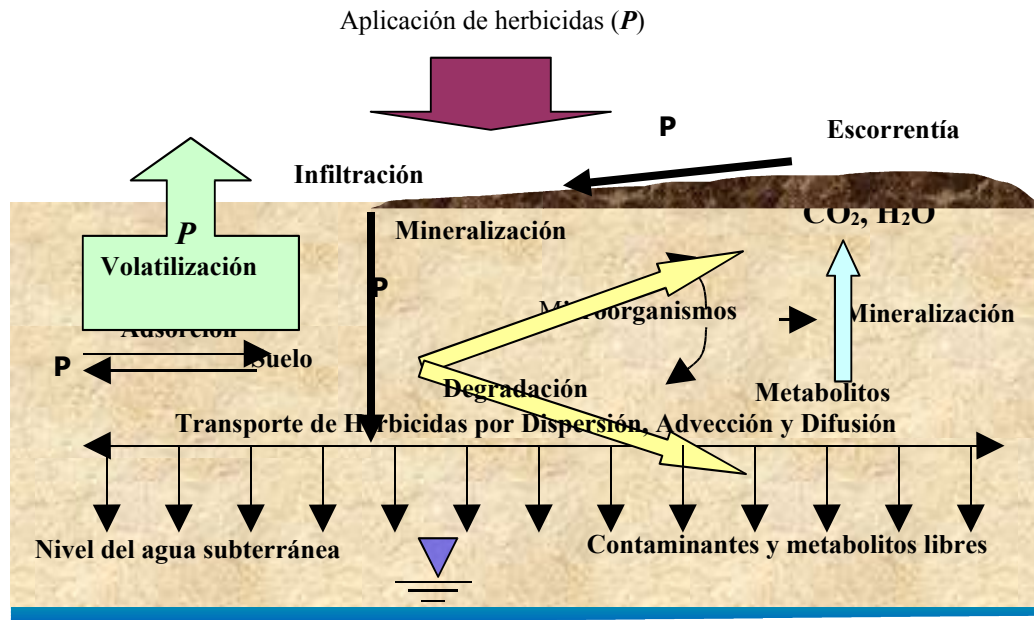


Figura 2.4 Procesos que afectan el transporte de contaminantes

2.4.1 Adsorción

La adsorción es la unión de los átomos, iones o moléculas de un gas o de un líquido (adsorbato) a la superficie de un sólido (adsorbente). Es una forma efectiva por la cual se puede reducir la movilidad de contaminantes en suelo. Además, puede afectar la biodisponibilidad, persistencia, infiltración y volatilidad de compuestos químicos orgánicos.

La adsorción se ve afectada por varios factores, de los cuales, los más importantes son las propiedades del compuesto contaminante (por ejemplo, estructura molecular, carga, polaridad, constante de adsorción Octanol-agua (k_{ow}) y solubilidad en agua) y las propiedades del suelo (por ejemplo, contenido de arcillas y materia orgánica, pH y humedad) (Dupont *et*

al., 1988). Generalmente, la cantidad aplicada en campo del herbicida suele aumentarse en suelos arcillosos y orgánicos o húmicos y disminuirse en arenosos (Barberá, 1976).

Cuando los compuestos se adsorben al suelo, los procesos de lixiviación se vuelven más lentos y el compuesto se acumula en los estratos superiores del suelo, disminuyendo el riesgo de lixiviación al manto freático, pero aumentando los riesgos por contacto directo en personas y animales y transporte de partículas en el aire. Si por el contrario, la adsorción de los compuestos orgánicos es mínima, el riesgo de contaminar el manto freático puede incrementar, porque la lixiviación ocurre en forma más rápida. El modelo más frecuentemente empleado para la adsorción es el equilibrio de un compuesto a partir de una solución, es la isoterma de Freundlich, obtenida empíricamente:

$$\frac{X_A}{m} = K_F C_{Ae}^{1/n} \quad (1.2)$$

Donde

X_A : Masa de A adsorbida por la fase sólida, [g]

m : Masa de la fase sólida, [g]

K_F : Coeficiente de adsorción, [L g⁻¹]

C_{Ae} : Concentración de A en la fase líquida, [g L⁻¹]

n : Coeficiente empírico o parámetro de ajuste, adimensional

2.4.2 Biodegradación

Aunque la degradación de Atrazina puede ocurrir por hidrólisis del carbono 2, por N-dealkilación del carbono 4, o por rotura del anillo triazínico (Navarro, 1998), y de igual forma, el herbicida no sufre fotodescomposición en el aire o el agua (Pellizzeti, 1990), la biodegradación es el principal mecanismo de degradación en suelo. Se ha demostrado que en campos donde se aplica Atrazina hay presencia de microorganismos capaces de mineralizar rápidamente el anillo del herbicida (Abdelhafid *et al.*, 2000). Los compuestos orgánicos son fuentes de carbono, nitrógeno y energía para los microorganismos, por lo anterior convierten estos compuestos en otros más simples y por último en CO₂, CH₄ y H₂O. Esta biodegradación puede ser inhibida por la aplicación fertilizantes nitrogenados (Hansen *et al.*, 2005). La

biodegradación puede ser aerobia o anaerobia. La degradación aerobia es un proceso de oxidación catalítica donde los microorganismos tienen como último aceptor de electrones el oxígeno. La degradación anaerobia es un proceso de reducción catalítica en el que los microorganismos utilizan como último aceptor de electrones compuestos como NO_3^- , SO_4^{2-} , CO_2 , etc. De esta forma, la degradación en presencia de oxígeno es más rápida.

La biodegradación se efectúa bajo algunas condiciones (Alexander, 1994):

- 1) Los microorganismos deben tener las enzimas necesarias para metabolizar los compuestos.
- 2) La población de microorganismos debe estar presente donde se encuentre el compuesto químico,
- 3) Deben existir las condiciones adecuadas (pH, temperatura, etc.) para el crecimiento microbiano.
- 4) El compuesto debe estar disponible.

La cinética de degradación de los herbicidas es afectada por la temperatura, disponibilidad de agua, potencial redox, estructura molecular del herbicida, y la profundidad del suelo. Aunque esta degradación sea efectiva, resulta lenta en herbicidas que se distinguen por su larga permanencia en el suelo, siendo más pronunciada en suelos áridos y pobres en materia orgánica. La fase de biodegradación en la cinética se basa en una ecuación de primer orden, la cual se representa como:

$$(2.2) \quad \int_{S_0}^S \frac{dS}{S} = -k_1 \int_0^t dt$$

Donde:

S: Es la concentración del compuesto orgánico, que va desde la concentración inicial

(S_0)

hasta la concentración en un tiempo determinado (S), [g L^{-1}]

k_1 : Velocidad de biodegradación, [d^{-1}]

t: Tiempo, de 0 a t, [s]

Tanto la degradación como la retención en la matriz del suelo, reducen la disponibilidad de Atrazina. Este comportamiento desde un punto de vista agronómico puede

afectar su eficacia y desde un punto de vista ambiental puede reducir su movilidad (Bollag *et al.*, 1992)

Existen otros mecanismos que intervienen en la migración de solutos en el suelo y son:

2.4.3 *Advección*

Los herbicidas disueltos que no interactúan con el medio poroso son transportados por el agua a una velocidad igual a la de infiltración; este proceso se llama transporte advectivo. La cantidad de herbicida transportado es función de su concentración en el agua, así como de la cantidad de agua que fluye a través del medio poroso, la cual a su vez depende del suministro de agua al suelo ya sea por eventos de lluvia o riego (lixiviación).

Las velocidades en un medio poroso se pueden representar mediante la ley de Darcy:

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (2.3)$$

Donde

Q: Gasto que pasa a través de la muestra, [m³ s⁻¹]

k: Conductividad hidráulica, [m s⁻¹]

A: Área transversal de la muestra, [m²]

i: Gradiente hidráulico, [m m⁻¹]

Asimismo, la conductividad hidráulica depende de las propiedades de medio poroso, en particular de la granulometría, compactación y de las propiedades del fluido (densidad y viscosidad). Los valores de K oscilan entre 10⁻³ m s⁻¹ en arenas gruesas y 10⁻¹⁰ m s⁻¹ para arcillas.

2.4.4 *Dispersión*

El movimiento de solutos disueltos a través del subsuelo está controlado principalmente por dispersión hidrodinámica. La dispersión mecánica se origina debido a variaciones de la dirección y distancia recorrida de diferentes moléculas de solutos en un medio poroso. Esto ocurre a través de dos mecanismos principales; variaciones en la velocidad de convección a

través de los poros individuales y diferencias en las distancias laterales de las diferentes rutas de flujo. Estos procesos son ampliamente regidos por las propiedades del medio poroso, más que por el soluto. El coeficiente de dispersión se expresa con la siguiente ecuación (Bear y Batchman, 1991):

$$D = \alpha v + D_m \quad (2.4)$$

Donde:

- α : Dispersividad, [m]
- v : Velocidad de poro, [$m \text{ s}^{-1}$]
- D_m : Difusión molecular, [$m^2 \text{ s}^{-1}$]

2.4.5 Difusión

El movimiento de solutos relacionado a la difusión molecular, ocurre en respuesta a gradientes de concentración dentro del medio de interés. La naturaleza aleatoria del movimiento Browniano da origen a que moléculas de cualquier especie química puedan migrar de áreas de mayor concentración hacia áreas de menor concentración. En contraste con la dispersión mecánica, la velocidad de difusión molecular es dependiente de las propiedades físicas y químicas del soluto y del solvente (en este caso agua), más que de las propiedades físicas del medio poroso.

El flujo de masa que se difunde es proporcional a una constante por el gradiente de concentración del soluto a través de la región de interés. Esta ley fue postulada por Bertholot a principios de 1800 y probada experimentalmente por Fick cincuenta años más tarde. Se conoce como la primera ley de Fick:

$$F_m = -D \left(\frac{dC}{dx} \right) \quad (2.5)$$

Donde

- F_m : Flujo de masa del soluto, [$g \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]
- D : Coeficiente de difusión, [$\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$]
- C : Concentración, [$g \text{ mL}^{-1}$]
- x : Longitud en la dirección del movimiento, [cm]

3. BASE DE DATOS

3.1 Diseño de la Base de datos

La evaluación del riesgo de contaminación de los mantos freáticos es una tarea multifactorial, pero en términos generales dependerá de dos grupos de elementos; la vulnerabilidad natural de los medios implicados (suelo, agua subterránea) y el tipo, cantidad y manera de aplicación del agroquímico (Silva, 1994).

Para conocer y entender cuales son los factores más importantes que influyen en los procesos que provocan la contaminación de mantos freáticos por el herbicida Atrazina, se construyó una base de datos utilizando el programa Excel, de Windows Microsoft, organizando todos los antecedentes obtenidos de los distritos de riego, y de esta forma analizar cuales serían los distritos de riego más adecuados para ser estudiados con fundamento en los siguientes criterios.

Características del suelo

- Tipo y textura del suelo: este factor está relacionado con características como la permeabilidad, la porosidad, el contenido de materia orgánica y arcilla. Los suelos de textura gruesa son generalmente suelos arenosos que tienen las más bajas porosidades y las más altas permeabilidades (facilidad a la cual se mueve una sustancia en el agua del suelo). Los suelos de textura fina, ya sean arcillosos o limosos, tienen pequeños y numerosos poros y permeabilidades muy bajas. Los suelos de textura media tienen permeabilidades intermedias (Huddleston, 1996).
- Profundidad de manto freático: el manto freático se define como el límite entre la zona no saturada y la zona de saturación (Iturbe y Silva, 1992). Su profundidad determina la distancia vertical a través de la cual el contaminante tiene que moverse para alcanzar la cima de un acuífero. Una menor profundidad significa menor tiempo para ejercer contacto entre el contaminante y el material de su alrededor, y por consecuencia, es mayor la posibilidad de contaminación a través de los procesos de transporte. De esta

forma, un nivel de manto freático superficial que suele permanecer en esta condición durante mucho tiempo, incrementa el riesgo de contaminación del agua subterránea. (Huddleston, 1996).

Prácticas agrícolas

- Tipo de cultivo: según las características de la planta, la información de los productores y fabricantes de Atrazina y usuarios en los distritos de riego, ciertos cultivos son más susceptibles a la aplicación de Atrazina, tales como maíz, sorgo, caña de azúcar y piña.
- Cobertura: el porcentaje y extensión de un cultivo específico en un distrito de riego permite observar su importancia económica en una zona agrícola dada y el área disponible para la aplicación del herbicida, comparados con el total de hectáreas sembradas en el mismo distrito. Se distingue como superficie sembrada a la superficie agrícola en la cual se deposita la semilla de cualquier cultivo, previa preparación del suelo.
- Aplicación de Atrazina: determina la verdadera utilización del herbicida en los distritos de riego y la dosis empleada de los diversos productos que la contienen como ingrediente activo (Gesaprim, Aatrex, Agrox, etc.).
- Lámina de riego media bruta: se refiere a la cantidad total de agua aplicada sobre el suelo; es la lámina considerada a nivel de fuente de abastecimiento y que esta relacionada con el tipo de cultivo. También se considera como la cantidad de agua medida en unidades de longitud que se aplica a un cultivo para que este satisfaga sus necesidades fisiológicas durante todo el ciclo vegetativo (CNA, 2004).

Datos geográficos

- Localización y altitud: la relación entre la altitud respecto a la temperatura media anual es muy estrecha. Se considera que para alturas inferiores a 11 Km (11,000 m), la temperatura varía con la altitud a razón de 6,5 °C por Km (6.5×10^{-3} °C por metro de altitud). A medida que el valor de la altitud se incrementa, disminuye la temperatura y se observa un mayor contenido de materia orgánica y una mayor acidez del suelo, lo que influye en el proceso

de biodegradación de la Atrazina (Esser, *et al.*, 1985). La localización permite situar a los distritos de riego dentro de la República Mexicana.

Datos de infraestructura

- Número de pozos para uso agrícola y pozos para consumo humano: esta información permite dar una idea del potencial de contaminación de las fuentes de abastecimiento de agua situadas los distritos de riego por la infiltración de plaguicidas, principalmente por el empleo del líquido para satisfacer necesidades básicas en las poblaciones establecidas y que se encuentran en dichos distritos. Como referencia se considera que para el año agrícola 2001-2002, los distritos de riego emplearon aproximadamente 5 km³ de agua subterránea para usos agrícolas, localizándose las mayores cantidades en el norte del país (CNA, 2004).

3.2 Recopilación de información

En total se realizaron 100 encuestas a cada una de las gerencias y módulos de distritos de riego nacionales (administrados por CONAGUA), distritos de desarrollo rural (administrados por SAGARPA), y organizaciones agrícolas y de usuarios de los distritos de riego, que incluyeron 500 llamadas por teléfono para la solicitud de información, ya sea enviando el formato por fax o por correo electrónico. Se llevo a cabo una amplia investigación respecto a las características de los distritos de riego a nivel nacional, procesando la información en una base de datos de acuerdo a los aspectos que se describen a continuación:

- Datos generales de distritos de riego en México: región hidrológico-administrativa, nombre y número de distrito y estado.
- Datos geográficos: localización y altitud.
- Datos de infraestructura: Pozos, tanto de consumo humano, como de uso agrícola.
- Datos del suelo: tipos de suelo, textura y conductividad hidráulica.
- Profundidad máxima, mínima y promedio de manto freático.


- ❑ Datos agrícolas: superficie sembrada en los distritos de riego, cultivos susceptibles al empleo de Atrazina (especialmente maíz, caña de azúcar, sorgo y piña).
- ❑ Aplicación de Atrazina (si se aplica o no, y en que dosis).
- ❑ Lámina bruta media de agua.

Una vez establecidos estos criterios de búsqueda y análisis, se recurrió a las siguientes fuentes para la adquisición de la información:

- ❑ Referencias bibliográficas: anuarios y compendios de características de los distritos de riego generados por la Comisión Nacional del Agua, (CNA, 1990 y 2004; SEMARNAT, 2001).
- ❑ Sistemas de información (bases de datos) de los distritos de riego: programas generados por la Comisión Nacional del Agua y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), tales como el Sistema de Información Hidroagrícola de Distritos de Riego (SINHDR, González, 2000), que permite la consulta de información hidroagrícola a nivel de distrito, región, estado y nacional.
- ❑ Sistemas de información (bases de datos) de los distritos de desarrollo rural: programas generados por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), tales como el Anuario Agrícola por DDR's, 1999-2002; el Anuario Agrícola por Municipios, 1999-2002; una base de datos de series cronológicas a nivel nacional, creado por el United States Department of Agriculture, (USDA) en conjunto con la SAGARPA y el Subsistema de Información Agrícola del Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) en la versión del Anuario de 2002.
- ❑ Publicaciones sobre estudios realizados en los distritos de riego, expuestos en diferentes ediciones del Congreso Nacional de Irrigación (Álvarez, 1999; Antelo, 1999; Arellano, 1999; Montiel, 1999; Diaz, 1999, Pulido, 1999; Ramírez, 1999).
- ❑ Información producida con base a las investigaciones realizadas en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), tales como proyectos, anuarios, documentos y diversos tipos de publicaciones.

- Mapas y cartografía de tipos de suelo y textura de suelos en México; mapas de la ubicación de los distritos de riego y de las regiones hidroagrícolas del país.

La información solicitada por medio de formatos a todos los distritos de riego del país se muestra a continuación.



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

**COORDINACIÓN DE TECNOLOGÍA HIDROLÓGICA
SUBCOORDINACIÓN DE HIDROLOGÍA SUBTERRANEA**

ASUNTO: Solicitud de información

**JEFE DE DISTRITO DE RIEGO
P R E S E N T E**

En el instituto se desarrolla el proyecto "EVALUACIÓN DE LOS RIESGOS DE LA CONTAMINACIÓN DE MANTOS FREÁTICOS POR LA INFILTRACIÓN DEL HERBICIDA ATRAZINA A NIVEL NACIONAL" para la SEMARNAT, por lo que le solicito nos haga favor de proporcionar la siguiente información del distrito a su cargo:

Profundidad promedio de manto freático	
Número de pozos para uso agrícola (localización)	
Número de pozos para consumo humano(localización)	
Tipo de suelos dominantes (% de arena, limo, arcilla)	
¿Existe información sobre cantidades de herbicidas aplicadas por año?	
Atrazina (Gesaprim, Atranex, Agrox, etc.) aplicada en Kg por año/ha y periodos de aplicación	

Agradezco anticipadamente su atención al presente y sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un saludo.

Dicha información puede ser enviada vía correo electrónico a la dirección:
afferden@tialoc.imta.mx y mvilladac@yahoo.com.mx

ATENTAMENTE
DR. MANFRED VAN AFFERDEN
Jefe del proyecto

Figura 3.1. Formato de los datos solicitados a los distritos de riego

3.3 Resultados de la Base de datos

Para un mejor análisis de las zonas agrícolas a nivel nacional, se dividió al país en regiones geográficas norte, centro y sur-este, así como por la similitud de climas entre los estados de la República Mexicana que se localizan en cada región, distribuyendo a estos y a sus respectivos distritos de riego de la siguiente forma: Región Norte (Baja California Sur, Coahuila, Chihuahua, Durango, Nuevo León, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas y Zacatecas) con 36 distritos; Región Centro (Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Edo. de México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Puebla, Querétaro y Tlaxcala), con 34 distritos, y Región Sur-Este (Oaxaca, Veracruz, Chiapas, Yucatán, Campeche y Quintana Roo), con 12 distritos de riego en total (Figura 3.2). La Tabla 3.2 muestra el total de distritos de riego con información disponible, clasificándolos por regiones.



Figura 3.2. Regionalización de los distritos de riego en la base de datos

De los 82 distritos de riego, se tiene registradas las respuestas del 60% de ellos, como se observa en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Listado de distritos de riego con información para la selección

Región Hidro-agrícola	Distrito	Nombre	Región Hidro-agrícola	Distrito	Nombre
I	066	Santo Domingo, B.C.S.	VI	090	Bajo Río Conchos, Chih.
II	037	Altar Pitiquito, Son.	VII	017	Región Lagunera, Coah. y Dgo.
II	038	Río Mayo, Son.	VIII	053	Edo. de Colima, Col.
II	083	Papigochic, Chih.	VIII	094	Jalisco Sur, Jal.
II	051	Costa de Hermosillo, Son.	VIII	020	Morelia, Mich.
III	076	Valle del Carrizo, Sin.	VIII	087	Rosario-Mezquite, Mich.
III	108	Elota-Piactla, Sin.	VIII	085	La Begoña, Gto.
III	063	Guasave, Sin.	VIII	093	Tomatlán, Jal.
IV	030	Valsequillo, Pue.	VIII	033	Edo. de México, Mex.
IV	056	Atoyac-Zahuapan, Tlax.	VIII	024	Ciénega de Chapala, Mich.
IV	068	Tepecoacuilco, Gro.	IX	096	Arroyo Zarco, Mex.
IV	016	Edo. de Morelos, Mor.	IX	002	Mante, Tamps.
IV	057	Amuco-Cutzamala, Gro.	IX	086	Soto la Marina, Tamps.
V	105	Nexpa, Gro.	IX	029	Xicotencatl, Tamps.
V	104	Cuajinicuilapa, Gro.	IX	044	Jilotepec, Mex.
V	095	Atoyac, Gro.	IX	092	Río Pánuco, Ver-Tamps
VI	006	Palestina, Coah.	X	035	La Antigua, Ver.
VI	031	Las Lajas, N.L.	XI	059	Río Blanco, Chis.
VI	042	Buenaventura, Chih.	XI	101	Cuxtepeques, Chis.
VI	103	Río Florido, Chih.	XI	107	San Gregorio, Chis.
VI	026	Bajo Río San Juan, Tamps.	XII	048	Ticul, Yuc.
VI	005	Delicias, Chih.	XIII	073	La Concepción, Mex.
VI	025	Bajo Río Bravo, Tamps.	XIII	088	Chiconautla, Mex.
VI	004	Don Martín, Coah. y N.L.	VIII	011	Alto Río Lerma, Gto.
VI	089	El Carmen, Chih.			

Tabla 3.2. Total de distritos de riego con información

Parámetro	Región Norte	Región Centro	Región Sur-Este	Total
Número de distritos de riego	36	34	12	82
Número de distritos de riego con información	23	21	5	49
% de distritos de riego con información				60

3.3.1 Información agrícola

De la información obtenida de los anuarios y compendios de los ciclos agrícolas de los distritos de riego mencionados, se especifican la superficie sembrada y la superficie sembrada para cada cultivo susceptible de aplicación del herbicida Atrazina (maíz, sorgo, caña de azúcar y piña). Como puede observarse en la Tabla 3.3, la superficie total sembrada de los cultivos representativos en los distritos de riego, con 1130.26 miles de hectáreas, constituyen el 43% (22% maíz, 6% caña de azúcar y 15% sorgo) de la producción agrícola a nivel nacional. El 64% de la superficie sembrada de los cultivos seleccionados pertenece a la Región Norte, donde hay un mayor número de distritos de riego, representando el 68% de la superficie sembrada del territorio mexicano; con el 32% de la producción de estos cultivos se tiene la Región Centro, que a su vez concentra el 27% de la superficie sembrada a nivel nacional; y finalmente se tiene el 5% de la superficie de cultivos seleccionados en la Región Sur-Este, que representa el 5% de la superficie sembrada de los distritos de riego en México.

Tabla 3.3. Información agrícola de los distritos de riego en México

Parámetro	Región Norte	Región Centro	Región Sur-Este	Total	Total [%]
Superficie sembrada nacional [miles de ha]	1806.76	714.06	121.61	2642.43	100
Superficie sembrada nacional [%]	68	27	5	-	100
Superficie sembrada de maíz [miles de ha]	363.57	197.81	13.65	575.03	22
Superficie sembrada de caña de azúcar [miles de ha]	72.93	40.95	39.29	153.17	6
Superficie sembrada de sorgo [miles de ha]	282.37	118.05	1.51	401.93	15
Superficie sembrada de piña [miles de ha]	0.00	0.13	0.00	0.13	0
Superficie sembrada de cultivos seleccionados [miles de ha]	718.87	356.94	54.45	1130.26	43
Superficie sembrada de cultivos seleccionados [%]	64	31	5	-	100

3.3.2 Información de las características del suelo

La recopilación de la información respectiva a las características del suelo surge de su utilización como parte de los datos requeridos por el programa Pesticide Leaching Model (PELMO) para la simulación, así como por tratarse de uno de los factores que determinan la vulnerabilidad de las zonas agrícolas a ser contaminadas por la infiltración del herbicida Atrazina, dependiendo de la textura, tipo de suelo y la profundidad de manto freático.

La mayoría de las gerencias de los distritos de riego especificaban el tipo de suelo, pero no la textura, por lo que se recurrió al uso del Triángulo de clasificación de suelos del United States Department of Agriculture (USDA) (Figura 3.3). En este se localizan los porcentajes de arcillas, limos y arenas, trazando líneas y en el punto de intersección de estas, se identifica el tipo de suelo. Para la determinación de la permeabilidad se utilizó el programa SPAW Hydrology de la USDA-ARS & Washington State University (Saxton, 2004), que estima el contenido de agua del suelo, capacidad de retención de agua basado en la textura de suelo, el contenido de materia orgánica, la salinidad y la compactación. A partir de los porcentajes de arena y arcilla se puede calcular la permeabilidad del suelo.

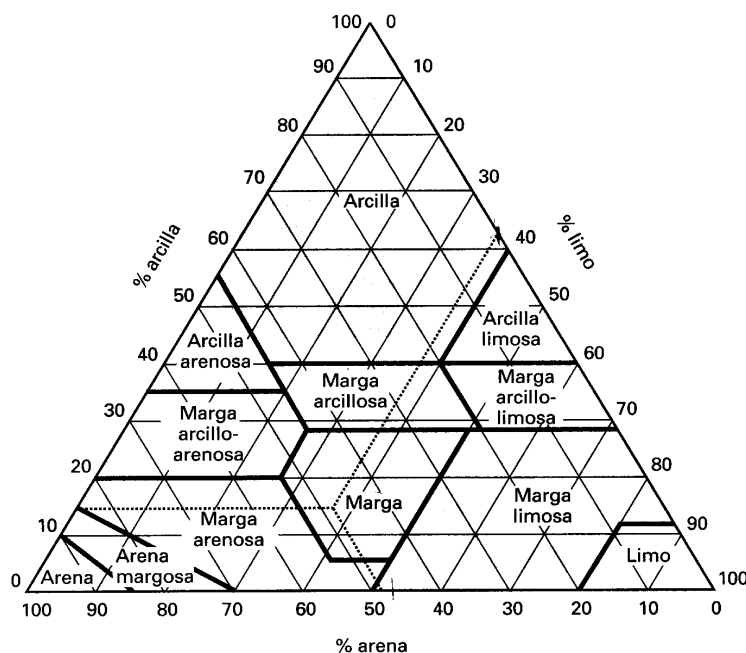


Figura 3.3. Triángulo de clasificación de suelos

De acuerdo a la base de datos, aunque en la Región Norte se encuentran los distritos de riego que presentan textura gruesa en más ocasiones y los mantos freáticos más someros (algunos de 0 m, en Sonora y Sinaloa), son más los distritos que muestran texturas finas, constituyendo principalmente suelos arcillo - arenosos y arcillosos, caracterizados por su mal drenaje, siendo suelos poco permeables. En el caso de la Región Centro, las texturas de suelo que se presentan en mayor cantidad son las medias, con un tipo de suelo que va del franco arcilloso, arcillo - arenoso y arcilloso, siendo este ultimo clasificado como suelo de textura fina. Los mantos freáticos resultan someros (de 0 m en Michoacán), sin embargo existen niveles de hasta 150 m aún en el mismo estado. En la Región Sur-Este también se presentan mantos freáticos someros, pero no niveles tan profundos como en las otras dos regiones, con suelos del tipo arcilloso-limoso y franco arcilloso, con permeabilidades más bajas que en los anteriores (Tabla 3.4), lo que significa la presencia de suelos poco permeables que han sido modificados por los efectos de la vegetación y el intemperismo (Juárez, 1999). Agrupando las profundidades de manto freático se obtiene la Tabla 3.5.

Tabla 3.4. Resultados de la información de suelo de los distritos de riego en México

Parámetro	Región Norte	Región Centro	Región Sur-Este
Textura promedio	Fina	Media	Fina
Tipo de suelo dominante	Arcilloso - arenoso	Franco arcilloso	Arcillo - limoso
% arena promedio	40	36	28
% limo promedio	25	32	39
% arcilla promedio	35	32	33
Permeabilidad promedio [cm s^{-1}]	4.74×10^{-4}	1.57×10^{-4}	5.09×10^{-5}
Profundidad mínima de manto freático[m]	0	0	0.6
Profundidad máxima de manto freático[m]	110	150	33

Tabla 3.5. Profundidades promedio de manto freático por intervalo en los distritos de riego

Intervalo	Región Norte	Región Centro	Región Sur-Este	Total
De 0 m – 3 m	11	7	1	23
De 3 m – 10 m	2	3	3	8
De 10 o mayor de 10 m	10	7	1	18

3.3.2 Infraestructura para el abastecimiento de agua

Los pozos son una opción para el abastecimiento del agua tanto para actividades agrícolas, como para el consumo por parte de la población asentada en dichas zonas, lo que se relaciona con los niveles de agua explotados y la problemática que representan como posibles fuentes de contaminación. Por otro lado, es necesario contar con estos datos para llevar a cabo los planes de muestreo para verificar la calidad del agua subterránea y así detectar si se están superando o no los límites permisibles de contaminantes químicos, como es el caso de la Atrazina.

En la Región Norte existen distritos de riego, como el 017-Región Lagunera, Coahuila, que posee 320 pozos para consumo humano, y 1494 pozos para uso agrícola. Los estados que presentan las mayores cantidades de ambos tipos de pozos son Chihuahua, Coahuila, Sonora y Sinaloa. En la Región Centro existen distritos de riego, como el 011-Alto Río Lerma y 094-Jalisco Sur que cuentan con 1772 y 509 pozos para uso agrícola, respectivamente, y otros como el 016-Morelos, que tienen 394 pozos para consumo humano, siendo Jalisco, Morelos y Michoacán los que presentan mayor número de pozos en general. En la Región Sur-Este se tiene el distrito de riego de 048-El Ticul, Yucatán que si posee pozos para el uso agrícola (222), a diferencia de los demás distritos de riego, y estados como Chiapas y Veracruz que poseen más de 41 y 547 pozos para el consumo humano (Tablas 3.6)

Tabla 3.6. Resultados del total de pozos en los distritos de riego en México

Parámetro	Región Norte	Región Centro	Región Sur-Este	Total
Número de pozos de uso agrícola	4603	3847	222	8672
Número de pozos para consumo humano	1032	1282	588	2902

Como se presenta en la tabla anterior, los distritos de riego del norte del país requieren de fuentes de suministro de agua a nivel subterráneo en mayor cantidad debido a la extensión de sus superficies de riego, como se vio en la información agrícola. En la zona centro y sur de México las formas de abastecimiento artificiales, tales como los pozos y las norias (pozo somero) no constituyen gran importancia debido al clima de los estados respectivos, que dependen aun más del temporal.

3.3.3 Aplicación de Atrazina

El uso de Atrazina esta considerado como un asunto de interés internacional debido a que han sido muchos los países los que han encontrado concentraciones del herbicida que rebasan los limites permisibles para agua para consumo humano en cuerpos de agua superficiales y subterráneos, por lo que algunos la han restringido y otros más la han prohibido. A nivel nacional aún es muy amplia su aplicación en las zonas agrícolas. De los datos registrados, aproximadamente el 25% de los distritos de riego han reportado no utilizar Atrazina como herbicida y alrededor del 75% de dichos distritos lo aplican en dosis que varían de $100 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ hasta $4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, con presentaciones tanto en solución acuosa, como en gránulos dispersables, siendo esta última la forma mas empleada. De esto mismo se especifica cuales son los productos comerciales empleados, siendo los más comunes Gesaprim calibre 90 y Gesaprim autosuspendible.

En la base de datos se observa que en distritos de riego de Chihuahua, Nuevo León y algunos de Sinaloa y Tamaulipas no se utiliza este herbicida, y que en aquellos distritos de riego en donde si se aplica, generalmente se hace en cantidades pequeñas (menos de $1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), por debajo de las dosis recomendadas por los productores. En la Región Centro es notorio que en estados como Guerrero no se utilice este herbicida. Sin embargo, estados como Jalisco y Michoacán, aplican cantidades del herbicida que superan la dosis recomendada, con alrededor de $3 \text{ o } 4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Otros como Puebla y el Estado de México, aplican cerca de 1 kg ha^{-1} con dos aplicaciones al año en ambos casos. En el caso de la Región Sur-Este, la dosis promedio aplicada es de $3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, en estados como Chiapas y Veracruz (Tabla 3.7).

Tabla 3.7. Resultados de dosis de Atrazina empleadas en los distritos de riego en México

Parámetro	Región Norte	Región Centro	Región Sur-Este
Dosis mínima aplicada de herbicidas que contienen Atrazina [$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]	0.9	1	0.1
Dosis máxima aplicada de herbicidas que contienen Atrazina [$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]	1 – 1.5	4	3

Tomando en cuenta la dosis especificada de Atrazina en cada uno de los distritos de riego que reportaron utilizarla como herbicida, con dos aplicaciones al año y por el total de hectáreas sembradas de cultivos seleccionados, se tiene una cantidad cercana a las 1800 toneladas de Atrazina aplicadas al año en la totalidad de esos distritos, representando un total de 717.95 miles de hectáreas, como se observa en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Resultados del uso de Atrazina en los distritos de riego en México

Parámetro	Región Norte	Región Centro	Región Sur-Este	Total
Total de Atrazina aplicada en los distritos con información [t a ⁻¹]	532.50	1012.30	243.62	1788.42

Si además se estima el total de Atrazina aplicada en el país, en función del total de hectáreas de superficie sembrada con cultivos susceptibles al uso de Atrazina y empleando una dosis de 1.5 kg ha⁻¹ a⁻¹ (como dosis promedio), se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 3.9. Resultados de estimaciones de Atrazina en los distritos de riego en México

Parámetro	Región Norte	Región Centro	Región Sur-Este	Total
Total de Atrazina estimada en todos distritos [t a ⁻¹]	660.20	253.53	74.30	1090

La diferencia entre las cantidades de Atrazina en la Región Centro, se debe principalmente a que en dicha región se aplican dosis mayores a los 1.5 kg ha⁻¹ a⁻¹, es decir, del orden de 2 kg ha⁻¹ en dos aplicaciones (4 kg ha⁻¹ a⁻¹).

4. SELECCIÓN DE DISTRITOS DE RIEGO DE ESTUDIO

4.1 Filtrado de información de la base de datos

La base de datos (ver Anexo A) provee la información necesaria para determinar la vulnerabilidad de los distritos de riego del país, en función de los criterios y la regionalización mencionados en el capítulo 3.

Con base a un filtrado estadístico (selección de aquellas filas que cumplen el criterio que se especifique para una columna), se realiza un prefiltrado con el objetivo analizar los 49 distritos de riego con información. El primer criterio que se utiliza para realizar el prefiltrado esta relacionado con la aplicación del herbicida Atrazina. Se seleccionan aquellos distritos de riego que reportan emplear este herbicida, para trabajar sólo con los que cumplen esta condición. El segundo criterio que se toma en cuenta para la preselección se refiere a la organización por regiones, tal como se hiciera en el capítulo anterior. Los resultados se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Resultados del prefiltrado de información de los distritos de riego

Distrito	Nombre	Región	Distrito	Nombre	Región
066	Santo Domingo, B.C.S.	N	020	Morelia, Mich.	C
038	Río Mayo, Son.	N	087	Rosario-Mezquite, Mich.	C
083	Papigochic, Chih.	N	085	La Begoña, Gto.	C
063	Guasave, Sin.	N	093	Tomatlán, Jal.	C
026	Bajo Río San Juan, Tamps.	N	033	Edo. de México, Mex.	C
086	Soto la Marina, Tamps.	N	024	Ciénega de Chapala, Mich.	C
029	Xicotencatl, Tamps.	N	096	Arroyo Zarco, Mex.	C
092	Río Pánuco, Ver-Tamps	N	044	Jilotepec, Mex.	C
030	Valsequillo, Pue.	C	073	La Concepción, Mex.	C
068	Tepecoacuilco, Gro.	C	088	Chiconautla, Mex.	C
016	Edo. de Morelos, Mor.	C	035	La Antigua, Ver.	S-E
057	Amuco-Cutzamala, Gro.	C	059	Río Blanco, Chis.	S-E
053	Edo. de Colima, Col.	C	101	Cuxtepeques, Chis.	S-E
011	Alto Río Lerma, Gto.	C	107	San Gregorio, Chis.	S-E
094	Jalisco Sur, Jal.	C			

Los parámetros para el filtrado son: a) profundidad de manto freático, b) número de pozos para consumo humano, c) superficie sembrada de cultivo indicador, d) características del suelo, y e) dosis aplicada de Atrazina. La Figura 4.1 muestra el filtrado en la base de datos.

Figura 4.1. Base de datos con criterios para el filtrado y elección de los distritos de riego

Nombre ^a	REGION [Centro, Norte, Sur]	Profundidad min. del manto freático [m]	No. Pozos Consumo Humano	Cultivo indicador Superficie total [miles de ha]	Atrazina	textura del suelo ^b	Arena [%]
SANTO DOMINGO, B.C.S.	N	58.00	31	8.24	750 kg (MARZO)	media	53.5
ALTAR PITIQUITO, SON.	N	100.00	58	0.31	SIN INFO	gruesa	79
RÍO MAYO, SON.	N	0.00		2.90	400 lts/año	fina	30
PAPIGOCHIC, CHIH.	N	30.00	6	0.41	1.5 kg/ha/año(20)	gruesa	85
COSTA DE HERMOSILLO, SON.	N	110.00		2.55	SIN INFO	gruesa	79
VALLE DEL CARRIZO, SIN.	N	1.50	0	17.33	NO SE USA	fina	10
ELOTA-PIAXTLA, SIN.	N	1.40	20	7.88	SIN INFO	fina	10
GUASAVE, SIN.	N	1.00	125	48.69	1 kg/ha/año	fina	3
VALSEQUILLO, PUE.	C	52.00	22	8.50	1-2 kg / lt (mayo y	fina	55

4.1.1 Resultados del caso 1: Profundidad mínima de manto freático

Se eligen aquellos distritos de riego que poseen profundidades de manto freático más bajas, es decir, del orden de 0 a 3 m, eligiendo a los tres primeros en esta categoría, como se observa en la Tabla 4.2. En el caso de la Región Sur-Este, y al ser menos los distritos de riego a elegir, se toman aquellos que cumplen con las profundidades más bajas en esta región.

Tabla 4.2. Resultados del filtrado de los distritos de riego por profundidad mínima de manto freático

Distritos de riego NORTE	Nombre del distrito	Profundidad mínima de manto freático [m]
	Río Mayo, Son.	0.00
Guasave, Sin.	1.00	
Bajo Río Conchos, Chih.	1.00	
Distritos de riego CENTRO	Nombre del distrito	Profundidad mínima de manto freático [m]
	Rosario-Mezquite, Mich.	0.00
	Edo. de Colima, Col.	1.50
Tomatlán, Jal.	1.50	
Distritos de riego SUR-ESTE	Nombre del distrito	Profundidad mínima de manto freático [m]
	Río Blanco, Chis.	1.50
	La Antigua, Ver.	2.50
	Cuxtepeques, Chis.	8.00

4.1.2 Resultados del caso 2: Numero de pozos para consumo humano

En este caso, para cada región, se observan los distritos de riego que tiene el mayor número de pozos para consumo humano. De cada uno, los resultados son los siguientes (Tabla 4.3).

Tabla 4.3. Resultados del filtrado de los distritos de riego por número de pozos para consumo humano

Distritos de riego NORTE	Nombre del distrito	Número de pozos para consumo humano
		Región Lagunera, Coah. y Dgo.
	Delicias, Chih.	302
	Guasave, Sin.	125
Distritos de riego CENTRO	Nombre del distrito	Número de pozos para consumo humano
		Edo. de Morelos, Mor.
	Alto Río Lerma, Gto.	207
	Jalisco Sur, Jal.	93
Distritos de riego SUR-ESTE	Nombre del distrito	Número de pozos para consumo humano
		Cuxtepeques, Chis.
	La Antigua, Ver.	41
	San Gregorio, Chis.	0

4.1.3 Resultados del caso 3: Información agrícola

Se eligen los distritos de riego de cada región que presentan una mayor superficie de cultivo indicador (maíz, sorgo, caña de azúcar y piña). Como puede observarse, las mayores superficies se encuentran en la Región Norte. A nivel nacional esta región contiene a las zonas agrícolas más grandes en extensión territorial y de mayor importancia económica (SEMARNAT-CNA, 2001) (Tabla 4.4).

4.1.4 Resultados del caso 4: Características del suelo

Con base a los resultados del capítulo 3, y tomando en cuenta los distritos de riego más vulnerables, se eligen aquellos que poseen una permeabilidad mayor, así como por la textura que presentan (Tabla 4.5). Respecto a la base de datos, se tiene que en la mayoría de los distritos de riego en la Región Norte contienen suelos con textura gruesa. En las zonas

agrícolas es común encontrar suelos con texturas finas ya que representan una mejor retención de los plaguicidas aplicados, a diferencia de los suelos de textura gruesa, que poseen altos valores de permeabilidad.

Tabla 4.4. Resultados del filtrado de los distritos de riego por superficie de cultivo

Distritos de riego NORTE	Nombre del distrito	Cultivo indicador Superficie total [miles de ha]
	Bajo Río Bravo, Tamps.	177.73
	Bajo Río San Juan, Tamps.	65.04
	Guasave, Sin.	48.69
Distritos de riego CENTRO	Nombre del distrito	Cultivo indicador Superficie total [miles de ha]
	Alto Río Lerma, Gto.	77.99
	Rosario-Mezquite, Mich.	39.91
	Ciénega de Chapala, Mich.	25.49
Distritos de riego SUR-ESTE	Nombre del distrito	Cultivo indicador Superficie total [miles de ha]
	San Gregorio, Chis.	16.56
	La Antigua, Ver.	15.99
	Río Blanco, Chis.	8.56

Tabla 4.5. Resultados del filtrado de los distritos de riego por características del suelo

Distritos de riego NORTE	Nombre del distrito	Textura	Tipo de suelo	Permeabilidad [cm s⁻¹]
	Papigochic, Chih.	Gruesa	Arenoso	4.06 x 10 ⁻³
	Palestina, Coah.	Media	Franco limoso-arcilloso	1.38 x 10 ⁻⁴
	Bajo Río San Juan, Tamps.	Fina	Arcilloso-arenoso	1.53 x 10 ⁻⁵
Distritos de riego CENTRO	Nombre del distrito	Textura	Tipo de suelo	Permeabilidad [cm s⁻¹]
	Edo. de Morelos, Mor.	Media	Franco arcilloso-arenoso	1.38 x 10 ⁻⁴
	Rosario-Mezquite, Mich.	Media	Franco arcilloso	4.81 x 10 ⁻⁵
	Jalisco Sur, Jal.	Media	Franco arcilloso	4.81 x 10 ⁻⁵
Distritos de riego SUR-ESTE	Nombre del distrito	Textura	Tipo de suelo	Permeabilidad [cm s⁻¹]
	Cuxtepeques, Chis.	Media	Franco arcilloso-arenoso	1.30 x 10 ⁻⁴
	La Antigua, Ver.	Fina	Franco-arcillosos y arcillosos	4.56 x 10 ⁻⁵
	Río Blanco, Chis.	Fina	Arcilloso-limoso	3.31 x 10 ⁻⁶

4.1.5 Resultados del caso 5: Aplicación de Atrazina

En este criterio se analizan las zonas agrícolas que mayores dosis del herbicida Atrazina reportan. Aunque la mayoría de los distritos emplean una dosis promedio de $1.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, hay otros, como es el caso de la Región Centro, que utilizan de 3 a $4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Con base en ello, y siendo uno de los criterios o parámetros más importantes para la elección de los distritos de riego de estudio, se seleccionan aquellos que cumplen con las mayores dosis aplicadas de cada región.

Tabla 4.6. Resultados del filtrado de los distritos de riego por aplicación de Atrazina

Distritos de riego NORTE	Nombre del distrito	Dosis aplicada [$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]
		Bajo Río San Juan, Tamps.
	Papigochic, Chih.	1.5
	Guasave, Sin.	1
Distritos de riego CENTRO	Nombre del distrito	Dosis aplicada [$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]
	Rosario-Mezquite, Mich.	3 a 4
	Jalisco Sur, Jal.	2 a 3
	Alto Río Lerma, Gto.	2.23
Distritos de riego SUR-ESTE	Nombre del distrito	Dosis aplicada [$\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]
	La Antigua, Ver.	3
	San Gregorio, Chis.	3
	Río Blanco, Chis.	2

4.2 Identificación de los distritos de riego de estudio

Con base al proceso de filtrado de la información, se distinguen aquellos distritos de riego que aparecen más veces como resultado de la aplicación de cada criterio de selección. La siguiente tabla muestra los resultados del proceso de filtrado. De acuerdo a estos resultados, los distritos de riego 063 – Guasave, Sinaloa, en la Región Norte, 035 – La Antigua, Veracruz, en la Región Sur-Este y 087 – Rosario-Mezquite, Michoacán, en la Región Centro, aparecen un mayor número de veces como resultado de los filtrados de los distintos parámetros (Tabla 4.7).

Tabla 4.7. Resultados del filtrado de los distritos de riego

REGION	Nombre del distrito	PARAMETROS					No. veces
		1	2	3	4	5	
Distritos de riego NORTE	Guasave, Sin.	x	x	x	-	x	4
	Bajo Río San Juan, Tamps.	-	-	x	x	x	3
	Papigochic, Chih.	-	-	-	x	x	2
Distritos de riego CENTRO	Rosario-Mezquite, Mich.	x	-	x	x	x	4
	Alto Río Lerma, Gto.	-	x	x	-	x	3
	Jalisco Sur, Jal.	-	x	-	x	x	3
Distritos de riego SUR-ESTE	La Antigua, Ver.	x	x	x	x	x	5
	Río Blanco, Chis.	x	-	x	x	x	4
	San Gregorio, Chis.	-	x	x	-	x	3
	Cuxtepeques, Chis.	x	x	-	x	-	3

Los distritos de riego identificados como los más vulnerables son los que aparecen en la Tabla 4.8, junto con la descripción de las características que determinan su vulnerabilidad.

Tabla 4.8. Características de los distritos de riego más vulnerables

Parámetro	Distritos de riego		
	REGION NORTE	REGION CENTRO	REGION SUR-ESTE
	Distrito de riego No. 063 – Guasave, Sin.	Distrito de riego No. 087 – Rosario, Mezquite, Mich.	Distrito de riego No.035 – La Antigua, Ver.
Profundidad prom. de manto freático	2.0 m	26.0 m	4.0 m
Numero de pozos para consumo humano	125	91	41
Superficie sembrada de cultivo indicador	48.69 miles de ha	39.91 miles de ha	15.99 miles de ha
Textura promedio de suelo	Fina (3% arena, 34% limo, 63% arcilla)	Media (35% arena, 40% limo, 25% arcilla)	Fina (30% arena, 45% limo, 25% arcilla)
Dosis aplicada de Atrazina*	0.9 kg ha ⁻¹ a ⁻¹	3.6 kg ha ⁻¹ a ⁻¹	2.7 kg ha ⁻¹ a ⁻¹

*g de ingrediente activo (i.a.) de Atrazina.

5. CARACTERIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS DISTRITOS DE RIEGO DE ESTUDIO

5.1 Distrito de riego 063 - Guasave, Sinaloa

5.1.1 Ubicación

El distrito de riego 063 se encuentra ubicado en la parte norte del estado de Sinaloa, en una superficie de 1,200 km², ocupando una importante área de los municipios de Guasave y Sinaloa de Leyva. Limita al norte con el canal principal, margen derecha, al sur con las marismas (Golfo de California), al este con la primera y segunda unidad del distrito de riego No. 075 – Río Fuerte y al oeste con el Arroyo de San Rafael. Su localización geográfica está entre los meridianos 108° 10' y 108° 40' de longitud oeste y los paralelos 25° 30' y 25° 50' de latitud norte; a una altitud de 3.5 a 60 m sobre el nivel del mar, considerándose de 20 m en promedio (SARH, 1982).

5.1.2 Clima

El clima en la zona del distrito se interpreta como seco sin excedente de humedad durante el año; cálido con régimen normal de calor e invierno. La temperatura media anual es de 23.9 °C; las temperaturas máximas y mínimas extremas son de 42.0 °C y 4.4 °C, y su precipitación media anual oscila en los 409 mm; de la cual entre el 70 y 80 % se concentra en el verano, dependiendo principalmente y de manera muy significativa de la presencia de tormentas tropicales y huracanes, y el resto se distribuye en el invierno en los meses de noviembre a enero. La evaporación media anual es de 2,202 mm (Valle, 2001). En la zona dominan vientos del norte con una frecuencia constante e intensidad moderada, y con una alta incidencia de ciclones en los meses de septiembre, octubre y noviembre.

5.1.3 Geología y edafología

Presenta formaciones rocosas, pertenecientes a los periodos cuaternario y cenozoico; en la región central norte, existen algunas formaciones importantes correspondientes al periodo paleozoico mesozoico. Los suelos de la zona costera del distrito de riego 063, tienen el mismo origen y modo de formación, que proceden de productos de la meteorización y

descomposición de las rocas que constituyen la Sierra Madre Occidental, cuyos materiales son transportados por arrastre de suspensión de las fuertes corriente fluviales, quedando depositados en la planicie costera y en parte llegan al mar, originando suelos aluviales de diferente grado de desarrollo. Todos poseen buenas características edafológicas de regulares a excelentes para la agricultura.

Desde el punto de vista agrícola, el suelo del distrito de riego 063 (área correspondiente al valle de Guasave) es generalmente de tipo teozem y vertisol y presenta una textura limosa, moderadamente permeable y susceptible a la erosión. Los principales suelos son de tipo limo-arenoso y limo-arcilloso (textura de suelo con 68% arcilla, 34% limo, 3% arena, en promedio). En cuanto al pH del suelo saturado, la capa superficial varía de 7.6 a 8.2 y en las capas inferiores los valores varían de 7.7 a 8.6 (Valle, 2001).

5.1.4

Hidrología

El distrito de riego 063 cuenta con dos fuentes de abastecimiento, el Río Sinaloa y el Arroyo Ocoroni. Del primero se captan sus aportaciones en la Presa “Bacurato”, y del segundo en la Presa “El Sabinal”, cuyas capacidades de operación son de 1,920 y 300 millones de metros cúbicos, respectivamente. A su vez, se ubica sobre uno de los mejores acuíferos de la Región Centro-Norte del Estado de Sinaloa, que cuenta con una recarga media anual del orden de los 300 millones de metros cúbicos. Cuenta con 61 pozos para uso agrícola y con 125 para consumo humano, localizándose la mayor parte de los primeros en el módulo Ocoroni III-1 y los segundos en las zonas poblacionales, en los módulos de Riego Bamoa I-1 y Petatlán II-1. La profundidad promedio del agua subterránea es de aproximadamente 3.0 m.

5.1.5 *Agricultura*

La agricultura en el distrito de riego 063 es moderna y avanzada. Su padrón de cultivos está diversificado en más de 30 productos que se comercializan en el mercado nacional e internacional, que son materia prima de agroindustrias locales o bien se destinan al comercio exterior. Son típicos de esta región el maíz, algodón, arroz, cártamo, sorgo, soya, papa, tomate, frijol, trigo, garbanzo.

El distrito de riego cuenta con una superficie de 107,036 hectáreas y 11,420 usuarios; su tenencia de la tierra esta compuesta por productores del sector social en un 87 % y por pequeños propietarios en un 13 %. Se encuentra totalmente transferido a 5 asociaciones de usuarios productores agrícolas, que conforman igual número de módulos de riego, siendo los siguientes: Módulo de Riego Bamoa I-1, Módulo de Riego Las Milpas I-2, Módulo de Riego Petatlán II-1, Módulo de Riego Tetameche II-2, Módulo Ocoroni III-1 (Figura 5.1).

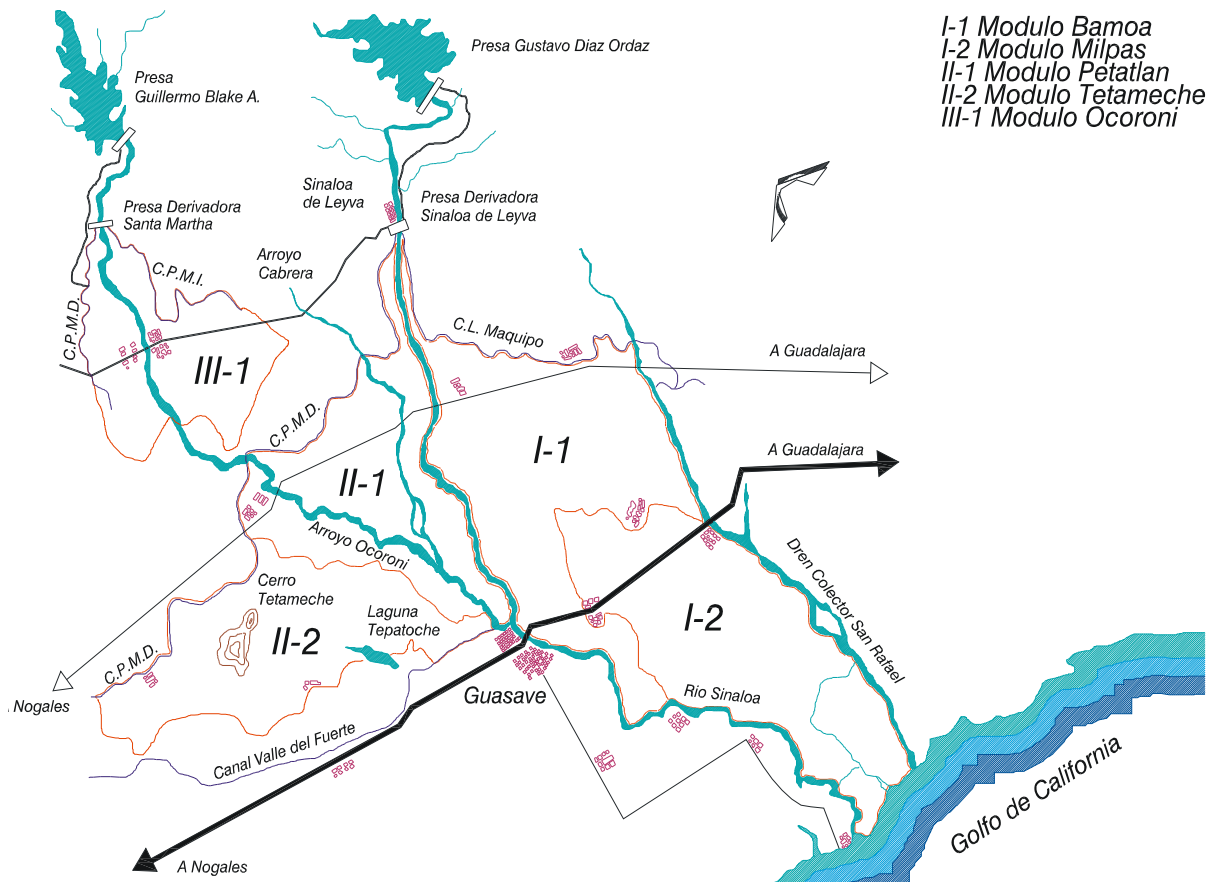


Figura 5.1. Mapa del distrito de riego 063 - Guasave, Sinaloa

Consumo total de plaguicidas el distrito de riego 063

En todo el distrito se estima que durante el ciclo Otoño-Invierno 1999 se consumieron un total de 88.3 Ton/ciclo de plaguicidas. De los plaguicidas utilizados, uno es extremadamente tóxico,

cinco son altamente tóxicos, dos son moderadamente tóxicos y otros dos ligeramente tóxicos. En la Tabla 5.2 se muestran los consumos de los plaguicidas más utilizados en el distrito de riego 063, Guasave, Sin., basándose en el ingrediente activo (i.a).

Uno de los tres herbicidas utilizados en el distrito de riego 063 es Gesaprim; su consumo total con base al ingrediente activo (Atrazina) durante el ciclo otoño-invierno 1998-1999 fue de 13.5 t, colocándolo como el principal herbicida utilizado en esta zona. Se estima que la dosis de Atrazina aplicada en este distrito de riego el ciclo otoño-invierno 1998-1999 es de 0.375 kg ha⁻¹ (SEMARNAT-IMTA 2000) y para el 2004, la dosis fue de 1 kg ha⁻¹ a⁻¹.

Tabla 5.2. Principales plaguicidas utilizados en el distrito de riego 063 (ciclo otoño-invierno 1998 -1999)

Nombre Comercial	Nombre Técnico	Grupo Químico	Grado de Toxicidad	Persistencia [semanas]	Consumo total del en el D.R. 063 con base en el I.A. (ton/ciclo)
Semevin 350	Thiodicarb	Insecticida Carbámico	Alto	< 4	8.4
Faena	Glifosato	Herbicida Alifático	Ligera	< 4	1.5
Gesaprim	Atrazina	Herbicida de las triazinas	Alto	27-52	13.5
Estamine	2,4-D	Herbicida	Moderada	4-26	-
Paratión	Paratión Metílico	Insecticida Organofos forado	Extremadamente tóxico	< 4	10.2
Lorsban	Clorpirifos etil	Insecticida Organofosforado	Alto	4-26	5.1
Puma	Fenoxaprop-pethyl	Herbicida Sistémico	Ligera	27-52	0.6
Diazinon	Diazinon 25 E	Insecticida organofos - forado	Moderada	< 4	7.5
Sevin	Carbarilo	Insecticida carbámico	Alto	3-5	24
Decis	Deltametrina	Insecticida piretroide	Alto	< 4	0.3
				TOTAL	88.3 T ciclo ⁻¹

- Datos no disponibles

Fuente: IMTA-UNAM 1999.

La relación de herbicidas aplicados para el año 2004 en el área comprendida por el distrito de riego 063 se muestra en la Tabla 5.3. El consumo total de estos herbicidas es de 42,483 L ha⁻¹ a⁻¹ y 287 kg ha⁻¹ a⁻¹.

Tabla 5.3. Herbicidas aplicados en el distrito de riego 063

Nombre técnico	Nombre comercial	Consumo total [ton/ciclo]	Dosis aplicada	Período de aplicación
Atrazina	Gesaprim calibre 90	90 Kg	1 kg ha ⁻¹	Ene- feb
Acido 2-2 d	Full-mina 12x1	6458 L	1 L ha ⁻¹	Dic-ene
Amina, 2-4-d	Damine 480	500 L	1 L ha ⁻¹	Agost- abr
Fomesanfen 5-2	Flex	744 L	1L ha ⁻¹	Sep-ene
Fluazipop-p-butil	Fusilade	838 L	1L ha ⁻¹	Sep-feb
Clethodim	Selec ultra	515 L	1/2 L ha ⁻¹	Sep-dic
Glifosato	Faena ultra	909 L	1L ha ⁻¹	Agost-nov
Glifosato	Faena	1617 L	1 L ha ⁻¹	Agost- nov
Glifosato	Faena transorb	11288 L	1 L ha ⁻¹	Oct
Glifosato	Secafin	2000 L	2.5 L ha ⁻¹	Todo el año
Glifosato	Glifotox	240 L	2.5 L ha ⁻¹	Todo el año
Glifosato	Rival sobres	71 kg	24 g ha ⁻¹	Sep-abril
Rinsulfuron	Titus	18.300 kg	50 g ha ⁻¹	Dic-may
Metsulfuron m. 60%	Situi	14 Kg	50 g ha ⁻¹	Oct-ene
Pedimentacion	Prowl-400	188 L	1L ha ⁻¹	Sep-nov
Dicamba	Banvel 12-24	705 L	1 L ha ⁻¹	Sep-abril
Paraquat	Paraquat	1000 L	1L ha ⁻¹	Sep-abril
Paraquat	Diaquat	500 L	1 L ha ⁻¹	Sep-abril
Paraquat	Gramoxone	4474 L	1 L ha ⁻¹	Sep-abril
Diquat	Reglone	2050 L	1 a 2 L ha ⁻¹	Nov-abril
Paraquat+diaquat	Doblete super	7520 L	1 L ha ⁻¹	Ago-enero
Thifensulfuron	Harmony	4 kg	4 g ha ⁻¹	Nov-marzo
Fenoxaprop	Puma super	50 L	1 L ha ⁻¹	Dic-ene
Clodinafop	Topik	12 L	250 mL ha ⁻¹	Dic-ene
Imazethapyr	Pivot	33 L	1 L ha ⁻¹	Sep-dic
Metribuzin	Sencor	339 L	300 a 500 mL	Oct-marzo
Picloram	Tordon 101	503 L	1 L ha ⁻¹	Sep-marzo

Fuente: Distrito de Desarrollo Rural Guasave, Sinaloa, 2004.

5.2 Distrito de riego 035 – La Antigua, Veracruz

5.2.1 Ubicación

El distrito de riego 035, se localiza en la planicie costera del Golfo de México y en la porción centro-este del estado de Veracruz a 70 kilómetros de su capital Jalapa y a 32 kilómetros de la ciudad y puerto de Veracruz, ocupando parte de los municipios de Actopan, Úrsulo Galván, Puente Nacional, Paso de Ovejas, La Antigua y Manlio Flavio Altamirano, siendo la Ciudad de Cardel sitio donde se ubican las oficinas administrativas. Su localización geográfica está entre los meridianos 96° 17' y 96° 33' de longitud oeste y los paralelos 19° 09' y 19° 33' de

latitud norte; a una altitud de 2 a 147 m sobre el nivel del mar, considerándose de 15 a 68 m en promedio (SARH, 1982).

5.2.2. *Clima*

El clima en la zona del distrito se interpreta como húmedo con invierno seco; cálido sin estación invernal. La temperatura media anual es de 26 °C; las temperaturas máximas y mínimas extremas son de 43 °C en mayo y 11 °C en febrero; su precipitación media anual oscila en los 1140 mm (1000 a 1250 mm) y ocurre en los meses de mayo a noviembre. La evaporación media anual es de 1,737 mm (CNA, 1990). En la zona dominan vientos del norte que alcanzan velocidades de 73.1 km/hr que coincide con los meses secos. Ocasionalmente y durante los meses de septiembre y octubre, el distrito sufre los embates de las perturbaciones de los ciclones que se forman en el Golfo de México (SARH, 1982).

5.2.3. *Geología y edafología*

El área que cubre el distrito de riego, corresponde a una planicie costera integrada por depósitos aluviales (plano-valles y antiguas deltas), depósitos laguneros antiguos y recientes depósitos eólicos (dunas) pertenecientes a los periodos cuaternarios y cenozoico; dentro de esta planicie se encuentra una red de drenaje natural de escasa densidad. La pendiente de los suelos es menor del 2.0% y solo el 3.5% de la superficie corresponde a superficies con pendientes mayores del 10%, localizadas principalmente adyacentes al canal principal La Antigua y Lateral Cardel (SARH, 1982). Sin embargo, el microrelieve en la mayor parte de la superficie es desfavorable.

En el distrito de riego se tienen identificados siete series de suelos que son: Cardel, Paso Real, Loma Iguana, Actopan, Modelo, Zempoala y Galván. Desde el punto de vista agrícola, los suelos del distrito de riego 035 son generalmente de tipo vertisoles y presentan una textura limosa, moderadamente permeable y susceptible a la erosión. Los principales suelos son de tipo arcilloso (textura de suelo con 55% arcilla, 35% limo, 10% arena, en promedio). En cuanto a la proporción de nitrógeno en los horizontes superficiales e inferiores es pobre, mientras que el contenido de fósforo se presenta en proporciones variables de

niveles medios a bajos, principalmente en horizontes superficiales; en cuanto a contenido de potasio, este elemento se presenta en todos los suelos del distrito en cantidades adecuadas.

Los terrenos regables están situados en la región costera y en ambas márgenes del río de La Antigua, extendiéndose al norte hasta la margen derecha del río Actopan y por el sur hasta cerca del puerto de Veracruz, con una longitud de 30 Km. Los terrenos de la margen derecha del río de la Antigua están cruzados longitudinalmente por los arroyos del Paso de Ovejas, Tolóme, Jula y San Juan, que se unen en la zona de riego y descargan en el río de La Antigua, cerca del poblado de ese nombre (SARH, 1982).

5.2.4 Hidrología

El distrito de riego 035 cuenta con una fuente de abastecimiento principal, siendo esta el río de La Antigua, que es del tipo perenne, con un gasto mínimo instantáneo de 12.7 m³/s y el gasto medio durante el mes de mínimo escurrimiento es de 15 m³/s. El distrito de riego 035 no cuenta pozos para uso agrícola. Cuenta con 41 pozos para consumo humano.

La presa derivadora principal esta situada a unos 10 km aguas arriba de Villa Cardel, y es una estructura de concreto y enrocamiento de tipo flotante con cresta vertedora fija y una altura aproximada de 2 m sobre el lecho del río. El distrito de riego cuenta en total con 6 presas derivadoras, una en la unidad de La Antigua, cuatro en la unidad de Actopan y una en la unidad de Puente Nacional (SARH, 1982).

La profundidad promedio del agua subterránea es de aproximadamente 2.5 a 3.0 m en 40% de la superficie, siendo mayor a 5.0 m en el 60% de la superficie.

5.2.5 Agricultura

La agricultura en el distrito de riego 035 es moderna. Su padrón de cultivos está diversificado en más de 15 productos que se comercializan en el mercado nacional, que son materia prima de agroindustrias locales o se distribuyen en los principales mercados de las ciudades de

Jalapa y Veracruz, así como en todas las poblaciones inmediatas al distrito o comprendidas en él. Son típicos de esta región el maíz, chile verde, frijol, jitomate, pepino, arroz, y otros cultivos varios. También se tiene cultivos perennes como la caña de azúcar (siendo este el cultivo más producido), limón, mango, papaya, toronja, otros pastos y otros cultivos varios.

El distrito de riego cuenta con una superficie de 31,207 hectáreas, de las cuales 24,093 son de riego, y 4,804 usuarios; su tenencia de la tierra esta compuesta por productores del sector social o ejidal en un 54 % y por pequeños propietarios en un 46 %. Se encuentra transferido a 3 asociaciones de usuarios productores agrícolas, que conforman igual número de módulos de riego, siendo los siguientes: Módulo de Riego La Antigua I-1, Módulo de Riego Actopan II-1, y Módulo de Riego Puente Nacional III-1 (Figura 5.2).

Consumo de plaguicidas aplicados en el distrito de riego 035

La superficie total de los principales cultivos que se sembraron en el distrito durante el año agrícola 1999-2000, fue de 19,516 ha. La caña de azúcar representa el 80.5% de la superficie sembrada, con 15,700 ha. El consumo de plaguicidas en el distrito se muestra en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Principales plaguicidas utilizados en el distrito de riego 035

Nombre Comercial	Nombre Técnico	Grupo Químico	Persistencia [semanas]	Período de aplicación	Dosis aplicada
Gesaprim Combi	Atrazina 480 grs. i.a.	Herbicida de las triazinas	27-52	Junio - octubre	2 L ha ⁻¹
Gesaprim 90 Autosuspen-dible	Atrazina 480 grs. i.a.	Herbicida de las triazinas	27-52	Junio - agosto	2 - 5 L ha ⁻¹
Gesapax H.	Ametrina + 2,4 D	Herbicida de las triazinas	32	Junio – octubre	2- 4L ha ⁻¹
Furadan liquido	Carbofuran	Insecticida	4 - 8	Mayo – agosto	2 L ha ⁻¹
Furadan granulado	Carbofuran	Insecticida	4 - 8	Mayo - agosto	20 kg ha ⁻¹

Fuente: Distrito de Desarrollo Rural No. 006, La Antigua, Veracruz.

5.3 Distrito de riego 087 – Rosario – Mezquite, Michoacán

5.3.1 Ubicación

El distrito de riego 087 se encuentra ubicado en la parte central del país, ocupando parte de los estados de Michoacán (al Noroeste), Guanajuato (al Suroeste) y Jalisco (Este-Centro), dentro de la cuenca Lerma – Chapala – Santiago. Su zona esta comprendida dentro de los municipios de Ayotlan, la Barca y Atotonilco, en Jalisco; Yurécuaro, Tanhuato, Vista Hermosa, Angamacutiro, Pastor Ortiz, Puruandiro, Numaran, La Piedad, Penjamillo, Sixto Verduzco, Huaniqueo, Coneo, Villa Jiménez y Zacapu en Michoacán; Penjamo y Abasolo en Guanajuato. Su localización geográfica está en el meridiano 20° 18' de longitud noreste y 102° 25' de latitud oeste; a una altitud entre 1680 m.s.n.m. en el valle de la Piedad y 1520 m.s.n.m. en la zona de Poncitlan, en el río Santiago, considerándose de 1,587 m en promedio (SARH, 1982).

5.3.2 Clima

El clima en la zona del distrito se interpreta como semiseco, con primavera seca, semi cálido, sin estación invernal definida. La temperatura media anual es de 21.4 °C; en la unidad Zacapu se registra una temperatura media de 17.6 °C. Se tiene el registro de temperaturas mínimas de hasta 0 °C. La precipitación media anual oscila en los 784 mm, de la cual el 80% se concentra en los meses de junio a septiembre. La evaporación media anual es de 2, 135.5 mm (SARH, 1982).

5.3.3 Geología y edafología

Presenta formaciones rocosas basálticas y andesitas (cenizas, tobas) del periodo terciario y cuaternario – cenozoico, y otras de origen lacustre. La topografía es plana con ligera pendiente hacia el río Lerma. Es a nivel parcelario donde se presenta en forma irregular, siendo necesaria la nivelación. Por lo mismo, el drenaje es deficiente. Desde el punto de vista agrícola, el suelo del distrito de riego 087 es generalmente de tipo vertisol, delimitándose las siguientes series: Corrales, Cuenqueño, Yurécuaro, Ocotes, Villachuato, Lerma y La Piedad, siendo los dos primeros los principales. Presenta diversas texturas; suelos franco-arcillosos en las unidades Angamacutiro y La Barca; suelos arcillo-limosos en las unidades La Piedad y Pastor Ortiz;

suelos arcillosos en la unidad de Yurécuaro; suelos arcillo-arenosos en la unidad Vista Hermosa y suelos orgánicos en la unidad Zacapu.

5.3.4 Hidrología

El distrito de riego 087 cuenta con una fuente principal de abastecimiento, el río Angulo, cuyos escurrimientos son controlados mediante la presa “Melchor Ocampo”. También se aprovechan las aguas del subsuelo mediante pozos. El distrito de riego 087 cuenta con 422 pozos para uso agrícola (Angamacutiro, 16; La Barca, 86; La Piedad, 94; Pastor Ortiz, 91; Yurécuaro, 85; Vista Hermosa, 50 y la unidad Zacapu, 0) y 91 pozos para consumo humano (Angamacutiro, 6; La Barca, 8; La Piedad, 40; Pastor Ortiz, 18; Yurécuaro, 14; Vista Hermosa, 6 y la unidad Zacapu, 0). La mayoría de estos pozos aprovechan los escurrimientos del río Lerma. El río Angulo es el afluente izquierdo de mayor importancia del río Lerma. Su origen se encuentra situado a 18.5 Km. de Zacapu, Michoacán, en altitudes que llegan a los 3200 m.s.n.m. (cerro Nahuatzen).

En cuanto a niveles de manto freático, las unidad Angamacutiro tiene un promedio de 12.0 m; Barca, 18.0 m; La Piedad, 80.0 m; Pastor Ortiz, 33.0 m; Yurécuaro, 20.0 m; Vista Hermosa, 17.0 m y la unidad Zacapu presenta un manto freático promedio de 0.0 m.

5.3.5 Agricultura

El padrón de cultivos está diversificado en 8 productos que se comercializan en el mercado nacional, que son materia prima de agroindustrias locales. Son típicos de esta región la cebada, el frijol, el garbanzo, la lenteja, el trigo, el sorgo, la fresa, entre otros cultivos. El distrito de riego cuenta con una superficie de 63,100 hectáreas y 13,402 usuarios; la tenencia de la tierra esta compuesta por productores del sector social en un 80 a 90 % y por pequeños propietarios en un 10 a 20 %. El total de módulos de riego son los siguientes: Módulo de Riego I - Angamacutiro, Módulo de Riego II – La Piedad, Módulo de Riego III – J.A. Yurécuaro, Módulo de Riego IV – Vista Hermosa, Módulo de Riego V – La Barca, Módulo de Riego VI – Pastor Ortiz, y Módulo de Riego VII – Zacapu (Figura 5.3).

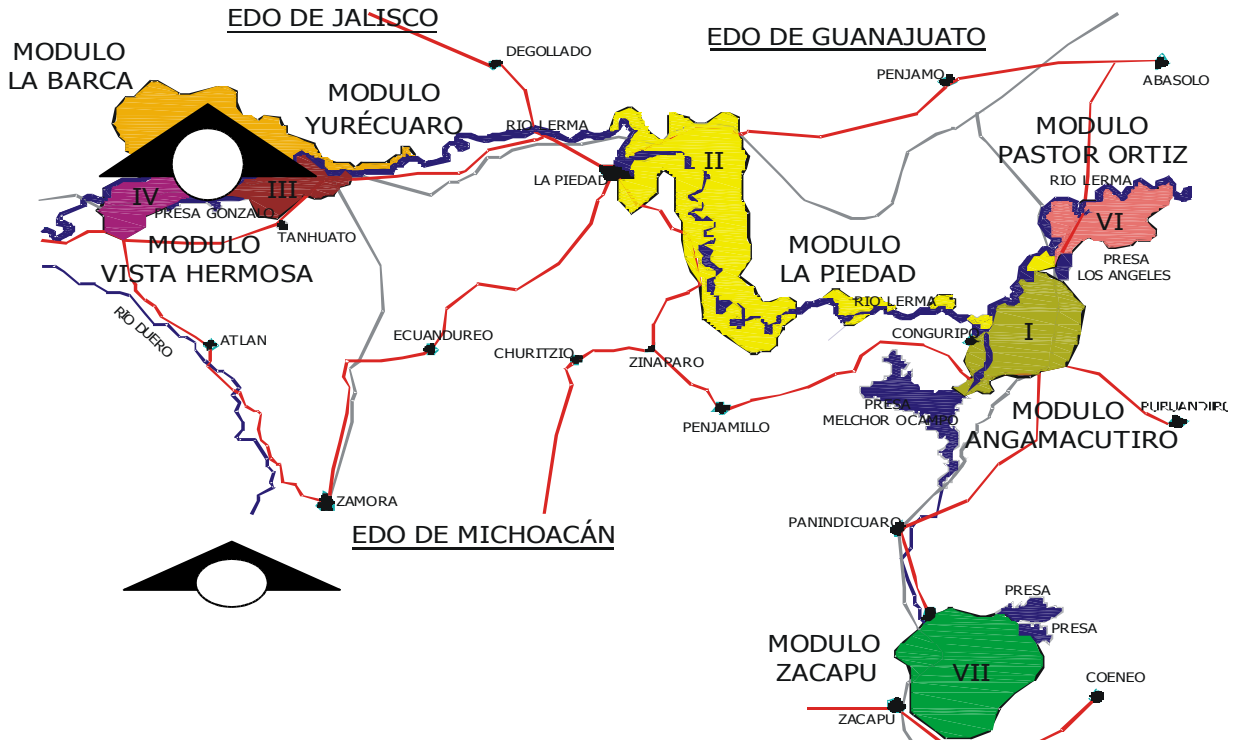


Figura 5.3. Mapa del distrito de riego 087 – Rosario-Mezquite, Michoacán

Consumo de plaguicidas aplicados en el distrito de riego 087

La superficie total de los principales cultivos que se sembraron en el distrito durante el año agrícola 1999-2000, fue de 58,677 ha. El sorgo representa el 43.7% de la superficie sembrada, con 25,667 ha. El consumo de plaguicidas se muestra en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Principales plaguicidas utilizados en el distrito de riego 087

Nombre comercial	Nombre técnico	Consumo total [t ha ⁻¹]	Dosis aplicada [kg a ⁻¹]	Periodo de aplicación
Aterbutox	Etelamino-6	44.0	3.0	Mayo-Junio
Azinotoy 500	Cloro-Etalamino-6	29.34	4.0	
Gesaprim Calibre 90	Atrazina	58.7	2.0 a 4	
Gesaprim Combi 500	Atrazina	128.0	3.5 a 4	

Fuente: Distrito de Desarrollo Rural No. 090, La Piedad, Michoacán.

6. MUESTREO

El muestreo es un proceso por el cual se obtiene una porción representativa de un sistema. El muestreo se realiza para coleccionar información, caracterizar la contaminación, identificar y confirmar las rutas de exposición. El objetivo del muestreo es proporcionar detalles específicos de las condiciones en cada área del sitio de estudio, el nivel de contaminación y los datos cuantitativos que permiten un análisis de sus aplicaciones.

Con el fin de coleccionar muestras de agua que proporcionen detalles específicos de las condiciones del área de estudio (datos cuantitativos de Atrazina en agua), se preparó un plan de muestreo. Este plan considera estrategias y acciones que garantizan la adecuada colecta de muestras para la generación de resultados acorde a los objetivos planteados en el proyecto.

6.1 Plan de muestreo

Un plan de muestreo correctamente preparado e implementado permite cumplir con los objetivos del muestreo, ayuda a evitar errores y confusión en el campo, preserva la salud y la seguridad de los trabajadores y ahorra tiempo y dinero.

Los objetivos del plan de muestreo en los distritos de riego son los siguientes:

- ❑ Recolectar muestras de agua subterránea y agua potable para el análisis de Atrazina y sus metabolitos.
- ❑ Calibrar el modelo PELMO para la estimación del riesgo de infiltración de Atrazina en mantos freáticos, con base a los resultados de experimentos realizados anteriormente y con datos de campo.

Las actividades llevadas a cabo previamente al muestreo se muestran a continuación:

- ❑ Especificación del o los lugares donde se realizarán los muestreos.
- ❑ Recopilación de información geográfica y croquis de localización de los puntos de muestreo en la zona de estudio.
- ❑ Selección de parámetros a determinar.
- ❑ Notificación al laboratorio de los límites mínimos de cuantificación requeridos por parámetro.
- ❑ Cálculo de la cantidad de muestra necesaria por parámetro, considerando el volumen de muestra para el análisis y el control de calidad analítico del área correspondiente.
- ❑ Elaboración de la lista de verificación, que incluye el equipo y material de apoyo necesario para el desarrollo de muestreo (Formato 8.1.2, IMTA, 2002), tales como guantes, jeringas, manguera, embudos, etiquetas para envases, entre otros.
- ❑ Preparación de contenedores: compra, lavado etiquetado, embalaje y transporte.
- ❑ Preparación de preservadores y soluciones.
- ❑ Preparación de equipos y material de seguridad.
- ❑ Elaboración de oficios de comisión.
- ❑ Generación y seguimiento del acuerdo para gastos de muestreo.
- ❑ Listado de los métodos y/o procedimientos de muestreo.
- ❑ Elaboración de un cronograma de actividades de muestreo y entrega del mismo al laboratorio.



Figura 6.1. Equipo para colecta de muestras y medición de conductividad eléctrica

Para la preservación y el almacenamiento de las muestras se deben especificar los recipientes apropiados, dependiendo del tipo de compuestos, siendo en este caso, plaguicidas organoclorados.

Tabla 6.1. Requisitos de envasado y preservación de muestras

Parámetro	Unidades	Vol. req. (ml)	Recipiente	Preservación	Tiempo límite de análisis
Atrazina	mg L ⁻¹	1000	Vidrio ámbar, con tapón de rosca*	HgCl ₂ , 10 mg L ⁻¹ . Mantener a 4°C en la oscuridad	7 días sin extracción 40 días con extracción

*La botella se debe enjuagar con acetona grado plaguicida.

6.2 Métodos y procedimientos de campo

Una vez que se definen los puntos de muestreo en el plano correspondiente, se aplican las siguientes técnicas de muestreo en campo:

Muestreo de agua en pozos agrícolas y de consumo humano

La colecta de muestras de agua no sólo involucra el adquirir físicamente la mejor muestra posible para el futuro análisis, sino también caracterizar el ambiente en el cual fue tomada y cuidar su manejo para que ésta sea representativa del agua del acuífero. El muestreo de agua subterránea y de pozos municipales y domésticos se hace antes de cualquier proceso de purificación o tratamiento. Esto determina con más exactitud que contaminantes están en el acuífero. La cloración, filtración, eliminación de dureza y otros tratamientos pueden alterar químicamente o absorber los analitos de interés.

Los elementos básicos del muestreo que se registran son (Barcelona *et al.*, 1985):

- a) Apertura y medida del pozo: Describir la condición del pozo y la ubicación en la bitácora de campo. Abrir el pozo. En la bitácora de campo, se anota el nombre y número del pozo.

- b) Volumen y tasa a la cual el agua es removida del pozo antes de la toma de muestra (purga): El sacar o purgar el agua estancada del pozo, bomba y tubería para asegurar que la muestra sea representativa del agua del acuífero en la profundidad del monitoreo, es uno de los aspectos más importantes en la colección de muestras. Los requerimientos de agua que debe ser removida del pozo de muestreo antes de la toma de muestra deben de ser verificados en campo por el monitoreo de parámetros de control. En este caso, se activa el sistema eléctrico del pozo para hacerlo funcionar durante un período de 25 min para posteriormente monitorear la conductividad eléctrica del agua y tomar la muestra.
- c) Toma de muestras
- Las muestras se colectan con el equipo y material de seguridad, siendo colectadas cuando las características químicas del agua subterránea bombeada se ha estabilizado, lo cual será indicado por las lecturas de conductividad eléctrica. Una vez estabilizada, se toman dos muestras de agua en recipientes de vidrio con capacidad de 1 L. A cada una se le adiciona 1 mL de HgCl_2 con una concentración de 10 mg L^{-1} como conservador. Los frascos con agua se colocan en una hielera para mantener las muestras a una temperatura de aproximadamente 4°C .
- d) Registro
- Las condiciones actuales durante cada toma de muestra son documentadas. Se marcan los frascos de muestra con una señal de identificación y fecha de muestreo para identificarlas fácilmente. La documentación mínima necesaria que debe especificarse durante el muestreo es la siguiente:
- Sitio de muestreo.
 - Nombre y número del pozo.
 - Fecha y hora de muestreo.
 - Numero de identificación de la muestra.
 - Nombre del muestreador.
 - Preservación utilizada y tiempo de preservación.
 - Profundidad de pozo y de obra de toma (bomba).
 - Gasto de bomba.
 - Conductividad eléctrica.

Muestreo de Pozos Domésticos

Se realiza el mismo procedimiento que en los pozos agrícolas y de consumo humano. Se obtiene la mayor información que sea posible del dueño de la casa o arrendatario. Esto incluye la profundidad y la longitud de la ranura del pozo, rendimiento, material de construcción, diámetro, tratamiento y ubicación. Se deja correr el agua a la taza máxima por lo menos 5 min. Se anotan los valores iniciales y finales de conductividad eléctrica. Se mide este parámetro cada minuto hasta que se estabiliza. Se colectan las muestras lo más cerca del pozo que sea posible y antes de cualquier sistema de tratamiento. Se anota la ubicación del muestreo, se llenan las botellas de muestra, y se preservan según el programa y los requisitos del laboratorio ya descritos.

Muestreo de agua del grifo

Cuando se muestrea de un grifo se deja fluir el agua hasta que la temperatura se estabilice (2 min). Se ajusta el flujo y se deja correr el agua a la taza máxima por lo menos 5 min. Se anotan los valores iniciales y finales de conductividad eléctrica. Se mide este parámetro cada minuto hasta que se estabiliza. El procedimiento para la toma, conservación y registro de muestras es igual al muestreo de agua de pozo.

6.3 Métodos y procedimientos de laboratorio

El método analítico utilizado para la cuantificación de Atrazina y sus metabolitos es el EPA 525.2 (Determinación de compuestos orgánicos en agua potable por extracción sólido-líquido y cromatografía de gases con columna capilar / espectrometría de masas) (USEPA, 1989). Es un método para la determinación de compuestos orgánicos en agua. El límite mínimo de cuantificación requerido para este parámetro es de $0.1 \mu\text{g mL}^{-1}$ para Atrazina.

En este método, los analitos son extraídos de la muestra de agua pasando 1 L de muestra a través de un disco o cartucho preacondicionado con una matriz sólida cubierta con una fase orgánica de C_{18} químicamente adherida (extracción sólido-líquido, LSE). Los

analitos son lavados del disco o cartucho de LSE con pequeños volúmenes de etil acetato y cloruro de metileno, y el extracto es concentrado por evaporización de alguno de los solventes. Los componentes de la muestra son separados, identificados y medidos por la inyección de una alícuota del concentrado en un sistema cromatógrafo de gases / espectrómetro de masas (GC/MS). Los compuestos lavados de la columna GC son identificados por comparación de sus espectros de masas y tiempos de retención en una base de datos. Los espectros de referencia y los tiempos de retención de los analitos son obtenidos de la medición de estándares de calibración bajo las mismas condiciones usadas para la muestra. El cloro residual en la muestra debe ser reducido adicionando 40 o 50 mg L⁻¹ de sulfito de sodio. Ajustar el pH a ≤ 2 adicionando HCl 6N. Es muy importante que la muestra sea desclorada antes de adicionar el ácido para bajar el pH de la muestra; el HCl debe ser adicionado en el lugar de muestreo para retardar la degradación biológica de los analitos. Las muestras deben ser congeladas o refrigeradas a 4°C desde la colecta hasta la extracción.

6.4 Muestreo en el distrito de riego 063 – Guasave, Sinaloa

El muestreo en el distrito de riego 063 se realizó durante el periodo del 6 al 11 de diciembre del 2004. Se tomaron muestras de agua subterránea de pozos agrícolas, pozos para consumo humano y de la red de distribución de agua potable (grifo) conforme al plan de muestreo.

Previo al muestreo, se localizaron las zonas del distrito que cuentan con pozos, tanto de consumo humano como de uso agrícola, ubicando los posibles puntos en función de la dirección del flujo. En este caso, el flujo tiene su origen en la sierra madre occidental y su dirección es hacia el Golfo de California.

Debido a que en la zona se presentaron precipitaciones en los últimos meses del año y las presas “Bacurato” y “El Sabinal” distribuyeron agua a las zonas de riego, la mayoría de los pozos de uso agrícola del distrito no estaban funcionando, por lo cual se llevo a cabo un recorrido en dichas zonas revisando cuales módulos de riego contaban con infraestructura para realizar el muestreo. De acuerdo con esto, finalmente se establecieron las zonas de muestreo que se muestran en la Figura 6.2.

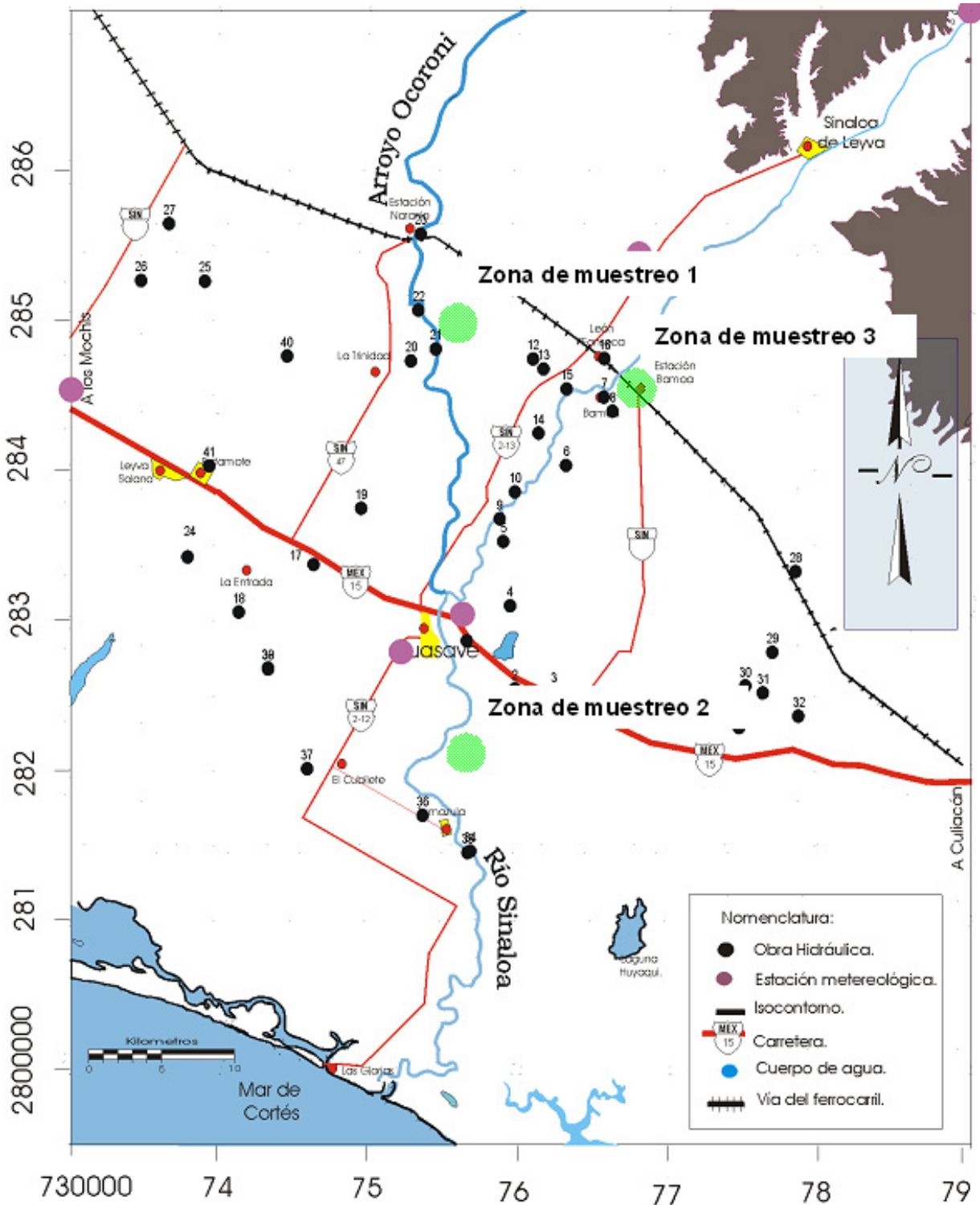


Figura 6.2. Localización de puntos de muestreo en el distrito de riego 063

6.4.1 Zona de muestreo I (7/12/2004)

El primer punto de muestreo se ubico en las cercanías de la localidad de Portugués de Gálvez, dentro del módulo de riego II-1 - Petatlán en Guasave, Sinaloa, donde se localizó el pozo agrícola No. 378 de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (Figura 6.3). Se realizó el procedimiento de toma de muestras mencionado anteriormente.



Figura 6.3. Pozo de uso agrícola en la zona de muestreo I

La segunda muestra se tomo en la localidad de El Toruno, Guasave, Sinaloa. Para ello se solicito permiso a un habitante del sitio para coleccionar la muestra de agua de grifo que proviene de la red de agua potable local (se le adiciona cloro al agua como tratamiento). Antes de obtener la muestra se dejó fluir el agua durante 10 min, tiempo en el cual la conductividad eléctrica se estabilizó. El procedimiento de conservación fue similar al anterior.

El tercer punto de muestreo se ubico en un predio de la localidad de El Toruno, seleccionando esta vez un pozo de tipo doméstico (diámetro de perforación de 4", Tubería de succión 1", profundidad de succión de 5 m, profundidad de construcción 10 m). El pozo contaba con una bomba tipo centrifuga que en ese momento no estaba operando, por lo cual se realizo un purgado y con ello tener una muestra representativa del agua subterránea del sitio (Figura 6.4).



Figura 6.4. Colecta de muestras de agua en zona de muestreo I

6.4.2 Zona de muestreo II (8/12/2004)

La segunda zona de muestreo se ubicó en las cercanías de la comunidad de La Uva, Guasave, Sinaloa, dentro del módulo de riego I-2 Milpas, donde se localizó el pozo agrícola No. 56 de la Comisión Nacional del Agua (Figura 6.5).



Figura 6.5. Pozo de uso agrícola en la zona de muestreo II

La segunda muestra se tomo en la localidad de La Cofradía, Guasave, Sinaloa, solicitando permiso a un habitante del sitio para coleccionar la muestra de agua de grifo que proviene de la red de agua potable local. El tercer punto de muestreo se ubico en un predio de la localidad de La Uva, Guasave, Sinaloa, seleccionando esta vez un pozo de tipo doméstico (diámetro de perforación de 4", Tubería de succión 1", profundidad de succión de 9 m, profundidad de construcción 12 m, profundidad de manto de 7 m). El pozo contaba con una bomba tipo centrifuga que en ese momento no estaba operando, por lo cual se realizo un purgado. El procedimiento de obtención y conservación de las muestras fue similar al de las muestras de agua del pozo de uso agrícola (Figura 6.6).



Figura 6.6. Colecta de muestras de agua en zona de muestreo II

6.4.3 Zona de muestreo III (9/12/2004)

La tercera zona de muestreo se ubicó en las cercanías de la comunidad de estación Bamoá, Guasave, Sinaloa, dentro del módulo de riego I-1, en Estación Bamoá, donde se localizó el pozo de agua potable No. 37 de la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Guasave (JUMAPAG), antes de su tratamiento (cloración). El procedimiento de obtención y conservación de las muestras fue similar que en agua de pozos de uso agrícola. (Figura 6.7).



Figura 6.7. Pozo de consumo humano en zona de muestreo III

La segunda muestra, del sistema de agua potable, se tomó en el pueblo de Bamoa, en el Rancho Zavala, Guasave, Sinaloa. El tercer punto de muestreo se ubico en un predio del pueblo de Bamoa, Guasave, Sinaloa, seleccionando esta vez una noria (diámetro del ademe de 1.5 m). El pozo contaba con una bomba tipo centrífuga que en ese momento no estaba operando, por lo cual se realizo un purgado. El procedimiento de conservación fue similar al de las muestras de agua del pozo de uso agrícola (Figura 6.8).



Figura 6.8. Colecta de muestras de agua de grifo y de noria en zona de muestreo III

En la Tabla 6.2 se presentan la información de cada punto de muestreo.

Tabla 6.2. Datos generales de los sitios de muestreo distrito de riego 063

Zona de muestreo	Sitio de obtención de muestra	Localidad	Datos								
			Profundidad [m]		Diámetro [pulg]		Bomba		Nivel del agua subterránea		Parámetros
			Construcción	Succión	Succión	Perforación	Gasto [L.p.s]	HP	Nivel estático [m]	Nivel dinámico [m]	Conduc. eléctrica [mS cm ⁻¹]
I	Pozo Agrícola	Portuguéz de Gálvez	80.00	80.00	18	-	-	-	3.82	8.00	1.72
	Pozo Doméstico	El Toruno	10.00	5.00	1	4	-	-	5.00	-	1.71
	Sistema de agua potable	El Toruno	-	-	-	-	-	-	-	-	0.51
II	Pozo Agrícola	La Uva	30.50	10.00	12	18	66.50	130	6.95	13.10	1.20
	Pozo Doméstico	La Uva	12.00	9.00	1	4	-	3/4	7.00	-	0.77
	Sistema de agua potable	La Cofradía	-	-	-	-	-	-	-	-	0.84
III	Pozo Agrícola	Estación Bamoá	130.00	-	6	12	-	-	15.00	18.00	0.53
	Noría doméstica	Bamoá (Pueblo)	10.00	5.00	1	3/4	-	1	-	-	1.12
	Sistema de agua potable	Estación Bamoá	30.00	-	-	-	-	-	10.00	-	0.78

- Información no disponible

6.4.4 Cuantificación de Atrazina en muestras de agua subterránea

De acuerdo a la técnica de laboratorio aplicada para la cuantificación de Atrazina (cromatografía de gases-masas de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, USEPA), y con ayuda del software del mismo sistema cromatográfico, se obtiene una grafica de regresión y se determina su linealidad. Las concentraciones de Atrazina y sus metabolitos (Desetil-atrazina y Desisopropil-atrazina) en las muestras de agua subterránea fueron más bajas que el límite de detección, comparándose también con los niveles establecidos por la normatividad internacional, tales como el límite de la Unión Europea de 0.1 µg L⁻¹, el de la Organización Mundial de la Salud (OMS), que es de 2 µg L⁻¹, o de 3 µg L⁻¹ de la USEPA (Tabla 6.3)

Tabla 6.3. Resultados de laboratorio de las concentraciones de Atrazina en muestras de agua subterránea del distrito de riego 063

Zona de muestreo	Sitio de obtención de muestra	Localización	Parámetros		
			Atrazina [$\mu\text{g L}^{-1}$]	Desetil-atrazina [$\mu\text{g L}^{-1}$]	Desisopropil-atrazina [$\mu\text{g L}^{-1}$]
I	Pozo Agrícola	Portuguéz de Gálvez	<0.1	<0.25	<1
	Pozo Doméstico	El Toruno	<0.1	<0.25	<1
	Sistema de agua potable	El Toruno	<0.1	<0.25	<1
II	Pozo Agrícola	La Uva	<0.1	<0.25	<1
	Pozo Doméstico	La Uva	<0.1	<0.25	<1
	Sistema de agua potable	La Cofradía	<0.1	<0.25	<1
III	Pozo Agrícola	Estación Bamao	<0.1	<0.25	<1
	Noria doméstica	Bamao (Pueblo)	<0.1	<0.25	<1
	Sistema de agua potable	Estación Bamao	<0.1	<0.25	<1

6.5 Muestreo en el distrito de riego 035 – La Antigua, Veracruz

El muestreo en el distrito de riego 035 se realizó durante el periodo del 16 al 20 de Abril del 2005. Se tomaron muestras de agua subterránea de pozos agrícolas, norias, pozos domésticos y de la red de distribución de agua potable (grifo), así como muestras de suelo de las zonas de cultivo, cercanas a los pozos agrícolas.

Nuevamente se preparó un plan de muestreo con los mismos objetivos planteados en el proyecto. Previo al muestreo, se localizaron las zonas del distrito que cuentan con pozos de uso agrícola, ubicando los posibles puntos en función de la dirección del flujo. En este caso, el flujo tiene su origen en la sierra madre oriental y su dirección es hacia el Golfo de México. Como la mayoría de los pozos de uso agrícola del distrito se encontraban funcionando, fácilmente se establecieron las zonas de muestreo que se muestran en la Figura 6.9.

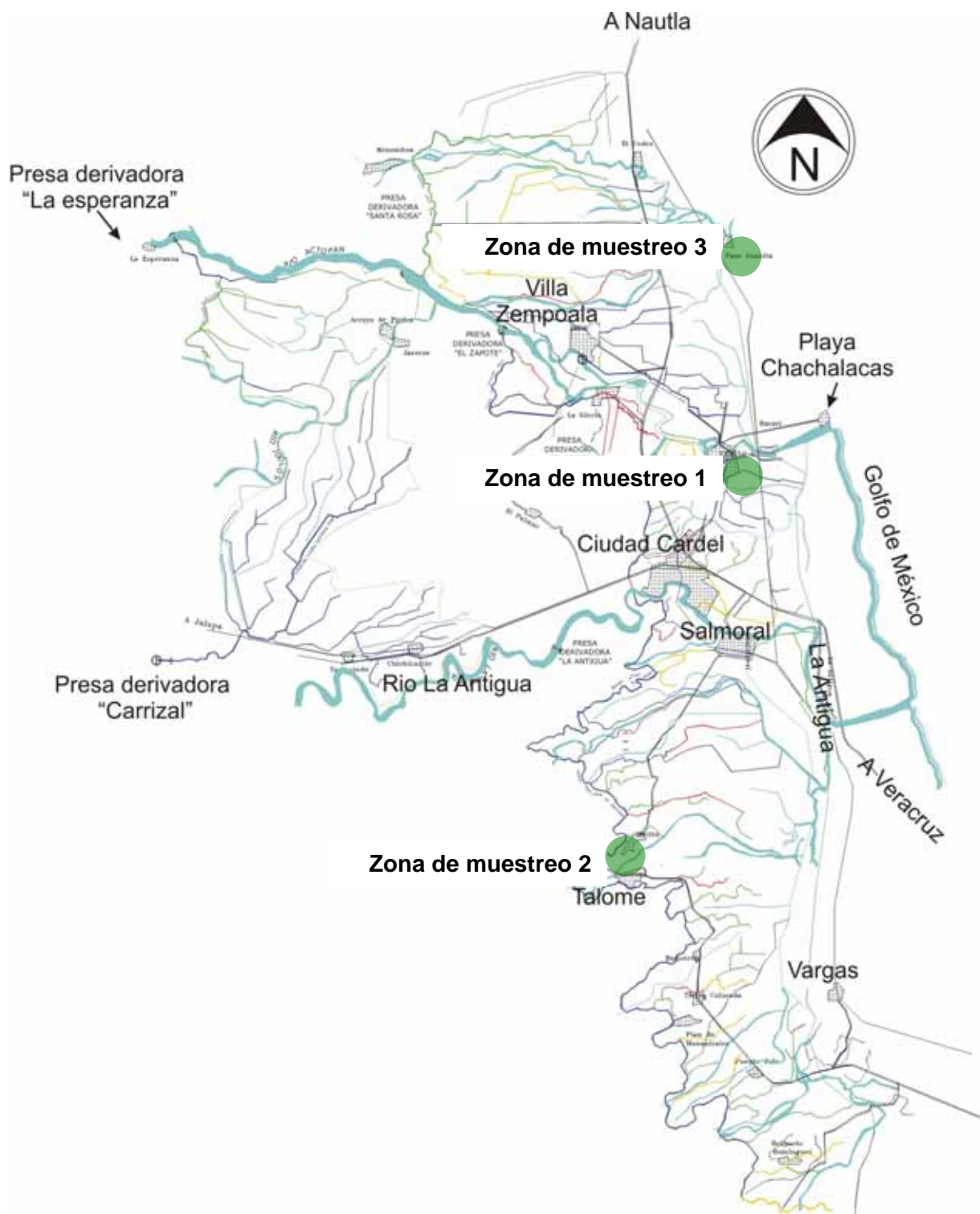


Figura 6.9. Localización de puntos de muestreo en el Distrito de Riego 035

6.5.1 Zona de muestreo I (18/04/2005)

El primer punto de muestreo se ubico en las cercanías de la localidad de Paraíso, dentro del módulo de riego II-1 - Actopan, en el municipio de Úrsulo Galván, Veracruz, donde se localizó el pozo agrícola No. 4 “La Charca” de la Comisión Nacional del Agua. Se tomaron dos muestras de acuerdo al procedimiento descrito. También se tomo la muestra de suelo dentro de los primeros 20 cm del perfil en la zona de cultivo de caña de azúcar, que es regada por el pozo muestreado (Figura 6.10).



Figura 6.10. Pozo de uso agrícola y colecta de muestra de suelo en la zona de muestreo I

La segunda muestra se tomo en el pueblo Paraíso, Municipio de Úrsulo Galván, Veracruz. Para ello se solicito permiso a un habitante del sitio para coleccionar la muestra de agua de grifo que proviene de la red de agua potable local (se le adiciona cloro al agua como tratamiento). El tercer punto de muestreo se ubico en un predio de la misma localidad, seleccionando esta vez un pozo de tipo domestico. El pozo contaba con una bomba tipo centrifuga que en ese momento no estaba operando, por lo cual se realizo un purgado y con ello tener una muestra representativa del agua subterránea del sitio. El procedimiento obtención y conservación fue similar al de las muestras de agua del pozo de uso agrícola (Figura 6.11).



Figura 6.11. Colecta de muestras de agua en zona de muestreo I

6.5.2 Zona de muestreo II (19/04/2005)

La segunda zona de muestreo se ubicó en la comunidad de Pureza, La Antigua, Veracruz, dentro del módulo de riego I-1 La Antigua (Figura 6.12). En este sitio también se tomó una muestra de suelo.



Figura 6.12. Pozo de uso agrícola en la zona de muestreo II

La segunda muestra se tomo en la misma localidad. Para ello se solicito permiso para coleccionar la muestra de agua de grifo que proviene de la red de agua potable local (adicionan cloro como tratamiento). El procedimiento obtención y conservación fue similar al de las muestras de agua del pozo de uso agrícola. El tercer punto de muestreo se ubico en un vivero de la localidad de Tolome, en el municipio de Paso de Ovejas, Veracruz, seleccionando esta vez una noria de tipo doméstico. La noria contaba con una bomba tipo centrifuga que en ese momento no estaba operando, por lo cual se realizo un purgado. Antes de obtener la muestra se mantuvo el flujo de agua por aproximadamente 15 min, tiempo en el cual la conductividad eléctrica se estabilizo. El procedimiento obtención y conservación fue similar al de las muestras de agua del pozo de uso agrícola (Figura 6.13).



Figura 6.13. Colecta de muestras de agua en zona de muestreo II

6.5.3 Zona de muestreo III (19/04/2005)

La tercera zona de muestreo se ubicó en la comunidad de Paso de Doña de Juana, dentro del módulo de riego II-1 - Actopan, en el municipio de Úrsulo Galván, Veracruz, donde se localizaron los pozos agrícolas No. 3 y 4. Nuevamente se tomó muestra del suelo de la zona de cultivo regada por estos pozos agrícolas (Figura 6.14).



Figura 6.14. Pozos agrícolas en zona de muestreo III

La segunda y tercera muestras se tomaron en el pueblo de Paso de Doña Juana, en el municipio de Úrsulo Galván, Veracruz. Para ello se solicitó permiso a un habitante del sitio para coleccionar tanto la muestra de agua de grifo que proviene del sistema de agua potable, como del agua de pozo doméstico, ya que no había otros domicilios con este tipo de pozo (Figura 6.15).



Figura 6.15. Colecta de muestras de agua y suelo en zona de muestreo III

En la Tabla 6.4 se presentan la información de cada punto de muestreo.

Tabla 6.4. Datos generales de los sitios de muestreo distrito de riego 035

Zona de muestreo	Sitio de obtención de muestra	Localidad	Datos								
			Profundidad [m]	Diámetro [pulg]			Bomba		Nivel del agua subterránea		Parámetros
			Construcción	Bomba	Succión	Perforación	Gasto [L.p.s]	HP	Nivel estático [m]	Nivel dinámico [m]	Cond. Elec. [mS cm ⁻¹]
I	Pozo Agrícola	Paraíso	81.80	4"	22"	14"	65	15	3.50	6.80	0.47
	Pozo Doméstico	Paraíso	5.00	1½"	-	-	-	1	1.50	-	0.76
	Sistema de agua potable	Paraíso	-	-	-	-	-	-	-	-	0.60
II	Pozo Agrícola	Pureza	100.73	8"	14"	14"	38	75	15	32.25	0.50
	Noria doméstica	Tolome	4.00	-	-	1½"	0.20	1	2.00	-	1.22
	Sistema de agua potable	Pureza	-	-	-	-	-	-	-	-	0.54
III	Pozo Agrícola	Paso de doña Juana	80.00	8"	22"	14"	45	15	7.86	14.20	0.56
	Pozo Agrícola	Paso de doña Juana	80.00	8"	22"	14"	50	20	18	22.24	0.60
	Pozo Doméstico	Paso de doña Juana	10.00	¾"	-	-	-	½	7.00	-	1.09
	Sistema de agua potable	Paso de doña Juana	-	-	-	-	-	-	-	-	0.63

- Información no disponible

6.5.4 Cuantificación de Atrazina en muestras de agua subterránea

Nuevamente, empleando la técnica de laboratorio para la cuantificación de Atrazina (cromatografía de gases-masas de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, USEPA), y con ayuda del software del mismo sistema cromatográfico, se obtiene una grafica de regresión y se determina su linealidad. Las concentraciones de Atrazina en las muestras de agua subterránea resultaron bajas o no detectables, comparándose tanto con el límite de cuantificación como con los niveles establecidos por la normatividad internacional de la USEPA y la OMS. Esta vez no se cuantificaron metabolitos de Atrazina (Tabla 6.5)

Tabla 6.5. Resultados de laboratorio de las concentraciones de Atrazina en muestras de agua subterránea del distrito de riego 035

Zona de muestreo	Sitio de obtención de muestra	Localización	Parámetros
			Atrazina [$\mu\text{g L}^{-1}$]
I	Pozo Agrícola	Paraíso	<0.2
	Pozo Doméstico	Paraíso	<0.2
	Sistema de agua potable	Paraíso	<0.2
II	Pozo Agrícola	Pureza	<0.2
	Noria doméstica	Tolome	<0.2
	Sistema de agua potable	Pureza	<0.2
III	Pozo Agrícola	Paso de doña Juana	<0.2
	Pozo Agrícola	Paso de doña Juana	<0.2
	Pozo Doméstico	Paso de doña Juana	<0.2
	Sistema de agua potable	Paso de doña Juana	<0.2

6.6 Muestreo en el distrito de riego 087 – Rosario-Mezquite, Michoacán

El muestreo en el distrito de riego 087 se realizó en el periodo del 22 al 25 de mayo del 2005. Se tomaron muestras de agua subterránea de pozos agrícolas, norias, pozos domésticos y de la red de distribución de agua potable (grifo), así como muestras de suelo de las zonas de cultivo cercanas a los pozos agrícolas.

Se preparó un plan de muestreo con los mismos objetivos planteados en el proyecto. Previo al muestreo, se localizaron las zonas del distrito que cuentan con pozos de uso agrícola, ubicando los posibles puntos en función de la dirección del flujo y de los pozos que se encontraban funcionando, con lo que se establecieron las zonas de muestreo que se muestran en la Figura 6.16.

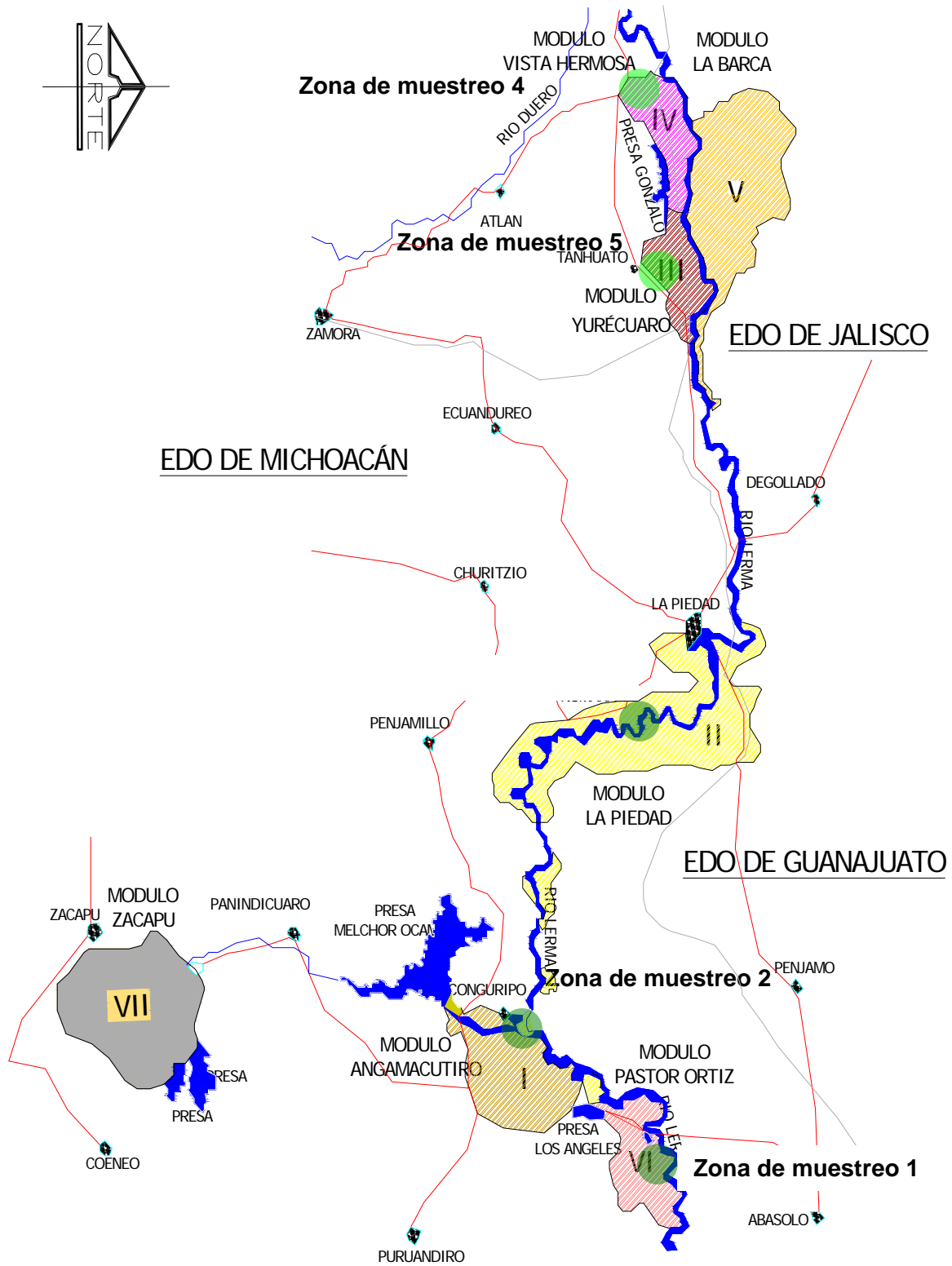


Figura 6.16. Localización de puntos de muestreo en el distrito de riego 087

6.6.1 Zona de muestreo I (23/05/2005)

El primer punto se ubico en la localidad de San Isidro, Piedras Blancas, dentro del módulo de riego VI – Pastor Ortiz, en el municipio de José Sixto Verduzco, Michoacán donde se localizó el pozo agrícola “Las Majadas”. Se tomaron muestras de agua y de suelo de acuerdo al procedimiento descrito para los distritos de riego anteriores (Figura 6.17).



Figura 6.17. Pozo de uso agrícola y colecta de muestra de suelo en la zona de muestreo I

La segunda muestra se tomo en el mismo municipio, en un pozo de agua para consumo humano perteneciente al sistema de agua potable de la localidad (Figura 6.18).



Figura 6.18. Pozo de consumo humano en la zona de muestreo I

6.6.2 Zona de muestreo II (23/05/2005)

La segunda zona de muestreo se ubicó en la colonia Gildardo Magaña, dentro del módulo de riego I - Angamacutiro, donde se localizó el pozo agrícola No. 8 de la Comisión Nacional del Agua. En este sitio también se tomó una muestra de suelo (Figura 6.19).



Figura 6.19. Pozo de uso agrícola y muestra de suelo en la zona de muestreo II

La segunda y tercera muestras se tomaron en un pozo somero y en un pozo de consumo humano dentro del pueblo de Gildardo Magaña (Figura 6.20).



Figura 6.20. Noria y pozo de consumo humano en la zona de muestreo II

6.6.3 Zona de muestreo III (23/05/2005)

Se ubicó en la comunidad de La Tepuza, dentro del módulo de riego II – La Piedad, donde se localizó un pozo agrícola y un pozo somero. Se tomó muestra del suelo (Figura 6.21).



Figura 6.21. Pozo - Noria y muestra de suelo en zona de muestreo III

6.6.4 Zona de muestreo IV (24/05/2005)

La cuarta zona se ubico en la localidad de El Alvareño, en el módulo de riego IV – Vista Hermosa. Se muestrearon un pozo doméstico y un pozo de uso agrícola. (Figura 6.22).



Figura 6.22. Pozo doméstico y pozo de uso agrícola en zona de muestreo IV

6.6.5 Zona de muestreo V (24/05/2005)

La quinta zona de muestreo se ubicó en la comunidad de San Miguel de Campus, municipio de Yurécuaro, dentro del módulo de riego III – Yurécuaro, Michoacán, donde se localizó un pozo agrícola de uso particular. El procedimiento de obtención y conservación de las muestras fue similar al ya descrito.

En la Tabla 6.6 se presentan la información de cada punto de muestreo.

Tabla 6.6. Datos generales de los sitios de muestreo en el distrito de riego 087

Zona de muestreo	Sitio de obtención de muestra	Localidad	Datos								
			Profundidad [m]	Diámetro [pulg]			Bomba		Nivel del agua subterránea		Parámetros
			Construcción	Bomba	Succión	Perforación	Gasto [L.p.s]	HP	Nivel estático [m]	Nivel dinámico [m]	Cond. Elec. [mS cm ⁻¹]
I	Pozo Agrícola	San Isidro	75.00	8"	8"	14"	60	75	25.00	35.00	0.55
	Sistema de agua potable	San Isidro	80.00	4"	4"	8"	-	15	25.00	35.00	0.85
II	Pozo Agrícola	Gildardo Magaña	75.00	10"	10"	14"	45	75	7.00	14.00	0.88
	Noria doméstica	Gildardo Magaña	27.00	4"	4"	8"	14	30	8.00	14.00	1.50
	Sistema de agua potable	Gildardo Magaña	45.00	4"	4"	12"	12	15	7.00	14.00	0.74
III	Pozo Agrícola	La Tepuza	85.00	8"	8"	14"	-	125	7.00	27.00	1.24
	Noria doméstica	La Tepuza	20.00	4"	4"	6"	11	10	7.00	17.00	1.43
IV	Pozo Agrícola	San Silvestre	100.00	10"	10"	14"	67.6	125	15.00	22.00	0.75
	Pozo doméstico	El Alvareño	14.00	¾"	¾"	4"	1.5	¾	2.00	3.50	1.16
V	Pozo Agrícola	San Miguel de Campus	92.00	6"	6"	8"	25	50	18.00	25.00	0.78

- Información no disponible

6.6.6 Cuantificación de Atrazina en muestras de agua subterránea

En este caso, las concentraciones de Atrazina en las muestras de agua subterránea nuevamente fueron muy bajas. Sin embargo, si se detectó Atrazina en una muestra (pozo doméstico en la comunidad de El Alvareño), aunque en una concentración muy baja respecto al límite cuantificable por el método de cromatografía de gases-masas empleado para su detección. (Tabla 6.7)

Tabla 6.7. Resultados de laboratorio de las concentraciones de Atrazina en muestras de agua subterránea del distrito de riego 087

Zona de muestreo	Sitio de obtención de muestra	Localización	Parámetros
			Atrazina [$\mu\text{g L}^{-1}$]
I	Pozo Agrícola	San Isidro	<0.2
	Sistema de agua potable	San Isidro	<0.2
II	Pozo Agrícola	Gildardo Magaña	<0.2
	Noria domestica	Gildardo Magaña	<0.2
	Sistema de agua potable	Gildardo Magaña	<0.2
III	Pozo Agrícola	La Tepuza	<0.2
	Noria doméstica	La Tepuza	<0.2
IV	Pozo Agrícola	El Alvareño	<0.2
	Pozo doméstico	El Alvareño	Detectada, <0.5
V	Pozo Agrícola	San Miguel de Campus	<0.2

7. MODELACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO DE CONTAMINAR MANTOS FREÁTICOS

7.1 Modelación matemática del transporte de plaguicidas hacia aguas subterráneas

La modelación matemática es una herramienta importante para proceder a una evaluación realista de las posibilidades de transporte de los plaguicidas hacia y por las aguas subterráneas, puesto que permite cuantificar los diversos procesos que intervienen y su interacción, así como evaluar estrategias de control de contaminación, para detectar fuentes de contaminación y para la planeación del desarrollo urbano, agrícola e industrial. La necesidad de expandir la aplicación de los modelos de simulación de los cultivos y la migración de agroquímicos en áreas agrícolas se debe a la variedad de los suelos, del clima, y a las diferentes prácticas agrícolas (Német, 1996).

El movimiento de los herbicidas en el subsuelo puede ser adecuadamente estimado sólo cuando se consideran todos los procesos importantes responsables de la infiltración. Los programas computacionales que se han creado están basados en el conocimiento de diferentes teorías y ecuaciones para estimar la movilidad de químicos en suelos. Comparado con la ejecución de trabajos de campo, el uso de modelos es relativamente más barato y consume menos tiempo. Sin embargo, los modelos deben ser examinados cuidadosamente para verificar sus habilidades predictivas.

7.2 Programa PELMO (PEsticide Leaching MOdel)

El programa denominado PELMO (Modelo para la Infiltración de Plaguicidas), creado por el Dr. M. Klein (Klein *et al.*, 2002), permite la simulación del movimiento de químicos en el sistema no saturado del suelo y por debajo de la zona de las raíces de las plantas. Las ecuaciones que describen el transporte y transformación de plaguicidas en PELMO han sido seleccionadas con base a pruebas y estudios que están disponibles para varias sustancias. El

tiempo de transporte, incluyendo advección y dispersión, son representados en el programa, que esta basado en el modelo PRZM-1 (Modelo de Plaguicidas en la Zona de las Raíces), creado por la USEPA, en 1985. PELMO considera varios factores (Tabla 7.1), que son empleados para estimar el potencial de infiltración. También toma en cuenta parámetros para la simulación de riego y lluvias.

La información necesaria para ejecutar el programa requiere de archivos de entrada. La interfase consiste en una serie de pantallas interactivas para la introducción de la información del herbicida (extensión PSM), del escenario con características del suelo y del cultivo (extensión SZE), y del clima (extensión CLI).

Tabla 7.1. Parámetros de entrada para PELMO

Factor	Parámetros
Herbicida	Tasa de degradación, vida media, factores de corrección de temperatura y humedad, coeficientes de partición carbón orgánico (Koc) y en el suelo (Kd), exponentes de Freundlich, limites para el uso de la ecuación de Freundlich, cantidad, fecha y profundidad de aplicación. Si debe estimarse la volatilización del herbicida, se especifica la presión de vapor, la solubilidad en agua y la masa molecular.
Suelo	Latitud, profundidad, % de carbón orgánico, pH, textura, constantes hídricas, biodegradación para cada horizonte.
Clima	Precipitación y temperatura máxima y media diarias, humedad relativa del aire, y evapotranspiración.
Cultivo	Tipo y número de cultivos, número de periodos de siembra, fechas de maduración, emergencia y cosecha.

El programa PELMO ha mostrado en varios estudios a nivel mundial (Klein *et al.*, 2002) ser una herramienta útil para obtener estimaciones del comportamiento de herbicidas en suelo, mejorando la forma de relacionar los datos experimentales y los resultados de la modelación. A diferencia del modelo PRZM-1, PELMO funciona en ambiente Windows, de Microsoft y esta disponible en Internet.

PELMO es un modelo unidimensional que considera tanto la adsorción como la biodegradación de los solutos. Los procesos simulados son los mostrados en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2. Resumen de los procesos simulados en PELMO

Proceso	Descripción
Movimiento de agua	Flujo de agua basado en la capacidad de campo.
Movimiento de plaguicidas	Ecuación de convección – dispersión basada en el paso diario del tiempo para el transporte de plaguicidas.
Simulación de siembra	Cambiando la zona de las raíces durante la temporada de crecimiento, el área de la vegetación, intercepción de agua y plaguicidas y aplicando degradación de la vegetación.
Degradación en suelo	Velocidad de degradación de primer orden. Corrección de la velocidad de degradación con la profundidad, humedad del suelo y temperatura del suelo
Adsorción de plaguicidas	Los coeficientes Kd, Koc, así como la ecuación de Freundlich pueden considerarse. Incremento de adsorción con el tiempo.
Volatilización de plaguicidas	Modelo simplificado usando ecuaciones de Fick y Henry.
Escorrentía	Empleando la curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USSCS)
Erosión del suelo	Basada en la Ecuación Universal Modificada de Perdida de Suelo.
Temperatura del suelo	Modelo empírico que emplea la temperatura del aire.
Crecimiento de plantas	Modelo basado en las concentraciones del suelo.
Aplicación de plaguicidas	Puede ser spray a nivel foliar, directo a la superficie del suelo o dentro del suelo (la variedad de suelos puede ser especificada)
Metabolismo	Utiliza un esquema con más de 8 metabolitos que pueden ser simulados paralelamente con el plaguicida utilizado.

7.2.1 Descripción del modelo numérico

Las ecuaciones del balance de agua se desarrollan de manera separada para la zona superficial, los horizontes que comprenden la zona radicular y los horizontes restantes dentro de la zona no saturada.

$$\text{Zona superficial:} \quad (SW)_1^{t+1} = (SW)_1^t + P + SM - L_1 - E_1 \quad (7.1)$$

$$\text{Zona radicular:} \quad (\text{SW})_i^{t+1} = (\text{SW})_i^t + L_{i-1} - U_i - L_i \quad (7.2)$$

$$\text{Debajo de la zona radicular:} \quad (\text{SW})_i^{t+1} = (\text{SW})_i^t + L_{i-1} - L_i \quad (7.3)$$

Donde:

$(\text{SW})_i^t$: Agua en el suelo, en la capa i , en el día t [cm]

P : Precipitación [cm d⁻¹]

SM : Nieve derretida [cm d⁻¹]

E_i : Evaporación en la capa i [cm d⁻¹]

U_i : Transpiración en la capa i [cm d⁻¹]

L_i : Percolación fuera de la zona i [cm d⁻¹]

El agua que se infiltra en el suelo es redistribuida en forma tal que el exceso de agua en una capa está siempre guiada hacia abajo hasta que todas las capas están en o debajo de la capacidad de campo. En el programa se puede seleccionar si el drenaje de los compartimientos individuales ocurre instantáneamente (opción de drenaje libre) o a una velocidad dada por el parámetro de la velocidad de drenaje.

$$\Theta_i^{t+1} = (\Theta_i^{t*} - \Theta_{FCi}) \exp(-\alpha \Delta t) + \Theta_{FCi} \quad (7.4)$$

Donde:

Θ_i^{t*} : Contenido de agua en el suelo, en la capa i en el día t , más cualquier precolación de la capa de suelo $i-1$, antes de la ocurrencia de cualquier drenaje [m³ m⁻³]

Θ_i^t : Contenido de agua en el suelo, en la capa i y al final del día t [m³ m⁻³]

Θ_{FCi} : Contenido de agua en el suelo a la capacidad de campo, en la capa i [m³ m⁻³]

α : Parámetro de la velocidad de drenaje [L día⁻¹]

Δt : Paso de tiempo [día]

Si se conoce el contenido de arena y arcilla, se estima la capacidad de campo (por PELMO) utilizando la siguiente ecuación:

$$\Theta_{FC} = \frac{(F_{CL} \times 60 + F_{SA} \times 20 + F_{SI} \times 40)}{10,000} \quad (7.5)$$

Donde:

- Θ_{FC} : Capacidad de campo [$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$]
 F_{CL} : Contenido de arcilla [%]
 F_{SI} : Contenido de limo [%]
 F_{SA} : Contenido de arena [%]

El potencial de evapotranspiración puede introducirse como un valor numérico constante, o calcularse de acuerdo a las ecuaciones de Haude o Hamon. Las ecuaciones son, respectivamente:

$$E_{\text{pot}} = \frac{f_{\text{Haude}} ES_{14} (100 - RH)}{100} \quad (7.6)$$

Donde:

- E_{pot} : Potencial diario de evapotranspiración [mm d^{-1}]
 f_{Haude} : Factor mensual de Haude [mm h Pa^{-1}]
 ES_{in} : Presión de vapor saturado a las 2:00 p.m. [h Pa]
 RH : Humedad relativa del aire a las 2:00 p.m.

$$E_{\text{pot}} = \frac{0.021 L_d^2 ES_o}{(T + 273)} \quad (7.7)$$

Donde:

- L_d : Posibles horas de la luz solar por día [h]
 ES_o : Presión de vapor saturado a la temperatura media del aire [h Pa]
 T : Temperatura media del aire [$^{\circ}\text{C}$]

La actual evapotranspiración diaria se divide entre la evaporación de la cubierta de las plantas, la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo.

Las temperaturas del suelo se estiman basándose en la temperatura diaria del aire mediante un modelo empírico, de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$T_{t+1} = T_t + (T_{t+1,\text{aire}} - T_t) 0.346 \exp(-0.027028 \times d) \quad (7.8)$$

Donde:

- T_t : Temperatura del suelo, en el día t [$^{\circ}\text{C}$]
 $T_{t,\text{aire}}$: Temperatura media del aire, en el día t [$^{\circ}\text{C}$]
 α : Profundidad de la capa de suelo [cm]

La adsorción de los plaguicidas se estima de acuerdo a la ecuación de Freundlich:

$$C_S = K_f C_{sol}^n \quad (7.9)$$

Donde:

- K_f : Constante de sorción en la ecuación de Freundlich [$(\mu\text{g g}^{-1})/(\mu\text{g ml}^{-1})$]
 C_{sol} : Concentración del plaguicida en el agua del suelo [$\mu\text{g ml}^{-1}$]
 n : Exponente de Freundlich
 C_S : Concentración adsorbida [$\mu\text{g g}^{-1}$]

El incremento de la adsorción en el tiempo se estima utilizando un modelo lineal:

$$C_{Si+1} = \frac{C_{Si} \times F_{\text{tiempo}}}{(100 \times 360)} \quad (7.10)$$

Donde:

- C_{Si} : Adsorción del día i , después de la primera aplicación
 C_{Si+1} : Adsorción del día $i+1$, después de la primera aplicación
 F_{tiempo} : Incremento anual de adsorción [%]

Para considerar la influencia de la temperatura del suelo en la biodegradación, PELMO utiliza la regla Q10, la cual indica que un incremento de temperatura (*e.g.* 10°C) conduce a un incremento constante en la degradación (*e.g.* factor de 2), matemáticamente expresado por:

$$K_{\text{Temp}} = Q^{(T-T_0)/10} \quad (7.11)$$

Donde:

- K_{Temp} : Factor de corrección para la biodegradación, con base a la temperatura actual

- Q: Factor de incremento de la velocidad de degradación, dada por un incremento en la temperatura de 10°C
- T_o: Temperatura durante el experimento de biodegradación [°C]
- T: Temperatura actual del suelo [°C]

Además de la influencia de la temperatura del suelo, la vida media de un plaguicida también depende de la humedad del suelo.

El programa PELMO puede corregir la velocidad constante de degradación. El usuario puede decidir si la corrección se basa en la humedad absoluta del suelo (planteamiento original de Walker) o en la humedad relativa del suelo (humedad del suelo relacionada con la capacidad de campo).

La ecuación que considera la humedad absoluta del suelo es:

$$K_{\text{moi}} = \left(\frac{\theta}{\theta_o} \right)^e \quad (7.12)$$

Donde:

- K_{moi}: Factor de corrección para la biodegradación, con base a la humedad actual del suelo
- θ: Contenido de humedad actual del suelo (vol. %)
- θ_o: Humedad del suelo durante la prueba de biodegradación
- e: Exponente

La volatilización de los plaguicidas se basa en la Ley de Henry y de Fick, usando la constante de Henry y el coeficiente de difusión en el aire. Para estimar la cantidad de pesticida que se mueve de la superficie del suelo a la atmósfera se asume que la concentración del pesticida en el aire, sobre el suelo, es baja. Además, se debe introducir el espesor de la capa activa, *d*.

Por último, PELMO considera únicamente volatilización de plaguicida del agua que esta en el suelo (y no de la fase adsorbida). Basado en ello, se calcula la volatilización mediante la ecuación siguiente:

$$J_v = -D \times \frac{H c_i}{d} \quad (7.13)$$

Donde:

- D : Coeficiente de difusión en el aire [$\text{cm}^2 \text{d}^{-1}$]
 J_v : Velocidad de volatilización [$\text{g cm}^{-2} \text{d}^{-1}$]
d : Capa activa [cm]
H : Constante de Henry
 c_i : Concentración del plaguicida disuelto en la capa superficial [g cm^{-1}]

La captura plaguicidas por las plantas se estima siguiendo un modelo lineal:

$$J_{UPi} = F_{UP} \times c_i \times ET_i \quad (7.14)$$

Donde:

- F_{UP} : Factor de captura por las plantas
 c_i : Plaguicida disuelto en la capa de suelo i [g cm^{-3}]
 ET_i : Evapotranspiración actual [cm d^{-1}]

7.3 Diseño de escenarios para la simulación

Para la simulación de la infiltración de Atrazina se consideran los siguientes escenarios climatológicos para cada distrito de riego de estudio: a) precipitación pluvial alta, y b) precipitación pluvial baja. La información de las precipitaciones se elige respecto a datos climatológicos de las estaciones representativas de cada distrito (CNA, 1990) y de acuerdo a los años que contienen el mayor número de eventos de lluvia registrados, empleando la base de datos ERIC II (IMTA, 2002) (Anexo B, pág. 112). La simulación se realiza para un periodo de 50 años para conocer el tiempo en que la concentración de Atrazina desaparece del perfil del suelo y llega hasta el manto freático. El plaguicida se deja de aplicar a partir del año 27 (valor establecido por PELMO). Se adiciona también el efecto de la lámina de riego necesaria a aplicar por tipo de cultivo y tipo de suelo (Anexo C, pág. 121) de cada distrito de riego, utilizando el programa SPRITEER (IMTA, 2001). El diseño se muestra en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3. Cuadro resumen de escenarios simulados

Distrito de riego	Escenario	Estación climatológica	Año	Temperatura promedio [°C]	Precipitación pluvial [cm]	Lámina de riego [cm]	Lámina total [cm]
DR 063	Precipitación pluvial alta	Guasave, DGE No. 25038	1983	21.1	42	60	102
	Precipitación pluvial baja		1987	20.9	15	75	90
DR 035	Precipitación pluvial alta	Santa Rosa, No. 30158	1974	23.9	86	113	199
	Precipitación pluvial baja		1962	22.1	24	175	199
DR 087	Precipitación pluvial alta	Cuatro Esquinas, No. 16191	1983	15.2	87	72	159
	Precipitación pluvial baja		1977	13.1	60	72	132

Tomando en cuenta que la degradación de los plaguicidas en el suelo disminuye conforme aumenta la profundidad del suelo (condiciones anaeróbicas y consecuente disminución de actividad microbiana) (Accinelli *et al.*, 2001), en el programa PELMO se proponen factores de corrección o ajuste para la biodegradación del químico en función de la profundidad cuando no se cuenta con datos experimentales (Tabla 7.4). Estos factores son establecidos por el Forum for the Co-ordination of Pesticide Fate Models and their Use (FOCUS) para cada uno de los escenarios propuestos. Con el objetivo de crear un marco crítico para cada escenario planteado, no se simulan erosión, escurrimiento, dispersión hidrodinámica, drenaje y volatilización del plaguicida.

Tabla 7.4. Factores de transformación con respecto a la profundidad

Horizonte [cm]	Factor de transformación
0-30	1
30-60	0.5
60-100	0.3
> 100	0

La definición de los parámetros de entrada está basada en datos experimentales (González, 2005), datos de campo obtenidos durante los muestreos a los distritos de riego y datos bibliográficos, calibrando de esta forma el modelo (Anexo C).

7.4 Resultados de la simulación en los distritos de riego de estudio

7.4.1 Resultados de la simulación en el distrito de riego 063 - Guasave, Sinaloa

La gráfica muestra que los resultados de las concentraciones promedio anuales de Atrazina, tanto en el escenario de precipitación pluvial alta como en el de precipitación pluvial baja, no exceden los valores establecidos por la OMS ($2 \mu\text{g L}^{-1}$) y por la USEPA ($3 \mu\text{g L}^{-1}$) para agua para consumo humano, solamente el de la UE ($0.1 \mu\text{g L}^{-1}$). La concentración máxima del herbicida es obtenida a los 9 años ($0.25 \mu\text{g L}^{-1}$) de simulación de su aplicación en el primer caso, y a los 20 años ($0.18 \mu\text{g L}^{-1}$) en el segundo. Ya que el programa PELMO permite simulaciones con un máximo de 26 años, después de este tiempo hay un decremento en la concentración, como se observa en la Figura 7.1.

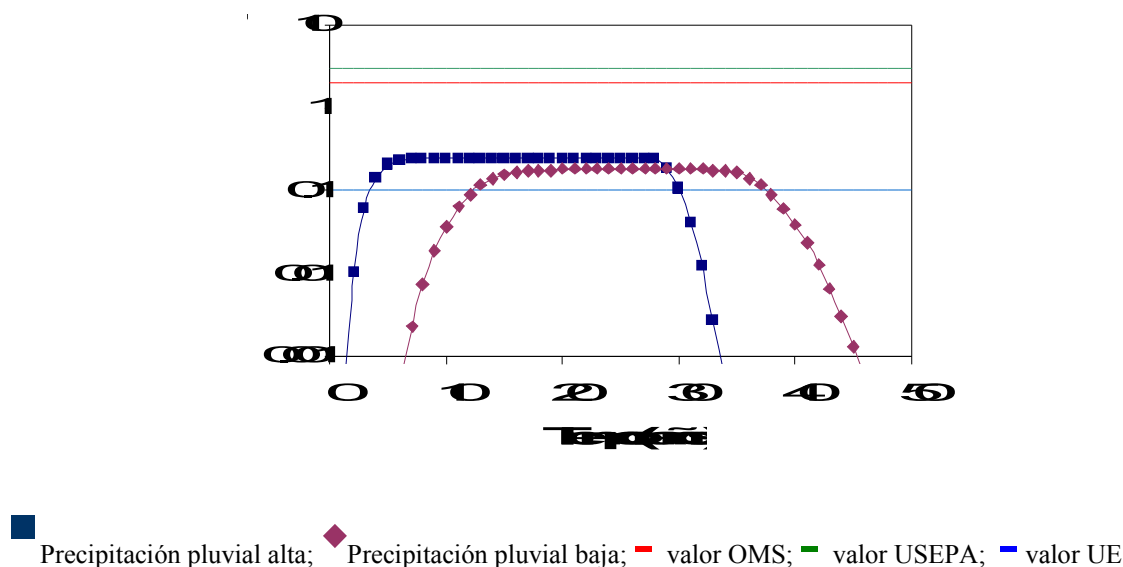


Figura 7.1. Concentración promedio anual de Atrazina en el manto freático del DR063

En el Anexo D y en la Figura 7.2 se muestra las concentraciones de Atrazina que podrían infiltrarse al manto freático. Se tienen 529.55 g ha⁻¹ en total por los 50 años simulados, con un valor máximo de 20.36 g ha⁻¹ para el año 20 en el caso de precipitación pluvial alta y de 318.26 g ha⁻¹ en total, con una máxima de 12.23 g ha⁻¹ para el año 22 en el caso de precipitación pluvial baja. Siendo la superficie de cultivo susceptible de 48.69 miles de ha, resultan 25.78 t de lixiviados para el primer caso y de 15.50 t para el segundo.

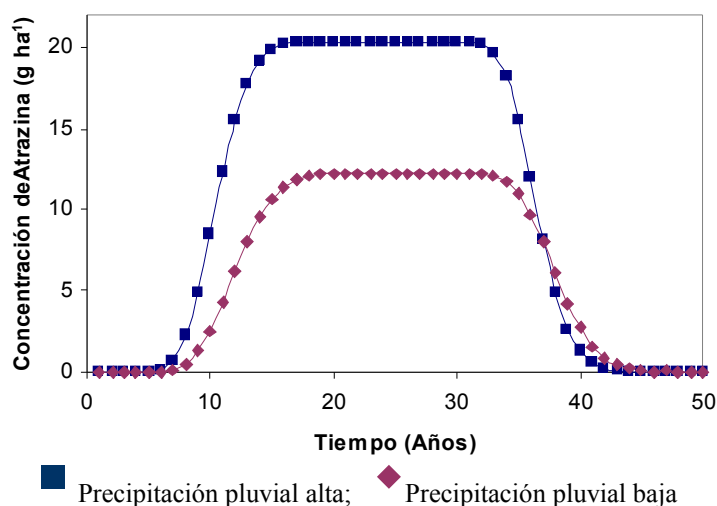
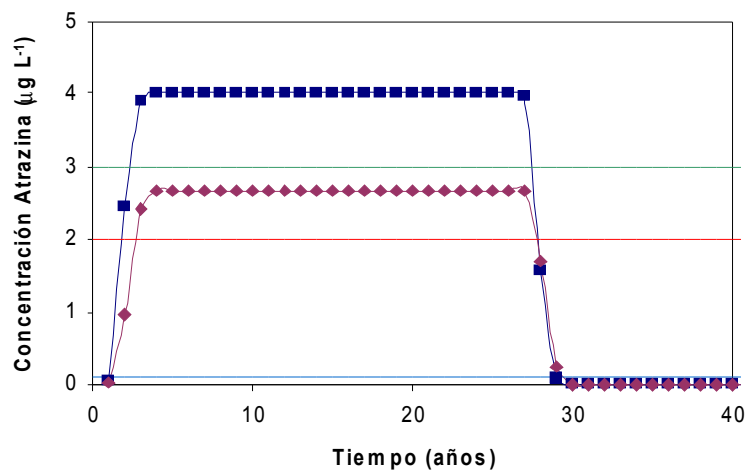


Figura 7.2. Infiltración de Atrazina en el DR 063

7.4.2 Resultados de la simulación Distrito de Riego 035 – La Antigua, Veracruz

La gráfica de la Figura 7.3 indica que los resultados de las concentraciones de Atrazina en el escenario de precipitación pluvial alta exceden los valores establecidos por la UE (0.1 µg L⁻¹), la OMS (2 µg L⁻¹) y la USEPA (3 µg L⁻¹) para agua para consumo humano. En el caso de precipitación pluvial baja, la concentración máxima no excede el límite de la USEPA. Estos resultados se deben principalmente a una mayor dosis de Atrazina aplicada (2.7 kg ha⁻¹ de ingrediente activo) en el distrito, respecto al distrito de riego 063. El límite de la OMS es conseguido a los 2 años en el escenario de precipitación pluvial alta. El límite de la USEPA es conseguido a los 2 años en el caso de la precipitación pluvial alta, y a los 3 años en el caso de precipitación pluvial baja, aproximadamente. La concentración máxima del herbicida es

obtenida a los 4 años ($4.0 \mu\text{g L}^{-1}$) de simulación de su aplicación en el primer caso, y a los 5 años ($2.68 \mu\text{g L}^{-1}$) en el segundo.



■ Precipitación pluvial alta; ◆ Precipitación pluvial baja; — valor OMS; — valor USEPA; — valor UE

Figura 7.3. Concentración promedio anual de Atrazina en el manto freático del DR035

En el Anexo D y en la Figura 7.4 se muestra la máxima concentración de Atrazina que podría infiltrarse al manto freático, siendo de $21,528.55 \text{ g ha}^{-1}$ en total por los 50 años simulados, con un valor máximo de 827.90 g ha^{-1} para el año 13 en el caso de precipitación pluvial alta y de $14,600.95 \text{ g ha}^{-1}$ en total, con una máxima de 561.60 g ha^{-1} para el año 18 en el caso de precipitación pluvial baja. Como la superficie de cultivo susceptible de aplicación de Atrazina es de 15.99 miles de ha, resultan 344.24 t de lixiviados para el primer caso y de 233.47 t para el segundo.

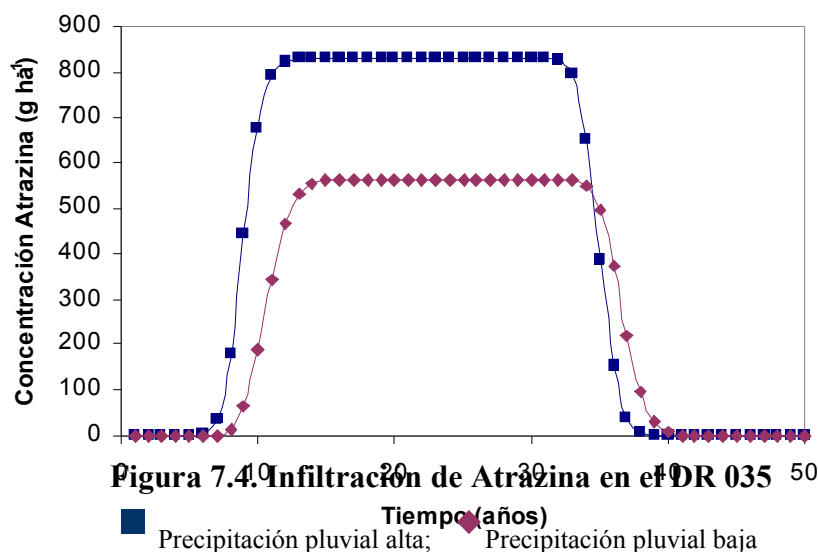


Figura 7.4. Infiltración de Atrazina en el DR 035

■ Precipitación pluvial alta; ◆ Precipitación pluvial baja

7.4.3 Resultados de la simulación Distrito de Riego 087 – Rosario-Mezquite, Michoacán

Nuevamente, los resultados de la concentración de Atrazina tanto en el escenario de precipitación pluvial alta como en el caso de precipitación pluvial baja, exceden los valores establecidos por la UE ($0.1 \mu\text{g L}^{-1}$), la OMS ($2 \mu\text{g L}^{-1}$) y la USEPA ($3 \mu\text{g L}^{-1}$) para agua para consumo humano. Para este distrito de riego la dosis aplicada de Atrazina es de 3.6 kg ha^{-1} de ingrediente activo, por lo que los resultados son significativamente mayores a los de los distritos de riego 063 y 035. Los límites de la OMS y el de la USEPA son obtenidos aproximadamente a los 2 y 3 años en el caso de la precipitación pluvial alta y a los 3 y 4 años, en el caso de precipitación pluvial baja. La concentración máxima del herbicida es obtenida a los 11 años ($17.33 \mu\text{g L}^{-1}$) de simulación de su aplicación en el primer caso, y a los 13 años ($14.60 \mu\text{g L}^{-1}$) en el segundo.

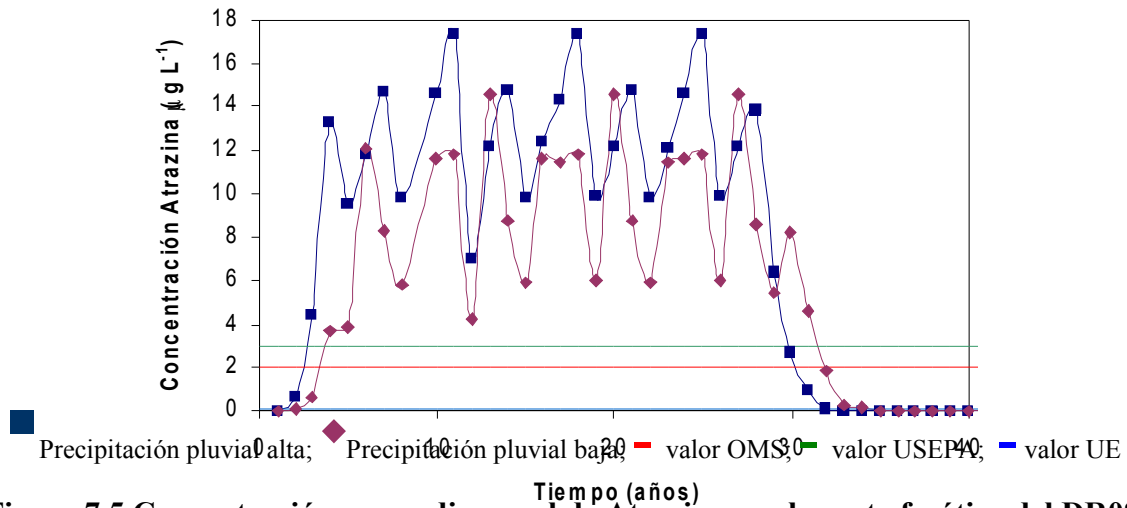


Figura 7.5 Concentración promedio anual de Atrazina en el manto freático del DR087

En el Anexo D y en la Figura 7.6 se muestra la máxima concentración de Atrazina que podría infiltrarse al manto freático, siendo de 31,231.67 g ha⁻¹ en total por los 70 años simulados, con un valor máximo de 1198 g/ha para el año 31 en el caso de precipitación pluvial alta y de 26,411.37 g ha⁻¹ en total, con una máxima de 1016 g ha⁻¹ para el año 43 en el caso de precipitación pluvial baja. La superficie de cultivo susceptible de aplicación de Atrazina en este distrito de riego es de 39.91 miles de ha, resultando 1,246.46 t de lixiviados para el primer caso y de 1,054.08 t para el segundo.

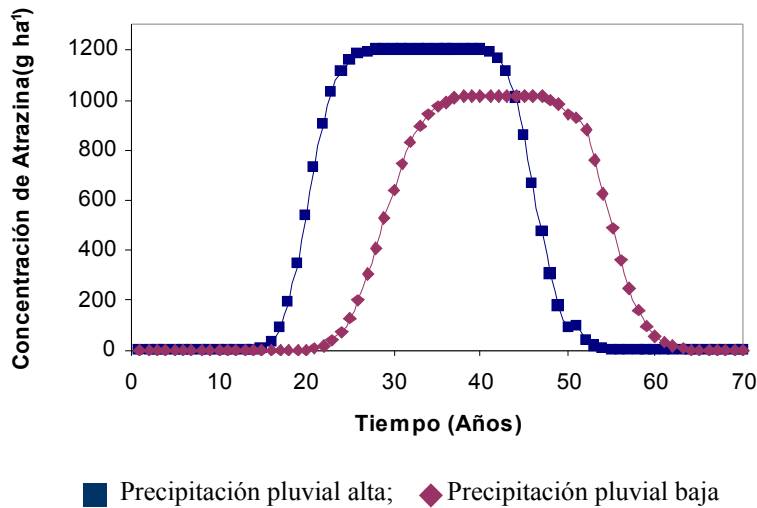


Figura 7.6. Infiltración de Atrazina en el DR 087

Los resultados de la simulación con los dos escenarios de precipitación, de acuerdo al escenario de biodegradación elegido y para cada distrito de riego se resumen a continuación.

Tabla 7.5. Resultados de la simulación para los diferentes escenarios

Escenario	Distrito de riego No. 063	Distrito de riego No. 087	Distrito de riego No.035
	Concentración máxima anual de Atrazina [$\mu\text{g L}^{-1}$]		
Precipitación pluvial alta	0.25	4.00	17.33
Precipitación pluvial baja	0.18	2.68	14.60

8. ESTIMACION DE RIESGO

8.1 Estimación del riesgo de contaminar mantos freáticos

La estimación de riesgos se lleva a cabo siempre que existe la posibilidad de daños a la salud humana y al ambiente. En el caso de los distritos de riego, la frecuente aplicación de Atrazina en las zonas agrícolas implica riesgos de contaminación por la posibilidad de que los residuos del herbicida lleguen al manto freático. De los resultados de la estimación de riesgos se puede realizar la toma de decisiones que permitirá definir o adoptar los límites permisibles en agua para consumo humano, con el objetivo de proteger al ambiente y establecer una normatividad que controle la dosis y el periodo de aplicación.

Empleando la metodología para la evaluación de riesgos ambientales (SEMARNAT-INE, 2002), una vez que se tienen tanto la información toxicológica y de la situación legal del uso de Atrazina a nivel mundial respecto a los límites máximos permisibles para agua para consumo humano, como los resultados de las concentraciones en la simulación, se realiza la caracterización del riesgo, en donde se determina cuantitativamente la existencia del riesgo con base en el siguiente cociente:

$$Riesgo = \frac{CS}{CL} \quad (8.1)$$

Donde:

CS: Concentración encontrada en la simulación [$\mu\text{g L}^{-1}$]

CL: Concentración Límite (Límite Máximo Permisible) [$\mu\text{g L}^{-1}$]

De esta forma:

- Si Riesgo > 1, existe riesgo de contaminación del manto freático
- Si Riesgo < 1, no hay riesgo.

La información resultante de la caracterización del riesgo es la estimación del riesgo.

8.2 Resultados de la estimación de riesgos

A partir de los resultados de la simulación se utilizan para la comparación los valores del límite máximo permisible de Atrazina en agua para uso y consumo humano de la UE ($0.1 \mu\text{g L}^{-1}$), de la OMS ($2 \mu\text{g L}^{-1}$), que es la norma base de la mayoría de los países de América Latina, y el de la USEPA, ($3 \mu\text{g L}^{-1}$), como la siguiente norma más estricta aplicada a nivel del continente. Aplicando la ecuación anterior se obtienen los datos de las Tablas 8.1. y 8.2.

Tabla 8.1. Riesgo por infiltración de Atrazina (Precipitación pluvial alta)

Distrito de riego	Concentración máxima de la simulación [$\mu\text{g L}^{-1}$]	Riesgo		
		UE [$0.1 \mu\text{g L}^{-1}$]	OMS [$2 \mu\text{g L}^{-1}$]	USEPA [$3 \mu\text{g L}^{-1}$]
Distrito de riego No. 063	0.25	2.50	0.13	0.08
Distrito de riego No. 087	4.00	40.00	2.00	1.33
Distrito de riego No.035	17.33	173.3	8.67	5.77

Tabla 8.2. Riesgo por infiltración de Atrazina (Precipitación pluvial baja)

Distrito de riego	Concentración máxima de la simulación [$\mu\text{g L}^{-1}$]	Riesgo		
		UE [$0.1 \mu\text{g L}^{-1}$]	OMS [$2 \mu\text{g L}^{-1}$]	USEPA [$3 \mu\text{g L}^{-1}$]
Distrito de riego No. 063	0.18	1.80	0.90	0.60
Distrito de riego No. 087	2.68	26.8	1.34	0.89
Distrito de riego No.035	14.60	146.00	7.3	4.87

En el caso de precipitación pluvial alta en los distritos de riego 035 y 087 es probable, bajos las condiciones y escenarios descritos, que se presenten concentraciones de Atrazina en el manto freático que excedan los límites. En los casos de precipitación pluvial baja, a excepción del distrito de riego 063 que no supera el valor de la OMS y USEPA, se observa que si existe el riesgo de infiltración de Atrazina al manto freático en estas condiciones. Esto puede deberse a que con poca lluvia la biodegradación del herbicida se favorece al tener un mayor tiempo de residencia en el suelo, lo que permite que los microorganismos lo degraden, no representando un riesgo para el agua subterránea en ese distrito de riego.

8.3 Medidas para la reducción de Atrazina en agua subterránea

Una vez que se han estimado los riesgos se proponen una variedad de medidas tendientes a prevenir o reducir tales riesgos.

Un manejo correcto en las prácticas agrícolas puede reducir el riesgo de infiltraciones de Atrazina. Los principales factores que determinan la cantidad de Atrazina que llega a los cuerpos de agua son: 1) cantidad disponible de Atrazina, 2) propiedades hidráulicas de los suelos, y 3) cantidad de agua (riego y precipitaciones) y tiempo de infiltración (Franti, *et al.*, 1996). Estos permiten establecer la eficiencia de las prácticas del manejo de la Atrazina, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 8.3. Impacto de prácticas de manejo de Atrazina

Práctica	Estrategia	Impacto en reducción
<i>Métodos culturales (prácticas agronómicas)</i>		
Dstrucción manual de malezas ²	Evitar el uso de Atrazina	Muy alto
Rotación de cultivos ¹	Eliminar el uso de Atrazina por varios meses o años	Alto
Reducir la cantidad aplicada ¹	Aplicar menos de lo que indica la etiqueta del producto, cuando no repercute en la producción	Alto
Labranza cero ²	Evitar quemar los residuos de cultivos, para dejarlos como cubierta para el suelo.	Alto
Manejo del riego ²	Reducir la cantidad de Atrazina que llega al manto freático	Alto
Aplicación en condiciones climáticas adecuadas ²	Evitar aplicar Atrazina en condiciones de lluvia o cuando haya mucho viento	Alto
Combinación de Atrazina con otros herbicidas ¹	Reducir la cantidad aplicada de Atrazina	Medio
Destruir o desechar los envases vacíos ²	Reducir residuos de Atrazina	Medio
Evitar comprar más plaguicida del necesario ²	Reducir la inversión económica y los riesgos de intoxicación por uso de Atrazina	Bajo
Delimitación de áreas de aplicación ¹	Eliminar Atrazina en áreas cercanas a pozos, manantiales, corrientes de agua superficial, lagos y lagunas	Bajo

Práctica	Estrategia	Impacto en reducción
<i>Control químico, biológico y genético</i>		
Herbicidas alternativos ¹	Eliminar el uso de Atrazina	Muy alto
Manejo integral de plaguicidas ¹	Reducir el uso de Atrazina, utilizando herbicidas no químicos, híbridos y modificación genética a cultivos	Medio
<i>Métodos mecánicos</i>		
Destrucción mecánica ²	Evitar el uso de Atrazina	Muy alto
Verificación del buen estado de equipos de aplicación y dosificación ²	Reducir los residuos de la aplicación de Atrazina	Bajo
<i>Control legal e institucional</i>		
Prohibir el uso de Atrazina ³	Eliminar su uso. En EUA se estima que esta medida incrementaría los costos de cultivo de maíz de 4 a 20 \$ acre ⁻¹	Muy alto
Capacitación ²	Entrenamiento a usuarios sobre los procedimientos adecuados de aplicación y manejo de Atrazina	Muy alto
Prohibición y/o restricción a ciertos usos ²	Reducir los niveles de Atrazina en mantos freáticos	Alto
Sanciones y multas; incentivos ²	Obligatoriedad de aplicación de prácticas agronómicas adecuadas	Alto
Inventarios y registros de aplicaciones ²	Reducir excesivas aplicaciones de Atrazina	Alto
Impuestos ambientales, con base en los niveles de toxicidad ⁴	Inducir cambios al uso de productos y prácticas sustentables	Alto
Programas de monitoreo ²	Vigilar la calidad del agua de los pozos de abastecimiento de agua potable	Medio

¹ Franti *et al.*, 1996, ² SEMARNAT-INE, 2002, ³ Gianessi, 2003, ⁴ Muñoz y Ávila, 2003.

Entre los criterios que se siguen para adoptar las medidas citadas se encuentran la magnitud de los niveles de concentración de Atrazina en el agua subterránea que se desean alcanzar, la distribución de responsabilidades entre usuarios y productores y los costos y beneficios asociados (costos de efectos en la salud, prácticas y tecnologías de control, prevención y reducción de riesgos); además de la factibilidad para instrumentarlas. La reducción de riesgos implica destinar fondos del presupuesto de los gobiernos de cada país, principalmente. Los tomadores de decisiones deben de considerar todos estos factores y otros de índole política al establecer los programas de reducción de riesgos (SEMARNAT-INE, 2002).

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 Conclusiones

De acuerdo a la revisión de literatura e información relacionada con el uso de Atrazina, este herbicida no está restringido o prohibido, aún cuando a nivel mundial son varios países (sobre todo de Europa), los que lo clasifican dentro de una de estas categorías. El hecho de que esta sustancia esté incluida dentro del anexo del Convenio de Estocolmo representa la inquietud de estos países por investigar y difundir los riesgos implicados por su uso.

Aunque en México son múltiples y variadas las fuentes que producen datos sobre aspectos relacionados con el uso de plaguicidas, la información que se genera no siempre está disponible o es de fácil acceso, reflejándose en la ausencia de datos para el análisis del resto de los distritos de riego.

Respecto a los resultados de la base de datos, se tiene que el 43% de la superficie sembrada de los distritos de riego es susceptible de la aplicación de Atrazina (1,130.26 miles de ha), por tratarse del área correspondiente a los cultivos de maíz, sorgo, caña de azúcar y piña. Las mayores extensiones pertenecen a los distritos de riego de la Región Norte, con el 64%; siguiendo la Región Centro con el 31%; y con el 5% se tiene la Región Sur-Este. De esta forma, los distritos de riego ubicados en la Región Norte son los más susceptibles de presentar contaminación de los mantos freáticos por infiltración de Atrazina, pues presentan los niveles de agua subterránea más bajos y las mayores extensiones de cultivo indicador.

Los resultados de la utilización de Atrazina en México muestran que en el 75% de los distritos de riego encuestados se aplican herbicidas que la contienen como ingrediente activo, y que se emplean dosis de este herbicida de hasta $4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en la Región Centro del país. La estimación del total de Atrazina aplicada en el país en cultivos representativos con una dosis promedio de $1.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, es de aproximadamente $1,800 \text{ t año}^{-1}$ de este compuesto.

De acuerdo con la profundidad del manto freático, la superficie de cultivo indicador, número de pozos para consumo humano, tipo de suelo y uso de Atrazina, los distritos de riego más vulnerables por la contaminación de este herbicida fueron: el 063 - Guasave, Sinaloa, en la región Norte; el 035 - La Antigua, Veracruz y en la región Sur-Este y el 087 - Rosario-Mezquite, Michoacán en la región Centro del país.

El resumen de las concentraciones de Atrazina encontradas mediante los muestreos y las simulaciones numéricas en cada distrito de riego se indican a continuación:

Tabla 9.1. Resumen de concentraciones de Atrazina en muestreos y simulación

Distrito de riego	Concentraciones encontradas de Atrazina [$\mu\text{g L}^{-1}$]		
	Muestreo	Simulación numérica	
		Precipitación pluvial alta	Precipitación pluvial baja
DR 063	>0.1	0.25	0.18
DR 035	>0.2	4.00	2.68
DR 087	>0.2	17.33	14.60

Como se muestra en la tabla, muestreos de agua de pozos, norias y agua para consumo humano en los tres distritos de riego identificados como los más vulnerables, revelan concentraciones de Atrazina inferiores a los límites máximos permisibles de referencia ($2 \mu\text{g L}^{-1}$ para la OMS, y $3 \mu\text{g L}^{-1}$ para la USEPA:), por lo que hasta el momento de la realización de esta tesis, no existe evidencia de campo de que existe un riesgo a la salud por el uso de este herbicida en los tres distritos de riego estudiados. Esto puede deberse a que las muestras fueron tomadas en pozos donde la perforación se encuentra a profundidades mayores a la del manto freático, así como por el efecto de la disolución del plaguicida entre los estratos del subsuelo hasta llegar a la zona saturada.

Las simulaciones sugieren que los distritos (035 y 087) donde se aplicaron mayores dosis de Atrazina y que tienen suelos con mayor permeabilidad son más vulnerables a la contaminación por el herbicida. En este sentido es notable que, aunque el DR 063 tiene profundidad del manto freático inferior al 087, la simulación indica que la mayor permeabilidad y lámina aplicada del último, propicia una mayor concentración de Atrazina en el agua lixiviado.

9.2 Recomendaciones

Debido a la necesidad de contar con más información para un mejor análisis de las prácticas agrícolas en los distritos de riego del país, se recomienda completar los datos del resto de ellos, así como obtener información sobre el uso de Atrazina en otras zonas agrícolas, tales como los distritos de temporal tecnificado (DTT's), distritos de desarrollo rural (DDR's) y otras áreas donde se aplica este herbicida. Para una mayor disponibilidad de la información, se recomienda elaborar registros sobre prácticas agrícolas en México, incluyendo tipos, cantidades y fechas de aplicación de agroquímicos.

Se recomienda llevar a cabo muestreos en un mayor número de zonas vulnerables, incluyendo muestreos en agua drenada, retornos agrícolas y cuerpos de agua aledaños. Una vez que se definan las zonas vulnerables, pueden realizarse monitoreos y simulaciones más detallados.

Para contar con estimaciones más realistas como resultado de la modelación, se recomienda tomar en cuenta datos del suelo más específicos (estratigrafía y topografía) y la variación del clima, para una mejor aplicación de la metodología expuesta y producir resultados más acordes al sitio y las prácticas agrícolas.

La metodología empleada en esta tesis resulta útil para la estimación de riesgos de la contaminación del agua subterránea por la infiltración de plaguicidas. Con los resultados se proporciona un panorama general del uso de Atrazina en México, por lo que se espera que este trabajo sirva de antecedente para la reglamentación de la concentración de Atrazina en el agua para uso y consumo humano en el país. Lo descrito en este trabajo puede contribuir a la modificación de las prácticas agrícolas actuales, así como ser un antecedente de futuras investigaciones relacionadas con la contaminación de agua subterránea por agroquímicos.

10. REFERENCIAS

- Abdelhafid, R., Houot, S., Barriuso, E., 2000. How increasing availabilities of carbon and nitrogen affect Atrazine behavior in soils. Unité de Science du Sol, France. *Biol. Fertil Soils*. pp. 333-340.
- Accinelli, C., Dinelli G., Vicari, A. y Catizone, P., 2001. Atrazine and metalachol degradation in subsoils. *Biol. Fertil Soils*, 2001. pp. 495-500
- Afferden, van M. y Hansen A., 2001. Influence of N-fertilization on Atrazine and consequences for groundwater contamination. International Workshop on Environmental Risk Assessment of Pesticides and Integrated Pesticide Management in Developing Countries, University of Braunschweig. pp. 102-103.
- Alexander, M., 1994. Biodegradation and remediation. San Diego, CA. Academic press, 320 p.
- Álvarez, B., 1999. La operación en el distrito de riego del Río Mayo, como se ha mejorado el servicio de riego. IX Congreso Nacional de Irrigación. Reunión 2. I Reunión Nacional Sobre Modernización de la Operación de Canales. Culiacán, Sinaloa, México, 27-29 de Octubre.
- Antelo, J., 1999. Diagnostico de la calidad del agua de riego del distrito no. 066, Santo Domingo, B.C.S. y sus limitantes para su uso en sistemas de riego presurizado.
- Arellano, J., 1999. Respuesta del cultivo de frijol (*phaseolus vulgaris*, l.) a diferentes niveles de humedad del suelo en el distrito de riego no. 101 "Cuxtepeques", Chiapas. IX Congreso Nacional de Irrigación.
- ATSDR (Agencia para Sustancias Toxicas y Registro de Enfermedades), 2001. Atrazina. Departamento de Salud y Servicios Humanos de los E.U.A. Disponible para World Wide Web: http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts153.html.
- Bailey G., White, J. y Rothberg, T., 1968. Adsorption of organics herbicides by montomorillonite. *Soil science Society American Process*, no. 32. pp. 222-234.
- Barberá, C., 1976. Pesticidas agrícolas. Tercera edición. Editorial Omega. Barcelona. pp. 413-416.

- Barcelona, M., Gibb, J., Helfrich, J. y Garske, E., 1985. Practical guide for groundwater sampling. Illinois State Water Survey. Champaign, Illinois. ISWS Contract Report 374.
- Bear, J., Batchman, Y., 1991. Introduction to modeling of transport phenomena in porous media, Kluwer Academic, Inglaterra. 253 p.
- Bollag, J.M., Myers, C. y Minard R., 1992. Biological and chemical interactions of pesticides with soil organic matter. The Sci. Total Environ. pp.123-124; 205-217.
- Carsel R.F., Smith C.N., Mulkey L.A., Dean J.D. y Jowise P., 1984. User's manual for the pesticide root zone model (PRZM). EPA - 600 / 3-84-109.
- CCME (Canadian Council for Ministers of the Environment), 1999. Canada's Guidelines for Canadian Drinking Water Quality. Disponible para World Wide Web: <http://www.ccme.ca/atrazine>
- CEE (Comisión Económica Europea), 2004. Decisión de la Comisión del 10 de marzo de 2004 relativa a la no inclusión de la Atrazina en el anexo I de la Directiva 91/414/CEE del Consejo y a la retirada de las autorizaciones de los productos fitosanitarios que contengan esta sustancia activa. Diario Oficial de la Unión Europea. Disponible en la World Wide Web: http://www.mma.es/normativa/jurisp/doce/20040316_L78_53.pdf
- CICOPLAFEST, 2002. Catalogo Oficial de Plaguicidas. Comisión Intersecretarial para el Control del Proceso y uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Toxicas.
- CNA (Comisión Nacional del Agua), 1990. Características de los Distritos de riego, año agrícola 1990. Subdirección General de Infraestructura Hidráulica. Gerencia de Distritos de Riego.
- CNA (Comisión Nacional del Agua), 2004. Estadísticas del Agua en México, 2004. 141 p.
- CRE (Center for Regulatory Effectiveness), 2003. International actions on Atrazine. Disponible para World Wide Web: <http://www.thecre.com/atrazine/intactions.htm>
- Díaz E., González, A., y Namuche, R., 1999. Descripción de perfiles de suelos con fines de drenaje agrícola en el módulo 1 del DR 038, Río Mayo, Son. IX Congreso Nacional de Irrigación. 8 p.

- DOF (Diario Oficial de la Federación), 2000. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano - límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Modificación a la NOM-127-SSA1-1994. Octubre 20, pp. 1-8.
- Dubus, I., 2002. Calibration of pesticide leaching models. Cranfield University, Silsoe. United Kingdom. 248 p.
- Dupont, R.R., Sims, R.C., Sims, J.L. y Sorensen D.L., 1998. In situ biological treatment of hazardous waste contaminated soils. Biotreatment-system, vol II. Boca Ratón, FL.
- Eichelberger J.W, Behymer T.D., Budde W.L., 1988. Method 525.2, Determination of organic compounds in drinking water by liquid-solid extraction and capillary column gas chromatography/mass spectrometry. Revision 2.2.
- Esser, H., Dupuis, E., Marco, G., Vogel, C., 1985. Herbicides chemistry: degradation and mode of action. Vol. 1. Marcel Dekker, New York. 129 p.
- FOCUS (Forum for the Co-ordination of Pesticide Fate Models and their Use), 2000. FOCUS groundwater scenarios in the EU review of active substances. Report of the FOCUS Groundwater Scenarios Workgroup, EC Document Reference Sanco. 202 p.
- Franti, T., Roeth, F., Klein, R., Holshouser, D., Christiansen, A., Schild, J., Zoubeck., 1996. Agricultural Management Practices to Reduce Atrazine in Surface Water. Water Resource Management.
- Fronk, C.A., B.W. Lykins, Jr. and J.K. Carswell., 1990. Membranes for Removing Organics from Drinking Water. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA).
- Gianessi, L., 2003. Comments to the Atrazine Review. The FIFRA (Federal Insecticide, Fungicide, and Rodenticide Act) Scientific Advisory Panel. 5 p.
- Giupponi, C., 2001. The substitution of hazardous molecules in production process : the Atrazine case study in Italian agriculture. Disponible para World Wide Web: <http://www.feem.it/NR/rdonlyres/F4F6C033-FC26-4FC7-B803>

- González, A., 2000. SINHDR : Sistema de INformación Hidroagrícola de Distritos de Riego. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA. Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje. Jiutepec, Morelos.
- González, L., 2005. Migración de herbicidas (Atrazina y 2,4-D) en suelo del distrito de riego 063, Guasave, Sinaloa. Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental, UNAM. 120 p.
- Guillén, Rosa A., 2001. Influencia en la biodegradación en el transporte de herbicidas (2,4-D y Atrazina) en suelos tropicales. Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental, UNAM. 137 p.
- Hansen A. M., van Afferden, M., 2001. Pesticide migration in Mexican Agricultural soil. International Workshop on Environmental Risk Assessment of Pesticides and Integrated Pesticide Management in Developing Countries, University of Braunschweig. pp. 21-22.
- Hansen, A.M., González, L., van Afferden, M., Guillén, R. y Villada, M., 2005. Migración de Atrazina en suelo y consecuencias para la contaminación del agua subterránea. Congreso Iberoamericano de Desarrollo y Medio Ambiente (CIDMA II). Puebla, México.
- Hansen, A.M., van Afferden, M., Quintero, Q., Martínez, E., Guillén, R., 1999. Migración de agroquímicos en suelo agrícola y cuantificación en el agua drenada a nivel parcelario (1998-2000). Comisión Nacional del Agua e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Resumen ejecutivo.
- Huddleston, J.H., 1996. How soil properties affect groundwater vulnerability to pesticide contamination. Oregon State University Extension Service. 4 p.
- Humbert, R. P., 1974. El cultivo de la caña de azúcar. México. Editorial Continental. 33 p.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua), 2001. SPRITEER. Programa desarrollado por Ojeda, W. y Sifuentes, E.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua), 2002. ERIC II, Extractor Rápido de Información Climatológica. Programa desarrollado por Quintas, I. y Ramos, D.

- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua), 2002. Manual de aseguramiento de calidad analítico: Plan de muestreo y control de calidad en campo. Sistema de aseguramiento de calidad (ISO9000/NMX-CC).
- IMTA-UNAM, 1999. Evaluación del impacto ambiental causado por agroquímicos en lagunas costeras del noroeste de México. Coordinación de tecnología de riego y drenaje. subcoordinación de contaminación y drenaje agrícola. Jiutepec, Morelos.
- Iturbe, R. y Silva, A. E., 1992. Agua subterránea y contaminación. Series del instituto de Ingeniería. Facultad de Ingeniería, UNAM. México. 54 p.
- Izcapa, C., 1998. Lineamientos generales para la evaluación de sitios contaminados y propuesta de acciones para su restauración. Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental, UNAM. 182 p.
- Jiménez, B., 2001. La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. Editorial Limusa. 925 p.
- Juárez, E. y Rico, A., 1999. Mecánica de suelos, fundamentos de la mecánica de suelos. Tomo I. Editorial Limusa. México, D.F. 642 p.
- Klein, M., Hosang, J., Schafer, H., Erzgraber, B. y Ressler H., 2002. Comparing and evaluating pesticide leaching models Results of simulations with PELMO. 19 p.
- Liu, J. y Quian, C., 1995. Hydrophobic coefficients of s-triazine and phenylurea herbicides. Chemosphere, no. 31, v. 8. pp. 3951-3959.
- Miltner, R.J., Fronk, C.A y Speth, T.F., 1987. Removal of Alachlor from Drinking Water. U.S. Environmental Protection Agency.
- Miltner, R.J., Baker D.B., Speth T.F. y Fronk C.A., 1989. Treatment of Seasonal Pesticides in Surface Waters. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA).
- Montgomery, J. H., 1997. Agrochemicals. 2nd. Edition. Lewis publishers, Boca Raton, NY. 643 p.

- Montiel, M. y Peña, E., 1999. Estudio de las necesidades hídricas y el ciclo vegetativo de los cultivos de maíz y trigo, basado en el método grados-día de crecimiento en el distrito de riego 076 Valle del carrizo. IX Congreso Nacional de Irrigación.
- Muñoz, C. y Àvila, S., 2003. Los efectos de un impuesto ambiental a los plaguicidas en Mexico. Gaceta Ecológica. Publicación trimestral INE-SEMARNAT. México. Nueva época. Número 74. 2005 Trimestre: enero-marzo. pp. 43-53.
- Navarro, E., 1998. Respuesta ecotoxicológica de comunidades microbentónicas de ríos mediterráneos. Tesis de doctorado, Universidad de Barcelona. 48 p.
- Németh, I., 1996. Modelación de la migración de pesticidas en el subsuelo del Distrito de Riego 085 – La Begoña - Gto. Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental, UNAM. 59 p.
- NRA (National Registration Authority for Agricultural and Veterinary Chemicals), 2002. Final report review of Atrazine. NRA Chemical Review Program. Canberra, Australia. Disponible en World Wide Web: http://www.apvma.gov.au/chemrev/atrazine_final.pdf
- OPS (Organización Panamericana de la Salud), 2002. Normas internacionales para la calidad del agua de bebida. Disponible en World Wide Web: <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacg/e/normas.html>
- Pellizzetti E., Maurino, V., Mínero, C., Carlin, V., y Zerbinati, O., 1990. Photocatalytic degradation of Atrazine and other s-triazine herbicides. Environ. Sci. Technol. 24: pp. 1559-1565.
- Prado, J. y Espulgas, S., 1997. Comparison of different advanced oxidation processes involving ozone for the treatment of Atrazine in aqueous solution. Universidad de Barcelona, España.
- Pulido, 1999. Aplicación de imágenes de satélite, inducción electromagnética y sistemas de información geográfica para estudiar la salinidad del suelo, el drenaje y el rendimiento en el distrito de riego 075 Río Fuerte, Sin. IX Congreso Nacional de Irrigación .8 p.
- Radke, R., 2002. Access Science: herbicide. McGraw-Hill. Disponible para World Wide Web: <http://.AccessScience.com>. Copyright ©2000, 2001, 2002 The McGraw-Hill Companies.

- Ramírez, A. (1999). La modernización del distrito de riego 100-Alfajayucan. IX Congreso Nacional de Irrigación.
- RAP-AL (Red de Acción de Plaguicidas y sus alternativas para América Latina, 2005. Convenios Internacionales. Disponible en Disponible para World Wide Web: <http://rap-al.org/plaguicidas/convenios>
- SARH (Secretaria de Agricultura y Recursos hidráulicos), 1982. Consideraciones preliminares para el mejoramiento de la producción en el Distrito de Riego 087–Rosario-Mezquite, Michoacán. México. 70 p.
- SARH (Secretaria de Agricultura y Recursos hidráulicos), 1982. Consideraciones preliminares para el mejoramiento de la producción en el Distrito de Riego 035–La Antigua, Veracruz. México. 70 p.
- SARH (Secretaria de Agricultura y Recursos hidráulicos), 1982. Consideraciones preliminares para el mejoramiento de la producción en el Distrito de Riego 063 – Guasave, Sinaloa. México. 70 p.
- Saxton, K., 2004. SPAW Hydrology - Field and Pond Models with Soil Water Characteristics. USDA (United States Department of Agriculture) & Washington State University, BsysE.
- Schoen S.R., Winterlin, E.P., 1987. The effects of various soil factors and amendments on the degradation of pesticides mixtures. Journal Environmental Science Health B22: pp. 347-377.
- SEMARNAT-CNA (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Nacional del Agua), 2001. Superficies regadas y volúmenes de agua distribuidos en los Distritos de Riego, año agrícola 1999-2000. Informe estadístico 1 y 2. Subdirección General de Operación. Gerencia de Distritos y Unidades de riego.
- SEMARNAT-IMTA (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua), 2000. Contaminación y drenaje agrícola. Coordinación de tecnología de riego y drenaje. Subcoordinación de contaminación y drenaje agrícola. Jiutepec, Morelos.
- SEMARNAT-INE (Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología), 2002. Características de peligrosidad ambiental de sustancias. Manual. 282 p.

- Silva, S., 1994. Evaluación de la vulnerabilidad acuífera a la contaminación. Revista H2O!. Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal de San Luís Potosí. Julio de 1994, no. 2, pp. 2-3.
- SRH (Subsecretaria de Recursos Hídricos, Argentina), 2002. Desarrollo de niveles guía nacionales de calidad de agua - ambiente correspondientes a Atrazina. 17 p. Disponible en World Wide Web: <http://www.hidricos.obraspublicas.gov.ar/documentos/calidad/atrazina.pdf>
- Steinberg, C.E.W., Lorenz R. y Spieser O.H., 1995. Effects of Atrazine on swimming behavior of zebrafish. pp 981-985.
- Tappe, W., Groeneweg, J. y Jantsch, B., 2002. Diffuse Atrazine pollution in German aquifers. Kluwer Academic, Publisher, Netherlands. Disponible para World Wide Web: <http://www.environmental-center.com/magazine/kluwer/biod/1.pdf>
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 1989. Methods for the determination of organic compounds in drinking water. EPA Report No. EPA-600/4-88/039; U.S. NTIS PB-89-220461. Cincinnati.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2003. Interim Reregistration Eligibility Decision for Atrazine. Office of Prevention, Pesticides and Toxic Substances. Disponible en World Wide Web: http://www.epa.gov/oppsrrd1/REDs/atrazine_ired.pdf
- Valle Meza, O., 2001. Planeación regional bidimensional en función de la disponibilidad del recurso hídrico del acuífero de Guasave, Sinaloa. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Sinaloa, UAS. Escuela de Administración y Desarrollo Rural (ESCADER).
- WHO (World Health Organization), 2004. Guidelines for drinking water-quality. Annex 4. Chemical summary tables. pp 488 – 493.
- Yarto, M., Gavilán, A. y Barrera, J., 2003. EL Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes y sus implicaciones para México. Gaceta ecológica, INE-SEMARNAT. 100 p.
- Yuso, A., 2003. Emergencia en Distritos de Riego. Revista La Buena Cepa. Año 1 Abril / Mayo 2003, número 2. México, D.F. pp 24-25.

ANEXO A. BASE DE DATOS DE LOS DISTRITOS DE RIEGO

DATOS GENERALES					GEOGRAFÍA		MANTO FREÁTICO			INFRAESTRUCTURA					
Región Hidrográfica ³	Distrito ³	Nombre ³	Estado ³	REGION [Centro, Norte, Sur]	Localización ²	Altitud [m.s.n.m.] ²	Profundidad min. del manto freático [m]	Profundidad max. del manto freático [m]	Profundidad prom. del manto freático [m]	No. Pozos Uso Agrícola	No. Pozos Consumo Humano	No. Pozos	% Maíz ³	% Caña de azúcar ³	% Sorgo ³
I	066	SANTO DOMINGO, B.C.S.	BAJA CALIFORNIA SUR	N	24° 40', 25° 30' y 26° 15'	45	58.00	58.00	58	707	31	703 ¹⁶ - 707 UA / 3	27.15	0.00	4.79
I	014	RIO COLORADO, B.C. Y SON.	SONORA	N	32° 19' y 115° 11'	15						693	1.58	0.00	2.99
II	037	ALTAR PITIQUITO, SON.	SONORA	N	30° 41' y 112° 09'	305	100.00	100.00	100	940	58	940 UA / 58 CH	0.10	0.00	0.93
II	038	RIO MAYO, SON.	SONORA	N	26°54' y 109°36'	40 ⁴	0.00	1.50	0-1.5 ^{4,13} / 0.5-3.0			129 ¹⁸	3.64	0.00	0.02
II	041	RIO YAQUI, SON.	SONORA	N	27° 18' y 109° 58'	35						327	1.71	0.00	0.22
II	084	GUAYMAS, SON.	SONORA	N	28° 13' y 110° 47'	37.19						269	3.92	0.00	0.65
II	083	PAPIGOCHIC, CHIH.	CHIHUAHUA	N	28° 30' y 108° 31'	2,020	30.00	30.00	30	51	6	51 UA / 6 CH	15.14	0.00	0.00
II	018	COLONIAS YAQUI, SON.	SONORA	N	27° 38' y 110° 17'	46.85						-	5.09	0.00	0.17
II	051	COSTA DE HERMOSILLO, SON.	SONORA	N	28° 50' y 112° 22'	60	110.00	110.00	110	498		498	4.03	0.00	1.09
III	109	SAN LORENZO, SIN.	SINALOA	N	25°30' y 107°30'							-	63.26	17.42	2.02
III	075	RIO FUERTE, SIN.	SINALOA	N	25°48'35" y 109°00'	14	0.00	1.50	0-1.5 ⁹			84	43.05	7.68	3.34
III	076	VALLE DEL CARRIZO, SIN.	SINALOA	N	26 ° 16'N y 109 ° 9'	20	1.50	2.00	entre 1.5 y 2.0	0	0	0	43.43	0.00	0.00
III	074	MOCORITO, SIN.	SINALOA	N	25° 24' y 108° 12'	25						61	10.86	0.00	1.75
III	043	EDO. NAYARIT	NAYARIT	C	20° 55', 21° 55' N	13 hasta 980						50	10.27	0.00	7.81
III	108	ELOTA-PIAXTLA, SIN.	SINALOA	N	25° 24' y 108° 12'	40	1.40	2.00	1.40 - 2.00	0	20	0 UA / 20 CH	38.30	0.00	13.07
III	052	EDO. DE DURANGO, DGO.	DURANGO	N	24° 02' y 104° 44'	1889						44	45.77	0.00	7.57
III	010	CULIACAN-HUMAYA, SIN.	SINALOA	N	24°40' y 107°30'	40						70	32.31	5.14	6.46
III	063	GUASAVE, SIN.	SINALOA	N	25° 35' y 108° 30'	20	1.00	3.00	2	61	125	61 UA / 125 CH	46.71	0.00	0.55
IV	099	QUITUPAN-MAGDALENA, MICH.	MICHOACAN	C	19° 50' y 102° 50'	1670						-	0.00	100.00	0.00
IV	098	JOSE MARIA MORELOS, MICH.	MICHOACAN	C	18° 03', 17° 54' N	15						-	10.19	0.00	0.00
IV	097	LAZARO CARDENAS, MICH.	MICHOACAN	C	19° 05' y 102° 21'	320	12.00	12.00	12			312	5.28	0.00	5.40
IV	030	VALSEQUILLO, PUE.	PUEBLA	C	85° 55'05" y 97° 4'	2061	52.00	52.00	52	217	22	217 UA / 22 CH	36.09	0.00	0.00
IV	045	TUXPAN, MICH.	MICHOACAN	C	19° 48' y 100° 30'	2098							37.80	0.00	0.00
IV	068	TEPECOACUILCO, GRO.	GUERRERO	C	18° 25' y 99° 35'	842	3.00	3.00	3	0	9	habilitados; 4 en zona	35.19	0.00	0.00
IV	016	EDO. DE MORELOS, MOR.	MORELOS	C	18° 39' y 99° 12'	900	2.00	20.00	Entre 2 y 20	358	394	752	6.96	60.06	0.07
IV	057	AMUCO-CUTZAMALA, GRO.	GUERRERO	C	100° 59', 100° 59'	106 hasta 375	4.00	12.00	Entre 4 y 12			-	33.56	0.00	1.65
IV	056	ATOYAC-ZAHUAPAN, TLAX.	TLAXCALA	C	19° 14' y 98° 14'	2220	1.00	20.00	entre 1 y 20	240	283	240 ua / 283 ch	73.51	0.00	0.00
V	105	NEXPA, GRO.	GUERRERO	C	16° 47' y 99° 11'	30	2.00	2.00	2	0	0	0 UA / 0 CH	41.19	0.00	0.00
V	104	CUAJINICUILAPA, GRO.	GUERRERO	C	16° 20' y 98° 40'	15	2.50	2.50	2.5	33	2	ndos;15 en operación	0.72	0.00	0.00
V	110	RIO VERDE-PROGRESO, OAX.	OAXACA	S	15° 57' 30" - 16° 12' 00" N, 97° 0'		0.60	1.60	1.5 ¹⁰ ;0.6 - 1.60 ¹¹				92.30	0.00	0.00
V	095	ATOYAC, GRO.	GUERRERO	C	17° 13' y 100° 26'	57	8.00	10.00	entre 8 y 10	0	15	15 CH	0.20	0.00	0.00
V	019	TEHUANTEPEC, OAX.	OAXACA	S	16° 17', 16° 37' N	7 a 42						-	1.51	0.86	6.51
VI	006	PALESTINA, COAH.	COAHUILA	N	28° 56', 29° 17' N	320	40.00	40.00	40	3	25	3 UA / 25 CH	14.78	0.00	0.44
VI	031	LAS LAJAS, N.L.	NUEVO LEON	N	28° 56', 29° 17' N	320	18.00	20.00	18 a 20	0	0	0 UA / 0 CH	6.84	0.00	0.00
VI	050	ACUNA-FALCON, TAMPS.	TAMAULIPAS	N	27° 15', 27° 30' N	112.5						-	4.96	0.00	0.35
VI	042	BUENAVENTURA, CHIH.	CHIHUAHUA	N	29° 53' y 107° 34'	1530	72.00	72.00	72	116	10	116 UA/10CH	0.62	0.00	45.68
VI	009	VALLE DE JUAREZ, CHIH.	CHIHUAHUA	N	31° 22' y 106° 00'	1084						238	0.00	0.00	0.00
VI	103	RIO FLORIDO, CHIH.	CHIHUAHUA	N	26° 14' y 105° 01'	1817	30.00	60.00	Estiaje, 30 otoño-invierno	9	6	9 UA / 6 CH	40.78	0.00	0.00
VI	026	BAJO RIO SAN JUAN, TAMPS.	TAMAULIPAS	N	26° 00' y 98° 30'	40	2.45	2.45	2.45	118	6	118 UA/6 CH	7.23	0.00	85.34
VI	005	DELICIAS, CHIH.	CHIHUAHUA	N	28° 11' y 105° 28'	1165	1.82	30.00	30 nivel dinámico ²⁷ - 1	141	302	particulares; 141 oficiales	16.62	0.00	1.02
VI	025	BAJO RIO BRAVO, TAMPS.	TAMAULIPAS	N	98° 30' y 26° 00'	20	3.00	3.00	3	0	0	0 UA / 0 CH	17.84	0.00	79.94
VI	004	DON MARTIN, COAH. Y N.L.	NUEVO LEON	N	27° 14' y 100° 09'	187	10.00	15.00	10 a 15	0	6	0 UA / 6 CH	2.41	0.00	64.21
VI	089	EL CARMEN, CHIH.	CHIHUAHUA	N	29° 53' y 107° 07'	1525.14	65.00	100.00	65 a 100	216	7	216 UA / 7 CH	6.71	0.00	23.27
VI	090	BAJO RIO CONCHOS, CHIH.	CHIHUAHUA	N	29° 34' y 104° 24'	800	1.00	3.00	as; de 1.0 a 2.0, 40	0	6	0 UA / 6 CH	2.73	0.00	0.00
VII	017	REGION LAGUNERA, COAH. Y DGO.	DURANGO	N	25° 32' y 103° 28'	1135.98	69.50	69.50	69.5	1494	320	1814	4.82	0.00	9.22
VIII	053	EDO. DE COLIMA, COL.	COLIMA	C	19° 40' y 103° 40'	459	1.50	2.00	1.5 a 2.0	0	0	JA (pro.privada)/ 0 CH	2.65	4.56	1.20
VIII	013	EDO. DE JALISCO, JAL.	JALISCO	C	20° 22' y 103° 57'	1600						-	50.60	20.31	8.48
VIII	011	ALTO RIO LERMA, GTO.	GUANAJUATO	C	19° 55', 21° 52' N	1722	30.00	85.00	52	1772	207	1772 UA 207 CH	12.25	0.01	42.28
VIII	061	ZAMORA, MICH.	MICHOACAN	C	20° 05' y 111° 20'	1567	0.50	2.00	0.5 a 2.00	48	80	48 UA / 80 CH	3.25	0.00	6.61
VIII	001	PABELLON, AGS.	AGUASCALIENTES	C	22° 10' y 102° 17'	1909						161	28.25	0.00	0.96
VIII	094	JALISCO SUR, JAL.	JALISCO	C	19° 53' y 103° 46'	1216	15.00	85.00	15 a 85	509	93	509 UA / 93 CH	6.84	71.78	2.45
VIII	020	MORELIA, MICH.	MICHOACAN	C	19° 30' y 101° 50'	1890	75.00	150.00	75 a 150	122	22	122 UA / 22 CH	48.05	0.00	25.68
VIII	087	ROSARIO-MEZQUITE, MICH.	MICHOACAN	C	20° 18' y 102° 25'	1587	0.00	80.00	2,80,20,17,18,33,	422	91	422 UA / 91 CH	24.28	0.00	43.74
VIII	085	LA BEGOÑA, GTO.	GUANAJUATO	C	20° 49' y 100° 46'	1783	20.00	40.00	20 (sur); 40 (norte)	117	0	117 UA 0 CH	9.45	0.00	28.48
VIII	093	TOMATLAN, JAL.	JALISCO	C	19° 56' y 105° 16'	35	1.50	2.00	1.5 a 2.0	1	9	le mas de 40 m. Y 6	3.45	0.37	0.02
VIII	033	EDO. DE MEXICO, MEX.	MEXICO	C	19° 30' y 99° 10'	2520	2.50	2.50	> 2.5	0	6	0 UA / 6 CH	96.36	0.00	0.00
VIII	034	EDO. DE ZACATECAS, ZAC.	ZACATECAS	N	21° 50' y 102° 55'	1500						-	33.74	0.00	0.00
VIII	024	CIENEGA DE CHAPALA, MICH.	MICHOACAN	C	20° 03' y 102° 40'	1523	2.50	2.50	>2.5	125	49	125 UA / 491 CH	42.52	0.12	27.45
IX	096	ARROYO ZARCO, MEX.	MEXICO	C	20° 11' y 99° 45'	2250						-	83.34	0.00	0.00
IX	002	MANTE, TAMPS.	TAMAULIPAS	N	22° 30' y 98° 30'	55	1.40	1.40	1.4	funcionando, 35 destruidos	2	onando, 35 destruidos	6.38	99.42	0.00
IX	060	EL HIGO, VER.	VERACRUZ	S	21° 41' y 98° 26'	6.37						-	12.58	74.22	0.00
IX	086	SOTO LA MARINA, TAMPS.	TAMAULIPAS	N	24° 04' y 98° 22'	61	3.00	3.00	>3.0	0	0	0 UA / 0 CH	20.21	0.00	63.86
IX	008	MEZTITLAN, HGO.	HIDALGO	C	20° 35' y 98° 45'	1257						6	33.87	0.00	1.05

IX	029	XICOTENCATL, TAMPS.	TAMAULIPAS	N	23° 00' y 98° 52'	131	2.00	3.00	2.0 a 3.0	0	0	0 UA / 0 CH	0.07	95.42	0.10
IX	049	RIO VERDE, S.L.P.	SAN LUIS POT	N	21° 51'38" y 100°	995						-	19.62	0.48	0.71
IX	044	JILOTEPEC, MEX.	MÉXICO	C	19° 47' y 99° 32'	2435						-	88.86	0.00	0.00
IX	023	SAN JUAN DEL RIO, QRO.	QUERÉTARO	C	20° 35' y 100° 06'	1892						181	50.44	0.00	22.85
IX	092	RIO PÁNUCO***	TAMAULIPAS, V	N	22° 14' y 98° 36'	36	1.80	3.00	3	0	102	0 UA / 102 CH	18.62	11.13	18.50
IX	028	TULANCINGO, HGO.	HIDALGO	C	28° 04' y 99° 22'	2150						16	5.20	0.00	0.00
X	082	RIO BLANCO, VER.	VERACRUZ	S	18° 35' y 95° 58'	5 hasta 55						-	16.98	0.45	0.91
X	035	LA ANTIGUA, VER.	VERACRUZ	S	19° 27' y 96° 25'	68	2.50	5.00	40% sup.; >5 en	0	41	0 UA / 41 CH	1.50	80.45	0.00
XI	046	CACAOATAN-SUCHIATE., CHIS.	CHIAPAS	S	14° 59' N y 92° 10'	choatan); 12 (Suchiate)						-	6.15	0.16	0.00
XI	059	RIO BLANCO, CHIS.	CHIAPAS	S	16° 10' y 92° 28'	600	1.50	1.50	1.5	0	0	0 UA / 0 CH	0.00	100.00	0.00
XI	101	CUXTEPEQUES, CHIS.	CHIAPAS	S	16° 12' y 92° 50'	545 hasta 645	8.00	8.00	8	0	547	0 UA / 547 CH	60.23	0.00	0.33
XI	107	SAN GREGORIO, CHIS.	CHIAPAS	S	15° 20' y 95° 05'	525	8.00	8.00	8	0	0	0 UA / 0 CH	95.55	0.09	0.12
XII	048	TICUL, YUC.	YUCATAN	S	20° 23'18" y 89° 2'	30	32.76	32.76	32.76	222	0	222 UA	13.58	0.00	0.00
XII	081	EDO. DE CAMPECHE, CAMP.	CAMPECHE	S	19° 50' y 90° 32'	0						102	3.75	15.40	0.00
XII	102	RIO HONDO, Q.R.	QUINTANA ROO	S	19° 00' y 88° 31'	3						63	0.00	88.82	0.00
XIII	073	LA CONCEPCION, MEX.	MÉXICO	C	19° 42' y 99° 18'	2248						-	24.32	0.00	0.00
XIII	100	ALFAJAYUCAN, HGO.	HIDALGO	C	20° 29' y 93° 13'	1745						-	41.92	0.00	0.00
XIII	088	CHICONAUTLA, MEX.	MÉXICO	C	19° 39' y 99° 01'	2250						-	31.89	0.00	0.00
XIII	003	TULA, HGO.	HIDALGO	C	19° 44' , 20° 29' N	1895						11	40.70	0.00	0.08

PANUCO (CHICAYAN), VER.
PANUCO (PUJAL-COY), S.L.P.
PANUCO (LAS ANIMAS), TAMPS.

A.H. Marcos Sánchez 1, J. E. Rivera Velázquez 1, J.C. Herrera Ponce 2, J.V. Ojeda Bustamante 2 (2001) USO DEL SISTEMA DEL PRONOSTICO DE RIEGO EN TIEMPO REAL PARA LA CALIBRACION DE LOS PARÁMETROS FISIOLÓGICOS DE MAIZ, SORGO Y FRUJOL EN EL DR 066, VALLE DE STO DOMINGO. Artículo: ANEI-S10119 XI CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN. Simposio 1. Ingeniería de Riego. Gu

Comisión Nacional del Agua (CNA). "Características de los Distritos de riego, año agrícola 1990". Subdirección General de Infraestructura Hidráulica. Gerencia de Distritos de Riego

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Comisión Nacional del Agua (CNA). " Superficies regadas y volúmenes de agua distribuidos en los Distritos de Riego, año agrícola 1999-200. Informe estadístico 1 y 2". Subdirección General de Operación, Gerencia de Distritos y Unidades de riego

J. A. Infante Reyes, L. E. Huaranga Angulo. (1999) IMPACTO DEL DRENAJE PARCELARIO SUBSUPERFICIAL EN EL DISTRITO DE RIEGO No 038. RIO MAYO, SON. Artículo: ANEI-S29905 IX CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN Simposio 2. Drenaje, Salinidad y Contaminación Agrícola Culiacán, Sinaloa, México, 27-29 de Octubre de 1999. pp 27-29

B. Espinoza Quintero, J. A. Lomeli Osuna, (2001) EVALUACION DEL IMPACTO ECONOMICO DEL DRENAJE PARCELARIO EN EL DISTRITO DE RIEGO 075-RIO FUERTE, SINALOA. Artículo: ANEI-S20114 XI CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN Simposio 2. Drenaje y Salinidad Guanajuato, Guanajuato, México, 19-21 de Septiembre de 2001. pp. 95-98

J. Rodolfo Namuche Vargas. EXPERIENCIAS Y METODOLOGÍA ACTUALES EN EL DISEÑO E INSTALACIÓN DE SISTEMAS DE DRENAJE PARCELARIO EN EL NOROESTE DE MÉXICO. Artículo: ANEI-S29903 IX CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN Simposio 2. Drenaje, Salinidad y Contaminación Agrícola Culiacán, Sinaloa, México, 27-29 de Octubre de 1999. pp. 20-29

L. Pulido Madrigal 1, O. X. Cisneros Estrada 1 y Néstor Gastelo García 2. ACTUALIZACIÓN MEDIANTE IMÁGENES DE SATÉLITE DE LOS MAPAS DE SALINIDAD Y DE RENDIMIENTO DEL DISTRITO DE RIEGO 076 VALLE DEL CARRIZO, SINALOA. Artículo: ANEI-S20115 XI CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN Simposio 2. Drenaje y Salinidad. Guanajuato, Guanajuato, México, 19-21 de Septiembre de 2001. pp. Instituto de Geografía, UNAM. "Mapa de texturas de suelo en México".

Pulido Madrigal, López de Santa Ana R, González Meraz, Cisneros Estrada y Robles Rubio." Aplicación de imágenes de satélite, inducción electromagnética y sistemas de información geográfica para estudiar la salinidad del suelo, el drenaje y el rendimiento en el distrito de riego 075 Río Fuerte, Sin.". Artículo: ANEI-S29916. IX CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN. Simposio 2. Drenaje, Salinidad y Contaminación Agrícola

Pedro Lázaro 1, Manuel Zavala 2, Carlos. Fuentes 1, Rodolfo Namuche 1. DINÁMICA DE LOS MANTOS FREÁTICOS SOMEROS EN RIO VERDE, OAXACA. Artículo: ANEI-S00112. XI CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN. Simposio 10. Modelación Hidroagrícola. Guanajuato, Guanajuato, México, 19-21 de Septiembre de 2001. pp. 111-119

J. A. Díaz Magaña 1 y P. R. Lázaro Chávez 2. ESTUDIO DE SUELOS CON FINES DE DRENAJE AGRÍCOLA EN EL DISTRITO DE RIEGO RÍO VERDE, OAX. Artículo: ANEI-S20118 XI CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN Simposio 2. Drenaje y Salinidad Agrícola Guanajuato, Guanajuato, México, 19-21 de Septiembre de 2001. pp 118-123

PROGRAMA HIDRÁULICO REGIONAL 2002-2006. REGIÓN V PACÍFICO SUR

Németh, I. "Modelación de la migración de pesticidas en el subsuelo del Distrito de Riego 085 – La Begoña - Gto". Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental, UNAM, 1996. 59 pp.

Díaz Magaña, González Casillas, Namuche Vargas. Descripción de perfiles de suelos con fines de drenaje agrícola en el modulo 1 del DR 038, Río Mayo, Son. Artículo: ANEI-S29909. IX CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN. Simposio 2. Drenaje, Salinidad y Contaminación Agrícola. Culiacán, Sinaloa, México, 27-29 de Octubre de 1999. 8 pp.

Montiel Gutiérrez y Peña Peña. "Estudio de las necesidades hídricas y el ciclo vegetativo de los cultivos de maíz y trigo, basado en el método grados-día de crecimiento en el distrito de riego 076 Valle del carrizo". Artículo: ANEI-S19907. IX CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN. Simposio 1. Ingeniería de Riego. Culiacán, Sinaloa, México, 27-29 de Octubre de 1999

Antelo, J. "Diagnostico de la calidad del agua de riego del distrito no. 066, Santo Domingo, B.C.S. y sus limitantes para su uso en sistemas de riego presurizado". Artículo: ANEI-S19934. IX CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN. Simposio 1. Ingeniería de Riego. Culiacán, Sinaloa, México, 27-29 de Octubre de 1999.

Arellano, J. "Respuesta del cultivo de frijol (phaseolus vulgaris, L.) a diferentes niveles de humedad del suelo en el distrito de riego no. 101 "Cuxtepeques", Chiapas" Artículo: ANEI-S19905. IX CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN. Simposio 1. Ingeniería de Riego. Culiacán, Sinaloa, México, 27-29 de Octubre de 1999

Alvarez, B. "La operación en el distrito de riego del Río Mayo, como se ha mejorado el servicio de riego". Artículo: ANEI-R29901. IX CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN. Reunión 2. I Reunión Nacional Sobre Modernización de la Operación de Canales. Culiacán, Sinaloa, México, 27-29 de Octubre de 1999

Ramirez, A. "La modernización del distrito de riego 100-Alfajayucan". Artículo: ANEI-R29902. IX CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN. Reunión 2. I Reunión Nacional Sobre Modernización de la Operación de Canales. Culiacán, Sinaloa, México, 27-29 de Octubre de 1999

J. A. Castillo González 1, J.C. Herrera Ponce 1, L. Soto Vega 2. PROYECTO EJECUTIVO DE LA RED DE CONDUCCIÓN CON INTERCONEXIÓN DE POZOS SECCIÓN 31, MÓDULO DE RIEGO ROSALES, DR 005. Artículo: ANEI-10031 X CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN Simposio 1. Ingeniería de Riego Chihuahua, Chihuahua, México, 16-18 de agosto de 2000. pp. 210-215

Información proporcionada por cada uno de los distritos de riego.

AGRICULTURA								USO DE ATRAZINA			CARACTERISTICAS DEL SUELO					
% Piña ³	Superficie sembrada ³ [miles de ha]	Superficie sembrada maiz ³ [miles de ha]	Superficie sembrada caña ³ [miles de ha]	Superficie sembrada sorgo ³ [miles de ha]	Superficie sembrada piña ³ [miles de ha]	Lamina bruta media ³ [cm]	Cultivo indicador Superficie total [miles de ha]	Estimacion Atrazina total [1.5 kg/ha]	Atrazina	Suelo	Textura del suelo ⁸	Arena [%]	Limo [%]	Arcilla [%]	Permeabilidad [cm/s]	
0.00	25.78	7.00	0.00	1.24	0.00	82	8.24	12352.50	750 kg (MARZO)	franco-arenosa ¹⁶ , arcillo arenoso ¹	media	53.5	19.31	27.2	4.33E-05	
0.00	183.78	2.90	0.00	5.50	0.00	145	8.40	12600.00		ARCILLOSO-ARENOSO	fina	55	10	35	1.53E-05	
0.00	30.43	0.03	0.00	0.28	0.00	159	0.31	468.00	SIN INFO	FRANCO ARENOSO	gruesa	79	17	4	3.89E-03	
0.00	79.32	2.89	0.00	0.01	0.00	101	2.90	4354.50	400 lts/año	migajon arcilloso ¹³	fina	30	30	40	7.56E-06	
0.00	206.21	3.52	0.00	0.45	0.00	96	3.98	5964.00		ARCILLOSO, LIMOSO	fina	5	50	45	3.31E-06	
0.00	10.84	0.43	0.00	0.07	0.00	82	0.50	742.50		FRANCO ARENOSO	gruesa	79	17	4	3.89E-03	
0.00	2.68	0.41	0.00	0.00	0.00	127	0.41	607.50	1.5 kg/ha/año(20	ARENOSO	gruesa	85	10	5	4.06E-03	
0.00	18.33	0.93	0.00	0.03	0.00	125	0.96	1446.00		arcillo-arenoso ³	fina	55	10	35	1.53E-05	
0.00	49.69	2.00	0.00	0.54	0.00	81	2.55	3819.00	SIN INFO	FRANCO ARENOSO, arcilloso are	gruesa	79	17	4	4.00E-04	
0.00	48.02	30.37	8.37	0.97	0.00	125	39.71	59560.50		ARCILLOSO, LIMOSO	fina	5	50	45	3.31E-06	
0.00	222.96	95.98	17.11	7.45	0.00	103	120.55	180817.50		FRANCO ARCILLOSO	media	35	40	25	4.81E-05	
0.00	39.91	17.33	0.00	0.00	0.00	104	17.33	25996.50	NO SE USA	arcilloso	fina	10	35	55	2.00E-06	
0.00	40.87	4.44	0.00	0.71	0.00	87	5.15	7729.50		arcilloso-arenoso ⁴	fina	55	10	35	1.53E-05	
0.00	39.09	4.02	0.00	3.05	0.00	117	7.07	10602.00		ARCILLOSO, LIMOSO	fina	5	50	45	3.31E-06	
0.00	15.34	5.87	0.00	2.00	0.00	102	7.88	11817.00	SIN INFO	arcilloso	fina	10	35	55	2.00E-06	
0.00	17.81	8.15	0.00	1.35	0.00	95	9.50	14251.50		FRANCO ARCILLOSO	media	35	40	25	4.81E-05	
0.00	196.50	63.49	10.10	12.69	0.00	96	86.28	129418.50		FRANCO ARCILLOSO	media	35	40	25	4.81E-05	
0.00	103.03	48.13	0.00	0.57	0.00	128	48.69	73041.00	1 kg/ha/año	arcilloso	fina	3	34	63	1.66E-06	
0.00	1.28	0.00	1.28	0.00	0.00	73	1.28	1917.00		FRANCO ARCILLOSO	media	35	40	25	4.81E-05	
0.00	2.26	0.23	0.00	0.00	0.00	203	0.23	345.00		FRANCO ARCILLOSO	media	35	40	25	4.81E-05	
0.00	54.09	2.86	0.00	2.92	0.00	262	5.78	8664.00		FRANCO ARCILLOSO	media	35	40	25	4.81E-05	
0.00	23.55	8.50	0.00	0.00	0.00	114	8.50	12750.00	1-2 kg / lt (mayo)	ARCILLOSO-ARENOSO	fina	55	10	35	1.53E-05	
0.00	17.23	6.51	0.00	0.00	0.00	100	6.51	9768.00		franco arenoso-arcilloso	media	55	25	20	1.38E-04	
0.00	1.29	0.46	0.00	0.00	0.00	158	0.46	682.50	1 a 2 lt/ha/año	FRANCO-arcillosos	media	35	40	25	4.81E-05	
0.00	28.28	1.97	16.98	0.02	0.00	289	18.97	28459.50	3 a 4 lt/ha/año	FRANCO ARCILLOSO-ARENOSO	media	55	25	20	1.38E-04	
0.00	13.04	4.38	0.00	0.22	0.00	361	4.59	6886.50	1 a 2 lt/ha/año	limoso-arcilloso	fina	5	50	45	3.31E-06	
0.00	6.44	4.74	0.00	0.00	0.00	57	4.74	7105.50	NO SE USA	arcillo-arenoso y limo-arenosoFRA	gruesa	79	17	4	3.89E-03	
0.00	2.58	1.06	0.00	0.00	0.00	106	1.06	1594.50	NO SE USA	arenoso-limoso	media	60	25	15	3.69E-04	
0.00	2.78	0.02	0.00	0.00	0.00	54	0.02	30.00	NO SE USA	ARCILLOSO-LIMOSO	fina	5	50	45	3.31E-06	
0.00	1.49	1.38	0.00	0.00	0.00	107	1.38	2067.00		FRANCO ARCILLOSO	media	35	40	25	4.81E-05	
0.00	5.00	0.01	0.00	0.00	0.00	115	0.01	15.31	NO SE USA	ARCILLOSO-LIMOSO	fina	5	50	45	3.31E-06	
0.00	20.99	0.32	0.18	1.37	0.00	210	1.86	2796.00		franco arenoso-arcilloso	media	55	25	20	1.38E-04	
0.00	4.56	0.67	0.00	0.02	0.00	111	0.69	1041.00	NO SE USA	FRANCO LIMOSO-ARCILLOSO	media	55	25	20	1.38E-04	
0.00	3.54	0.24	0.00	0.00	0.00	18	0.24	363.00	NO SE USA	arcilloso	fina	10	35	55	2.00E-06	
0.00	1.73	0.09	0.00	0.01	0.00	30	0.09	138.00		franco arenoso-arcilloso	media	55	25	20	1.38E-04	
0.00	5.51	0.03	0.00	2.52	0.00	200	2.55	3825.00	SIN INFO	FRANCO ARCILLOSO	media	35	40	25	4.81E-05	
0.00	12.42	0.00	0.00	0.00	0.00	158	0.00	0.00		FRANCO ARENOSO	gruesa	79	17	4	3.89E-03	
0.00	3.84	1.56	0.00	0.00	0.00	148	1.56	2346.00	NO SE USA	ARCILLOSO-ARENOSO	fina	55	10	35	1.53E-05	
0.00	70.26	5.08	0.00	59.95	0.00	30	65.04	97552.50	960 g a 2.2 kg/ha	ARCILLOSO-ARENOSO	fina	55	10	35	1.53E-05	
0.00	44.91	7.46	0.00	0.46	0.00	182	7.92	11884.50	SIN INFO	arenoso a franco-arenoso ²⁰	gruesa	60	21	19	1.73E-04	
0.00	181.78	32.42	0.00	145.30	0.00	29	177.73	266590.50	SIN INFO	arcilloso	fina	21	5	74	2.01E-06	
0.00	16.49	0.40	0.00	10.59	0.00	133	10.99	16477.50	NO SE USA	ARCILLOSO-ARENOSO	fina	55	10	35	1.53E-05	
0.00	3.65	0.25	0.00	0.85	0.00	187	1.10	1642.50	NO SE USA	FRANCO ARCILLOSO	media	35	40	25	4.81E-05	
0.00	3.66	0.10	0.00	0.00	0.00	172	0.10	150.00	NO SE USA	arcilloso	media	14	23	63	1.85E-06	
0.00	40.59	1.96	0.00	3.74	0.00	164	5.70	8548.50	SIN INFO	ARCILLOSO-ARENOSO, migajon	fina	55	10	35	1.53E-05	
0.00	23.09	0.61	1.05	0.28	0.00	105	1.94	2911.50	1 kg/ha/año(maiz)	arcilloso-arenoso ¹⁵	fina	55	10	35	1.53E-05	
0.00	56.78	28.73	11.53	4.81	0.00	68	45.07	67609.50		FRANCO ARCILLOSO	media	35	40	25	4.81E-05	
0.00	143.00	17.52	0.01	60.46	0.00	101	77.99	116988.00	2.45 kg/ha/año	FRANCO ARCILLOSO	fina	10	35	55	2.00E-06	
0.00	11.36	0.37	0.00	0.75	0.00	161	1.12	1680.00		arcilloso	fina	20	16	55	1.01E-05	
0.00	5.73	1.62	0.00	0.06	0.00	122	1.68	2512.50		FRANCO ARCILLOSO	media	35	40	25	4.81E-05	
0.00	13.94	0.95	10.01	0.34	0.00	132	11.30	16948.50	3 a 4 lt/ha/año	FRANCO ARCILLOSO	media	35	40	25	4.81E-05	
0.00	19.79	9.51	0.00	5.08	0.00	57	14.59	21891.00	2 a 3 lts por 200	ARCILLOSO, LIMOSO	fina	5	50	45	3.31E-06	
0.00	58.68	14.24	0.00	25.67	0.00	47	39.91	59866.50	3 a 4 kg/ha/año	FRANCO ARCILLOSO	media	35	40	25	4.81E-05	
0.00	7.70	0.73	0.00	2.19	0.00	65	2.92	4383.00	2 kg/ha/año	marga arcillosa ¹³	fina	27	16	57	2.24E-06	
1.02	12.86	0.44	0.05	0.00	0.13	278	0.62	936.00	2 Kg/ha/año	arcilloso	fina	10	35	55	2.00E-06	
0.00	17.85	17.20	0.00	0.00	0.00	30	17.20	25804.50	1 kg/ha/año Ges	arcilloso	fina	10	35	55	2.00E-06	
0.00	8.42	2.84	0.00	0.00	0.00	116	2.84	4260.00		FRANCO ARCILLOSO	media	35	40	25	4.81E-05	
0.00	36.37	15.46	0.05	9.98	0.00	41	25.49	38238.00	1.5 kg/ha/año-1	arcilloso	fina	10	35	55	2.00E-06	
0.00	18.49	15.41	0.00	0.00	0.00	56	15.41	23116.50	1 kg/ha/año Ges	FRANCO ARCILLOSO	media	35	40	25	4.81E-05	
0.00	14.63	0.93	14.55	0.00	0.00	113	15.48	23220.00	NO SE USA	FRANCO ARCILLOSO; vertisoles	fina	30	25	45	4.33E-06	
0.00	2.25	0.28	1.67	0.00	0.00	90	1.95	2929.50		ARCILLOSO, LIMOSO	fina	5	50	45	3.31E-06	
0.00	23.35	4.72	0.00	14.91	0.00	76	19.63	29445.00	1 kg/ha/año; ene	ARCILLOSO, LIMOSO	fina	5	50	45	3.31E-06	
0.00	2.96	1.00	0.00	0.03	0.00	125	1.03	1549.50		ARCILLOSO-ARENOSO	fina	55	10	35	1.53E-05	

0.00	17.50	0.01	16.70	0.02	0.00	106	16.73	25092.00	605 lts/año; mar	arcilloso	fina	10	35	55	2.00E-06
0.00	3.79	0.74	0.02	0.03	0.00	233	0.79	1182.00		ARCILLOSO-ARENOSO	fina	55	10	35	1.53E-05
0.00	5.38	4.78	0.00	0.00	0.00	50	4.78	7168.50	1 kg/ha/año Ges	ARCILLOSO-ARENOSO	fina	55	10	35	1.53E-05
0.00	9.37	4.72	0.00	2.14	0.00	96	6.86	10296.00		ARCILLOSO-ARENOSO	fina	55	10	35	1.53E-05
0.00	54.66	10.18	6.08	10.11	0.00	82	26.38	39562.50	0.4 L/ha/año	arcilloso	fina	26	13	61	2.13E-06
0.00	0.54	0.03	0.00	0.00	0.00	209	0.03	42.00		ARCILLOSO-ARENOSO	fina	55	10	35	1.53E-05
0.00	11.15	1.89	0.05	0.10	0.00	379	2.05	3067.50		ARCILLOSO, LIMOSO	fina	5	50	45	3.31E-06
0.00	19.52	0.29	15.70	0.00	0.00	220	15.99	23989.50	3 kg/ha/año	franco-arcillosos y arcillosos	fina	30	45	25	4.56E-05
0.00	6.33	0.39	0.01	0.00	0.00	118	0.40	598.50		FRANCO ARCILLOSO	media	35	40	25	4.81E-05
0.00	8.56	0.00	8.56	0.00	0.00	93	8.56	12843.00	2 kg/ha/año Ges	ARCILLOSO, LIMOSO	fina	5	50	45	3.31E-06
0.00	11.61	6.99	0.00	0.04	0.00	150	7.03	10542.00	100 g/ha/año	franco arcilloso-arenoso ¹⁷	media	55	25	20	1.30E-04
0.00	17.30	16.53	0.02	0.02	0.00	121	16.56	24840.00	3 kg/ha/año (oto	arcilloso	fina	10	35	55	2.00E-06
0.00	10.24	1.39	0.00	0.00	0.00	63	1.39	2086.50	NO SE USA	franco arenoso-arcilloso	media	55	25	20	1.38E-04
0.00	19.08	0.72	2.94	0.00	0.00	43	3.65	5479.50		ARCILLOSO, LIMOSO	fina	5	50	45	3.31E-06
0.00	1.82	0.00	1.62	0.00	0.00	76	1.62	2430.00		ARCILLOSO, LIMOSO	fina	5	50	45	3.31E-06
0.00	0.33	0.08	0.00	0.00	0.00	41	0.08	120.00	1 kg/ha/año Ges	FRANCO ARCILLOSO	media	35	40	25	4.81E-05
0.00	22.69	9.51	0.00	0.00	0.00	189	9.51	14269.50		arcilloso-arenoso ¹⁹	fina	55	10	35	1.53E-05
0.00	3.61	1.15	0.00	0.00	0.00	93	1.15	1728.00	1 kg/ha/año Ges	FRANCO ARCILLOSO	media	35	40	25	4.81E-05
0.00	46.64	18.98	0.00	0.04	0.00	215	19.02	28534.50		FRANCO ARCILLOSO	media	35	40	25	4.81E-05

uanajuato, Guanajuato, México, 19 -21 de Septiembre de 2001. pp 126-1

100-1

a. Culiacán, Sinaloa, México, 27-29 de Octubre de 1999

ANEXO B. DATOS CLIMATOLÓGICOS DE LOS DISTRITOS DE RIEGO DE ESTUDIO (ERIC II)

Tabla B.1. Precipitación pluvial mensual (mm), distrito de riego 063. Periodo 1969 – 1996

AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	SUMATORIA
1969	0,00	9,30	0,00	0,00	0,00	0,00	105,40	88,70	8,10	11,40	0,00	35,80	258,70
1970	0,40	7,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	61,00	134,00	0,00	0,00	0,00	202,50
1971	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,80	93,00	0,00	138,00	146,00	9,00	9,40	400,20
1972	0,00	0,00	0,00	0,00	14,70	0,00	50,50	153,10	43,40	92,10	31,00	1,00	385,80
1973	6,00	31,00	0,00	0,00	0,00	0,00	70,30	0,00	100,10	1,60	0,00	0,00	209,00
1974	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,70	105,40	58,20	170,70	41,60	112,20	50,70	540,50
1975	14,30	3,70	0,00	1,20	0,00	0,00	66,40	180,40	103,90	5,40	19,00	3,00	397,30
1976	0,10	1,10	0,00	0,00	0,50	22,90	113,70	115,30	282,30	138,00	29,30	0,00	703,20
1977	32,10	0,00	2,70	0,00	0,00	6,50	41,10	222,20	27,20	20,50	1,10	0,00	353,40
1978	0,00	34,50	0,00	0,00	0,00	0,00	137,20	101,80	0,00	56,60	0,20	1,70	332,00
1979	57,00	26,40	0,00	0,00	40,30	15,60	18,80	64,60	145,40	0,00	0,00	0,00	368,10
1980	0,00	0,50	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	59,80	0,00	36,20	97,10
1981	69,10	4,00	9,20	5,60	0,00	0,00	37,50	67,90	105,80	198,30	0,00	0,00	497,40
1982	4,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	134,40	108,20	340,70	0,00	68,00	82,10	737,70
1983	46,60	10,20	39,70	10,10	0,00	0,00	103,70	170,80	53,10	93,80	24,70	43,10	595,80
1984	77,70	4,50	1,00	0,00	0,00	54,80	279,80	188,80	74,40	33,00	9,30	105,50	828,80
1985	50,20	0,00	5,80	0,00	0,00	0,00	58,60	88,80	30,50	81,40	0,00	0,00	315,30
1986	12,30	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	119,20	191,80	52,00	117,70	0,00	0,00	495,00
1987	0,00	9,80	0,00	0,00	0,80	0,00	22,80	119,90	8,20	1,00	9,80	4,50	176,80
1988	0,00	0,00	0,80	6,00	0,00	8,20	114,90	57,60	125,80	0,00	0,00	11,00	324,30
1989	42,60	9,60	0,00	0,00	0,00	5,00	129,00	211,80	95,10	3,00	48,00	18,50	562,60
1990	0,00	13,00	3,00	6,50	0,00	10,60	206,20	71,10	71,80	85,40	129,60	113,70	710,90
1991	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,60	42,30	42,90	207,60	5,30	58,70	50,70	414,10
1992	95,10	5,40	2,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	102,70
1994	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,50	41,50	121,00	93,00	10,50	0,00	0,00	282,50
1996	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00

Tabla B.2. Precipitación pluvial alta en el distrito de riego 063 (año 1983)

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	4.02
0.00	0.00	1.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.29
0.00	0.12	2.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.75	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	3.80	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	3.15	0.58	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	1.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.20	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.80	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.65	0.00	0.00	0.00
0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.90	0.05	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.52	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00
0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.30	0.00	0.00
0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.90	0.00	0.55	0.03	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	2.40	0.00	2.42	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.15	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	N.D	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.86	0.00	0.00	0.00	0.00
2.82	N.D	0.00	0.00	0.00	0.00	3.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	N.D	0.00	N.D	0.00	N.D	0.08	0.00	N.D	0.00	N.D	0.00

Tabla B.3. Precipitación pluvial baja en el distrito de riego 063 (año 1987)

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,10	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,86	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,46	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	3,40	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,20	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10
0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	0,00	0,00	0,00	0,30
0,00	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98	0,00
0,00	N.D	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	N.D	0,00	0,00	0,00	0,00	1,31	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	N.D	0,00	N.D	0,00	N.D	0,00	0,00	N.D	0,00	N.D	0,00

Tabla B.4. Precipitación pluvial mensual(mm), distrito de riego 035. Periodo 1961 – 1996

AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	SUMATORIA
1961	13,70	0,50	2,10	3,70	24,10	239,30	454,90	56,30	107,00	35,60	33,50	10,70	981,40
1962	0,00	0,00	5,10	24,30	7,00	100,50	103,80	129,20	140,90	64,60	45,20	21,90	642,50
1963	0,00	0,00	3,20	1,00	87,70	143,40	385,10	192,20	99,40	23,80	0,60	15,60	952,00
1964	2,50	2,40	20,00	0,00	49,10	224,50	176,10	102,00	131,00	49,80	30,40	12,40	800,20
1965	20,00	11,10	1,50	2,30	59,40	287,30	144,70	275,20	180,00	40,20	22,60	20,80	1065,10
1966	6,30	8,80	0,00	0,00	0,00	501,80	198,70	143,40	177,40	105,40	5,20	6,80	1153,80
1967	0,00	39,60	25,00	11,50	2,20	221,40	135,10	395,80	135,60	13,40	61,80	7,80	1049,20
1968	17,60	8,50	0,60	1,00	21,90	284,70	171,60	156,20	111,30	81,90	26,40	41,80	923,50
1969	21,00	82,00	58,00	1,60	5,70	67,10	221,80	436,90	0,00	22,80	2,50	2,50	921,90
1970	4,00	25,00	0,60	0,00	0,50	190,70	165,80	290,50	474,60	26,90	3,90	0,60	1183,10
1971	19,60	1,00	0,00	1,70	17,80	98,30	213,50	231,50	81,90	210,00	22,70	4,60	902,60
1972	4,60	0,80	9,50	0,00	23,90	139,40	739,30	188,70	104,20	15,40	38,20	2,10	1266,10
1973	0,60	18,20	0,00	2,80	73,80	363,10	144,70	295,50	40,60	135,10	9,50	49,20	1133,10
1974	28,70	9,20	2,00	6,30	3,00	499,90	347,00	81,40	497,40	18,00	22,60	9,50	1525,00
1975	7,30	7,80	0,00	0,00	14,10	70,30	114,40	140,70	461,40	6,40	5,00	13,10	840,50
1976	7,20	2,50	0,00	17,10	5,80	532,80	99,00	74,50	109,00	22,30	2,30	0,00	872,50
1977	1,00	1,50	0,00	7,40	1,20	151,50	117,00	62,40	56,00	172,20	74,20	9,60	654,00
1978	14,60	3,00	8,00	0,00	69,00	154,10	224,50	199,30	218,50	96,00	2,10	0,30	989,40
1979	2,00	1,50	2,50	18,60	27,30	84,10	60,80	405,00	266,10	38,50	3,00	24,10	933,50
1980	5,80	4,70	0,50	3,30	14,80	285,60	192,60	114,50	226,20	26,50	40,60	23,60	938,70
1981	32,10	1,10	9,60	10,00	25,50	290,50	0,00	249,30	132,10	72,10	0,00	8,60	830,90
1982	0,00	18,60	4,90	10,30	90,60	76,00	219,00	155,80	52,60	24,50	24,40	7,80	684,50
1983	13,00	30,50	7,70	0,00	21,30	87,90	618,10	242,50	128,60	20,90	48,00	7,00	1225,50
1984	16,60	0,70	2,60	0,00	50,20	160,40	331,90	278,10	392,40	18,20	22,70	91,80	1365,60
1985	0,00	0,60	7,50	15,00	32,40	247,80	241,10	129,30	161,40	48,40	20,40	6,80	910,70
1986	0,00	8,00	14,50	1,20	18,60	311,50	238,60	124,00	405,60	48,90	112,60	16,60	1300,10
1987	0,50	1,20	15,60	7,50	3,30	145,20	431,70	84,10	53,50	58,60	8,00	9,00	818,20
1988	9,40	0,40	16,20	21,70	7,00	243,00	179,40	258,40	191,30	0,00	0,00	3,00	929,80
1989	0,50	5,00	0,00	7,50	77,30	36,00	266,60	180,50	149,00	29,50	30,10	7,20	789,20
1990	2,00	3,70	0,70	0,00	11,00	166,50	287,50	168,00	196,20	62,90	26,40	35,00	959,90
1991	32,90	13,70	41,90	4,50	32,10	150,60	242,90	399,60	347,60	45,00	12,70	9,80	1333,30
1992	2,30	15,90	1,00	4,00	65,80	366,80	281,90	172,10	224,90	3,20	11,50	0,70	1150,10
1993	67,00	2,60	3,00	20,50	10,10	102,70	208,40	112,20	71,10	36,40	56,90	8,20	699,10
1994	7,00	4,10	76,40	3,00	3,10	26,20	235,80	192,30	201,10	49,50	24,00	15,20	837,70
1995	0,00	11,20	5,60	0,00	11,00	102,00	157,20	294,80	25,20	8,30	35,10	1,20	651,60
1996	8,20	2,00	13,10	81,60	43,30	167,10	121,40	59,00	192,60	74,20	22,40	3,20	788,10

Tabla B.5. Precipitación pluvial alta en el distrito de riego 035 (año 1974)

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,50	72,00	0,00	0,00	5,50	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,10	8,00	11,80	0,00	1,50	0,00	0,00
0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	61,20	5,50	0,00	0,00	11,10	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	12,80	4,10	1,00	1,00	7,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	NO_D	0,00	0,00	0,00	0,00	2,50	0,00	9,50
0,00	0,00	0,00	1,50	NO_D	0,00	11,50	9,50	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	1,70	NO_D	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	NO_D	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	NO_D	0,00	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13,50	0,00	2,00	0,00	NO_D	2,00	56,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2,50	0,00	0,00	0,00	NO_D	0,00	0,50	0,00	11,10	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	2,50	NO_D	52,50	0,00	0,10	68,50	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	NO_D	31,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	NO_D	37,00	0,00	28,50	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	NO_D	60,00	3,70	0,00	3,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,60	NO_D	31,00	1,00	0,00	2,90	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	NO_D	50,50	0,00	0,00	3,20	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	NO_D	109,50	0,00	0,00	185,30	0,00	4,50	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	NO_D	57,50	0,00	0,00	89,60	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	NO_D	4,00	0,00	0,00	61,50	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	NO_D	0,00	40,00	0,00	45,50	5,50	0,00	0,00
11,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	74,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00
0,00	1,20	0,00	0,00	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,40	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,50	3,00	0,00	0,00	0,00
0,00	NO_D	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,30	0,00	0,00	0,00
0,00	NO_D	0,00	0,00	0,00	30,20	0,00	0,00	13,50	0,00	0,00	0,00
0,00	NO_D	0,00	NO_D	0,00	NO_D	0,00	0,00	NO_D	0,00	NO_D	0,00

Tabla B.6. Precipitación pluvial baja en el distrito de riego 035 (año 1962)

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	NO_D	0,00	47,00	8,60	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,00	NO_D	0,00	35,50	2,50	0,40	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	NO_D	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	NO_D	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	NO_D	0,00	1,00	15,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	NO_D	0,00	1,20	0,00	3,40	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	NO_D	0,00	0,00	0,00	2,40	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	NO_D	0,00	0,00	0,00	0,00	1,70
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,50	NO_D	0,00	12,00	0,00	0,00	6,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	NO_D	0,00	10,50	0,00	0,00	11,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	9,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	10,50	0,00	0,00	0,00	0,00	16,50	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	12,00	0,00	0,00	10,00	49,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,70	11,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,00	21,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,50	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,00	6,50	0,00	3,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,00	0,50	0,00	3,70	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,50	0,00	0,00	0,00	0,00	17,50	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,50	0,00	0,00	0,00	0,00	3,50	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,00	15,50	0,00	0,00	2,50	7,50	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,00	1,00	0,00	6,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,50	0,00	0,00	20,50	0,50	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	NO_D	7,10	0,00	0,00	9,50	8,00	0,00
0,00	NO_D	0,00	0,00	7,00	NO_D	3,00	3,20	0,00	0,00	1,00	3,20
0,00	NO_D	0,00	0,00	0,00	8,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00
0,00	NO_D	5,10	NO_D	0,00	NO_D	0,00	19,50	NO_D	0,00	NO_D	0,00

Tabla B.7. Precipitación pluvial mensual (mm), distrito de riego 087. Periodo 1974 – 1988

AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	SUMATORIA
1974	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	174,30	148,50	83,80	4,60	4,30	11,30	426,80
1975	34,90	0,00	0,00	0,00	11,00	193,80	266,50	183,80	62,50	6,10	0,00	14,50	773,10
1976	0,00	8,10	0,00	1,00	11,10	76,50	375,90	150,60	151,60	73,30	84,60	11,50	944,20
1977	4,40	2,00	0,00	14,30	1,90	159,00	117,10	132,80	146,30	32,00	10,90	22,00	642,70
1978	1,70	18,30	0,00	0,00	3,00	149,30	178,80	169,20	167,40	68,20	0,80	0,40	757,10
1979	0,00	12,70	0,00	8,10	4,80	92,40	111,20	201,70	101,90	0,00	0,00	42,00	574,80
1980	118,60	5,10	0,00	8,30	17,20	108,40	218,10	224,70	229,40	37,50	19,00	1,50	987,80
1981	69,50	17,50	6,40	0,00	2,00	179,60	178,40	81,70	132,50	56,00	0,00	18,60	742,20
1982	0,00	0,00	0,00	14,00	67,00	94,60	225,50	142,20	16,60	22,80	48,30	28,70	659,70
1983	18,90	2,10	0,00	0,00	52,30	109,10	381,30	210,00	85,40	32,70	22,00	1,30	915,10
1984	25,20	4,50	0,00	0,00	17,60	278,00	220,20	232,20	149,80	10,20	0,00	6,00	943,70
1985	0,00	4,00	0,00	3,50	49,90	259,60	118,50	85,90	91,20	28,80	0,00	0,00	641,40
1986	1,00	0,00	0,00	0,00	41,20	182,50	205,60	171,90	212,90	156,00	13,30	2,50	986,90
1987	15,00	0,00	0,00	0,00	9,50	157,40	205,10	186,40	29,70	0,00	3,50	0,00	606,60
1988	7,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,50

Tabla B.8. Precipitación pluvial alta en el distrito de riego 087 (año 1983)

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	38,20	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40	0,30	2,50	0,00	1,30	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	122,40	8,10	3,70	0,00	2,50	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,40	13,50	0,00	0,00	0,00	1,30
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,30	4,50	0,00	0,00	1,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,10	0,00	8,00	0,00	0,40	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,50	0,60	4,50	0,00	0,60	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,20	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,30	9,30	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,50	29,50	15,60	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26,20	0,60	0,00	0,00	22,30	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,50	3,50	9,50	1,30	0,00	0,00	0,00
1,30	0,00	0,00	0,00	0,00	23,30	2,50	2,40	7,10	0,00	0,00	0,00
6,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25,60	0,00	5,40	0,00	0,00	0,00
1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,10	14,00	3,50	4,50	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,30	0,00	4,50	3,40	0,00	0,00
8,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,50	0,00	13,10	2,50	0,00	0,00
0,00	0,80	0,00	0,00	0,00	2,70	41,20	1,50	1,50	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,50	13,10	7,80	14,50	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50	42,00	0,20	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,10	12,50	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	1,30	0,00	0,00	24,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	25,30	16,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	2,50	2,20	15,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,50	15,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	NO_D	0,00	0,00	0,00	0,00	15,10	13,80	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	NO_D	0,00	0,00	0,00	0,00	15,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	NO_D	0,00	NO_D	0,00	NO_D	0,40	0,00	NO_D	0,00	NO_D	0,00

Tabla B.9. Precipitación pluvial baja en el distrito de riego 087 (año 1977)

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,50	0,00	28,20	10,80	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,00	10,10	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,10	16,20	0,00	7,40	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,20	4,80	0,00	45,50	2,20	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,50	0,00	0,10	4,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,50	1,30	1,30	0,00	0,00	1,20
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,20	6,00	1,70	9,50	0,00	0,00	8,50
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,10	5,40	0,00	3,70	0,00	0,00	12,10
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,20	14,30	13,50	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,20	2,50	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,30	14,80	0,30	0,00	0,00	0,00
4,40	0,00	0,00	4,10	0,00	20,00	1,80	2,50	0,00	0,00	0,00	0,20
0,00	0,00	0,00	0,60	0,00	6,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,40	0,00	3,70	6,50	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,60	0,00	30,00	0,00	0,00	6,10	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,20	4,00	3,20	0,10	0,00	4,50	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	9,60	0,00	0,00	4,40	0,00	3,20	2,70	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	2,00	0,00	0,00	0,00	2,20	0,00	0,20	0,00	1,20	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,10	12,00	0,00	5,30	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,90	0,00	6,60	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,00	5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,50	1,80	30,20	2,70	1,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	11,50	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,20	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	NO_D	0,00	0,00	1,70	19,20	9,10	8,50	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	NO_D	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40	0,50	0,00	0,00	0,00
0,00	NO_D	0,00	NO_D	0,20	NO_D	0,20	0,00	NO_D	0,00	NO_D	0,00

ANEXO C. DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS EMPLEADOS PARA LA SIMULACIÓN EN PELMO

Para crear el archivo de entrada de la sustancia (extensión PSM), el usuario debe seguir dos pasos: definir el escenario de metabolismo e ingresar los datos necesarios de las características de la sustancia (en este caso, Atrazina), como se muestra en la Tabla C.1. Otros datos son predeterminados por PELMO.

Tabla C.1. Datos de entrada para el archivo de características del herbicida (*.PSM)

Parámetro y descripción	Valor, fuente y/o comentario
Nombre del herbicida	Atrazina
Número de horizontes	4
Número de aplicaciones del herbicida	26
Día y mes de aplicación	Dependiendo del distrito de riego: DR 063: 25 de mayo DR 035: 25 de febrero DR 087: 25 de mayo
Dosis de aplicación (kg ha ⁻¹) *(ingrediente activo)	Dependiendo del distrito de riego: DR 063: 0.9* DR 035: 2.7* DR 087: 3.6*
Profundidad de aplicación (cm)	0
Modo de aplicación del herbicida	Directo al suelo
Masa molar (g mol ⁻¹)	215.69
Constante de Henry para el herbicida (J mol ⁻¹)	0.00027
Coeficiente de difusión en aire	No se considero volatilización
Profundidad de volatilización	No se considero volatilización
Consumo por las plantas	0
Degradación: tasa de degradación (días ⁻¹)	0.005776
Temperatura a la cual se realizaron los experimentos de degradación (°C)	30 - 35
Q10: Factor para el incremento de la degradación cuando la temperatura aumenta 10°C	2.2 (valor recomendado por PELMO)
Humedad absoluta durante los experimentos (%)	16
Corrección de biodegradación por humedad	0.7 (valor recomendado por PELMO)
Incremento de adsorción anual (%)	0
Coeficiente de adsorción (mL g ⁻¹)	2.748
Exponente de Freundlich	1

Parámetro y descripción	Valor, fuente y/o comentario
Factor de corrección de biodegradación con respecto a la profundidad (sugerido en PELMO)	0-30 cm: 1 30-60 cm: 0.5 60 – 100 cm: 0.3 > 100 cm: 0

La Tabla C.2 muestra los datos relacionados con el escenario (latitud, parámetros del suelo y del tipo de cultivo, así como sí se simulan o no, escorrentía y erosión). Los datos de las características hidráulicas de los suelos que no se obtienen por experimentación, se calcularon con el programa “SPAW-Hidrology”(referencia).

Tabla C.2. Datos de entrada para el archivo de características de suelo y cultivo (*.SZE)

Parámetro y descripción	Valor, fuente y/o comentario
Título : identificación del archivo de escenario	Se asigna un nombre distinto a cada archivo
PFAC: Factor para estimar el potencial de evapotranspiración diario (ET) a partir de la evaporación diaria.	0.8
SFAC: Factor de descongelamiento	0
ANETD: Profundidad mínima a la cual hay evaporación (cm)	35
ERFLAG: Indicación para simular erosión	No se simula erosión
NDC: Número de cultivos en la simulación	Dependiendo del distrito de riego: DR 063: Maíz DR 035: Caña de azúcar DR 087: Maíz
CINTCP: Máxima capacidad de intercepción del cultivo (cm) (sugerido en PELMO)	0.275
Fechas de emergencia, maduración, y cosecha	<u>Maíz</u> Emergencia: 7 de mayo Maduración: 30 de septiembre Cosecha: 20 de octubre <u>Caña de azúcar</u> Emergencia: 7 de febrero Maduración: 30 de octubre Cosecha: 20 de diciembre
AMXDR: Profundidad máxima de la raíz (cm)	160
COVMAX: área de cobertura máxima por el cultivo (%)	100
ICNAH: Condiciones superficiales después de la siembra	Residuos

Parámetro y descripción	Valor, fuente y/o comentario
CN: Número de curva para escurrientías	No se simula
WFMAX : Peso seco máximo del cultivo cuando cubre toda la superficie (kg m^{-2}) (PELMO no considera caña de azúcar en su base de datos, por lo que se emplean los datos de maíz)	1.05
NCPDS: Número de periodos de siembra	26
HSWZT: Drenaje	No se considero drenaje
NHORIZ: Número de horizontes totales	Dependiendo del distrito de riego: DR 063: 4 DR 035: 4 DR 087: 4
CORED: Profundidad total del perfil de suelo (cm) (Depende de la profundidad promedio de manto freático)	Dependiendo del distrito de riego: DR 063: 200 DR 035: 400 DR 087: 500
THKNS: Espesor de cada horizonte (cm)	Dependiendo del distrito de riego: DR 063: 30,30,40,100 DR 035: 30,30,40,300 DR 087: 30,30,40,400
NCOM2: Número de compartimientos de simulación en el perfil de suelo	Dependiendo del distrito de riego: DR 063: 40 DR 035: 80 DR 087: 520
BD: Densidad (g cm^{-3})	Dependiendo del distrito de riego: DR 063: 1.15 DR 035: 1.32 DR 087: 1.33
DISP: Dispersión hidrodinámica ($\text{cm}^2 \text{ día}^{-1}$)	0
TETHO: contenido de agua inicial en los horizontes ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	Dependiendo del distrito de riego: DR 063: 0.15 DR 035: 0.15 DR 087: 0.16
Capacidad de campo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	Dependiendo del distrito de riego: DR 063: 0.50 DR 035: 0.30 DR 087: 0.30
Punto de marchitez ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	Dependiendo del distrito de riego: DR 063: 0.36 DR 035: 0.15 DR 087: 0.15
Contenido de carbón orgánico (%)	1.154
pH	7.8

Parámetro y descripción	Valor, fuente y/o comentario
Factor de corrección de la biodegradación con respecto a la profundidad (sugerido en PELMO)	0-30 cm: 1 30-60 cm: 0.5 60 – 100 cm: 0.3 > 100 cm: 0
Salida de datos hidrológicos, masa del soluto y concentración	Anuales
Número de capas de salida	1
Latitud (msnm)	Dependiendo del distrito de riego: DR 063: 25° 35' DR 035: 19° 27' DR 087: 20° 19'

Los datos climatológicos se emplean para generar datos diarios. El modelo PELMO contiene una opción para la introducción de datos diarios. La Tabla C.3 muestra la información necesaria para ejecutar el modelo.

Tabla C.3. Datos de entrada para el archivo de datos meteorológicos (*.CLI)

Parámetro y descripción	Valor, fuente y/o comentario
Título : identificación del archivo meteorológico	Se asigna un nombre distinto a cada archivo
MMDDYY: mes/día/año	Datos climatológicos del sitio de estudio.
PRECIP: precipitación (cm día ⁻¹)	Los datos son obtenidos con el programa ERIC II (IMTA, 2002), para cada distrito de riego. Este programa facilita la extracción rápida de información meteorológica, seleccionando la variable de interés y el intervalo de tiempo para una región determinada.
PEVP: datos de evaporación (cm/día)	
TEMP: temperatura por día a las 14 h (°C)	
AVTEMP: temperatura promedio por día (°C)	
VATEMP: diferencia entre temperatura min. y máx. por día (°C)	
Datos de riego	Los datos son obtenidos con el modelo SPRITEER (IMTA, 2001), para cada distrito de riego, a partir de las características del suelo y el clima de la región, así como del tipo de cultivo
REMOI: Humedad relativa (%)	No se simula humedad relativa

Los resultados que se obtienen están en función de la profundidad y tiempo dependiendo de la concentración del herbicida en el perfil de suelo, es decir, cantidad (g ha⁻¹) y concentración (µg L⁻¹) del mismo en el lixiviado.

ANEXO D. CONCENTRACIONES DE ATRAZINA DE LAS SIMULACIONES CON PELMO

Tabla D.1. Concentraciones promedio anuales de Atrazina que entran al manto freático [$\mu\text{g L}^{-1}$]

AÑO	DISTRITO DE RIEGO					
	DR063		DR035		DR087	
	PPA (1983, 42 cm)	PPB (1987, 15 cm)	PPA (1974, 86 cm)	PPB (1962, 24 cm)	PPA (1983, 87 cm)	PPB (1977, 60 cm)
	Concentración promedio anual de Atrazina que entra al manto freático ($\mu\text{g L}^{-1}$)					
1	0,00	0,00	0,06	0,02	0,00	0,00
2	0,01	0,00	2,44	0,97	0,64	0,05
3	0,06	0,00	3,91	2,42	4,40	0,69
4	0,14	0,00	4,01	2,67	13,25	3,69
5	0,21	0,00	4,01	2,68	9,52	3,89
6	0,24	0,00	4,01	2,68	11,84	12,11
7	0,24	0,00	4,01	2,68	14,71	8,30
8	0,25	0,01	4,01	2,68	9,79	5,83
9	0,25	0,02	4,01	2,68	14,57	11,61
10	0,25	0,04	4,01	2,68	17,33	11,80
11	0,25	0,06	4,01	2,68	7,02	4,24
12	0,25	0,09	4,01	2,68	12,18	14,59
13	0,25	0,12	4,01	2,68	14,74	8,75
14	0,25	0,14	4,01	2,68	9,79	5,88
15	0,25	0,16	4,01	2,68	12,36	11,66
16	0,25	0,17	4,01	2,68	14,29	11,40
17	0,25	0,17	4,01	2,68	17,33	11,80
18	0,25	0,18	4,01	2,68	9,91	5,98
19	0,25	0,18	4,01	2,68	12,18	14,59
20	0,25	0,18	4,01	2,68	14,74	8,75
21	0,25	0,18	4,01	2,68	9,79	5,88
22	0,25	0,18	4,01	2,68	12,13	11,43
23	0,25	0,18	4,01	2,68	14,57	11,63
24	0,25	0,18	4,01	2,68	17,33	11,80
25	0,25	0,18	4,01	2,68	9,91	5,98
26	0,25	0,18	4,01	2,68	12,18	14,59
27	0,25	0,18	3,95	2,66	13,84	8,55
28	0,24	0,18	1,56	1,70	6,39	5,41
29	0,19	0,18	0,09	0,26	2,70	8,26
30	0,11	0,18	0,00	0,01	0,89	4,62
31	0,04	0,18	0,00	0,00	0,12	1,80
32	0,01	0,18	0,00	0,00	0,00	0,25
33	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,16
34	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,02
35	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00
36	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00
37	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
38	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
39	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
40	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
41	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
42	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
43	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

PPA: precipitación pluvial alta; PPB: precipitación pluvial baja; (año, lámina)

Tabla D.2. Concentraciones de lixiviado que entra al manto freático [g ha⁻¹]

AÑO	DISTRITO DE RIEGO					
	DR063		DR035		DR087	
	PPA (1983, 42cm)	PPB (1987, 15 cm)	PPA (1974, 86 cm)	PPB (1962, 24cm)	PPA (1983, 87cm)	PPB (1977, 60 cm)
Lixiviado que entra al manto freático (g ha ⁻¹)						
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,02	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00
6	0,17	0,03	2,76	0,05	0,00	0,00
7	0,74	0,15	36,22	1,31	0,00	0,00
8	2,22	0,50	180,50	13,59	0,00	0,00
9	4,89	1,26	443,30	67,34	0,00	0,00
10	8,50	2,54	676,60	188,30	0,00	0,00
11	12,28	4,27	789,50	343,40	0,00	0,00
12	15,49	6,20	822,00	466,40	0,05	0,00
13	17,75	8,03	827,90	530,70	0,41	0,00
14	19,11	9,55	827,70	554,00	2,39	0,00
15	19,82	10,65	827,70	560,10	10,28	0,00
16	20,15	11,37	827,70	561,30	34,08	0,01
17	20,28	11,80	827,70	561,50	89,58	0,04
18	20,33	12,03	827,70	561,60	192,20	0,19
19	20,35	12,14	827,70	561,60	345,50	0,74
20	20,36	12,19	827,70	561,60	534,30	2,42
21	20,36	12,22	827,70	561,60	728,70	6,82
22	20,36	12,23	827,70	561,60	898,40	16,80
23	20,36	12,23	827,70	561,60	1026,00	36,64
24	20,36	12,23	827,70	561,60	1109,00	71,47
25	20,36	12,23	827,70	561,60	1156,00	125,90
26	20,36	12,23	827,70	561,60	1180,00	202,30
27	20,36	12,23	827,70	561,60	1191,00	299,10
28	20,36	12,23	827,70	561,60	1195,00	410,60
29	20,36	12,23	827,70	561,60	1197,00	527,90
30	20,36	12,23	827,70	561,60	1197,00	641,50
31	20,34	12,23	827,70	561,60	1198,00	742,90
32	20,19	12,20	826,00	561,50	1198,00	826,90
33	19,63	12,08	792,50	560,20	1198,00	891,60
34	18,16	11,74	648,20	548,00	1198,00	938,30
35	15,50	10,98	385,40	494,20	1198,00	969,80
36	11,90	9,71	152,10	373,30	1198,00	989,80
37	8,12	7,98	39,25	218,10	1198,00	1002,00
38	4,90	6,05	6,78	95,13	1198,00	1009,00
39	2,63	4,21	0,81	30,89	1197,00	1012,00
40	1,26	2,69	0,07	7,57	1195,00	1014,00
41	0,54	1,59	0,00	1,43	1187,00	1015,00
42	0,21	0,86	0,00	0,21	1164,00	1015,00
43	0,08	0,44	0,00	0,03	1108,00	1016,00
44	0,03	0,21	0,00	0,00	1005,00	1016,00
45	0,01	0,09	0,00	0,00	852,10	1015,00
46	0,00	0,04	0,00	0,00	663,30	1013,00
47	0,00	0,15	0,00	0,00	469,00	1009,00
48	0,00	0,01	0,00	0,00	299,20	999,00
49	0,00	0,00	0,00	0,00	171,90	979,20
50	0,00	0,00	0,00	0,00	88,00	944,40
51	0,00	0,00	0,00	0,00	92,00	926,00
52	0,00	0,00	0,00	0,00	42,18	878,40
53	0,00	0,00	0,00	0,00	17,66	760,50
54	0,00	0,00	0,00	0,00	6,44	625,60
55	0,00	0,00	0,00	0,00	2,13	486,50
56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,64	356,60
57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	245,80
58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	159,40
59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	97,24
60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	55,85
61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	30,25
62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,47
63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,49
64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,44
65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50
66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,62
67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25
68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09
69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
TOTAL	529,547	318,255	21528,55	14600,95	31231,668	26411,368

PPA: precipitación pluvial alta; PPB: precipitación pluvial baja; (año, lámina)

ANEXO E. ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE PELMO

PELMO es uno de los modelos más utilizados en Europa. Se utiliza principalmente para determinar el potencial de lixiviación de un plaguicida hacia el agua subterránea. El análisis de la sensibilidad de este tipo de modelos matemáticos tiene como objetivo medir la influencia de los parámetros de entrada en las predicciones del modelo para su calibración. Provee al modelador una oportunidad para identificar deficiencias en la estructura teórica de los modelos y de los problemas en su operación. La información de la sensibilidad se puede utilizar para la simplificación y el refinamiento del modelo (Dubus, 2002).

El análisis de sensibilidad consiste en variar parámetros seleccionados uno a uno (todos los demás parámetros permanecen constantes), observando la influencia de los cambios en las predicciones del modelo. La sensibilidad del modelo se cuantifica numéricamente por el máximo cociente de variación de las salidas y entradas del modelo. Los valores absolutos de los cocientes se utilizan para la comparación y el radio máximo de variación del modelo (Maximun Absolute Ratio Of Variation, MAROV), para cada parámetro fue determinado por la siguiente expresión:

$$MAROV = Max \left| \frac{(O - O_{BC})}{(I - I_{BC})} * \frac{(I_{BC})}{(O_{BC})} \right|$$

Donde:

O: Valor de salida correspondiente al valor obtenido con el parámetro modificado

O_{BC}: Valor de salida del modelo (parámetro experimental o de la literatura)

I: Valor de entrada con el cual se quiere medir la sensibilidad

I_{BC}: Valor de entrada original (parámetro experimental o de la literatura).

Cuanto mayor es índice MAROV para un parámetro, mayor es la influencia de ese parámetro sobre la salida del modelo. Cuando el índice MAROV es igual a la unidad, significa que una variación en la entrada del modelo de tanto por ciento, resultara en la misma variación en la salida del modelo.

En la Tabla D.1 se muestran los parámetros empleados para el análisis de sensibilidad (estos parámetros variaron un 20 % respecto a los valores base) para conocer el índice MAROV con respecto a la concentración de Atrazina ($\mu\text{g L}^{-1}$) que entra al manto freático (González, 2005).

Tabla D.1. Valores del índice MAROV

Parámetro	Unidades	Nivel de influencia	I	I _{BC}	O	O _{BC}	MAROV
Biodegradación	días ⁻¹	1	0.00456	0.0057	9	5.7	2.9
Adsorción	L kg ⁻¹	2	2.198	2.7486	8.65	5.7	2.6
Capacidad de campo	cm ³ cm ⁻³	3	0.152	0.19	8.1	5.7	2.1
Dosis plaguicida	Kg ha ⁻¹	4	0.3	0.375	4.55	5.7	1.0
Capas	capas	5	20	30	5.9	5.7	0.1
Dispersión	cm ² d ⁻¹	6	10	5	6.45	6.1	0.06

De esta tabla se deduce que los parámetros con mayor influencia son la biodegradación, la adsorción y la capacidad de campo. Adsorción y degradación fueron determinados experimentalmente; la capacidad de campo se estimó con una función de pedotransferencia (González, 2005).

Para este análisis fue necesario utilizar un valor diferente de cero para la dispersión hidrodinámica, aun cuando no se recomienda asignar un valor en la modelación. Los resultados indican que el análisis para este parámetro no es significativo, comparado con el análisis de otros parámetros. En el caso de la dispersión se utilizó como valor base (I_{BC}) 5 cm² d⁻¹ en lugar de cero (valor utilizado en la modelación con PELMO).