

Ciencias Químicas y Matemáticas

Handbook T-I

Sepúlveda-Jiménez, Daniel

Salazar-Moreno, Raquel

Pérez-Soto, Francisco

Rocha-Quiroz, Jaime

Directores

Volumen I

Para futuros volúmenes:
<http://www.ecorfan.org/handbooks>

ECORFAN Ciencias Químicas y Matemáticas

El Handbook ofrecerá los volúmenes de contribuciones seleccionadas de investigadores que contribuyan a la actividad de difusión científica de ECORFAN en su área de investigación en Ciencias Químicas y Matemáticas. Además de tener una evaluación total, en las manos de los editores de la Universidad Autónoma Chapingo que colaboraron con calidad y puntualidad en sus capítulos, cada contribución individual fue arbitrada a estándares internacionales (RENIECYT-LATINDEX-DIALNET-ResearchGate-DULCINEA-CLASE- Sudoc- HISPANA-SHERPA-UNIVERSIA-eREVISTAS-ScholarGoogle-DOI-REBID-Mendeley), el handbook propone así a la comunidad académica, los informes recientes sobre los nuevos progresos en las áreas más interesantes y prometedoras de investigación en Ciencias Químicas y Matemáticas.

**Sepúlveda-Jiménez, Daniel • Salazar-Moreno, Raquel • Pérez-Soto, Francisco •
Rocha-Quiroz, Jaime**

Editores

Ciencias Químicas y Matemáticas

Universidad Autónoma Chapingo. Octubre, 2015.

ECORFAN®

Editores

Sepúlveda-Jiménez, Daniel

Salazar-Moreno, Raquel

Pérez-Soto, Francisco

Rocha-Quiroz, Jaime

Universidad Autónoma Chapingo

ISBN 978-607-8324-39-2

Sello Editorial ECORFAN: 607-8324

Número de Control HCQM: 2015-01

Clasificación HCQM (2015): 081015-0101

©ECORFAN-México, S.C.

Ninguna parte de este escrito amparado por la Ley Federal de Derechos de Autor ,podrá ser reproducida, transmitida o utilizada en cualquier forma o medio, ya sea gráfico, electrónico o mecánico, incluyendo, pero sin limitarse a lo siguiente: Citas en artículos y comentarios bibliográficos ,de compilación de datos periodísticos radiofónicos o electrónicos. Para los efectos de los artículos 13, 162,163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169,209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal de Derechos de Autor. Violaciones: Ser obligado al procesamiento bajo ley de copyright mexicana. El uso de nombres descriptivos generales, de nombres registrados, de marcas registradas, en esta publicación no implica, uniformemente en ausencia de una declaración específica, que tales nombres son exentos del protector relevante en leyes y regulaciones de México y por lo tanto libre para el uso general de la comunidad científica internacional. HCQM es parte de los medios de ECORFAN-México, S.C , E:94-443.F:008-(www.ecorfan.org)

Prefacio

Una de las líneas estratégicas de la misión y visión universitaria ha sido la de impulsar una política de ciencia, tecnología e innovación que contribuya al crecimiento económico, a la competitividad, al desarrollo sustentable y al bienestar de la población, así como impulsar una mayor divulgación en beneficio del índice de desarrollo humano, a través de distintos medios y espacios, así como la consolidación de redes de innovación de la investigación, ciencia y tecnología en México.

La Universidad Autónoma Chapingo visualiza la necesidad de promover el proceso de la investigación, proporcionando un espacio de discusión y análisis de los trabajos realizados fomentando el conocimiento entre ellos y la formación y consolidación de redes que permitan una labor investigativa más eficaz y un incremento sustancial en la difusión de los nuevos conocimientos. Este volumen I contiene 11 capítulos arbitrados que se ocupan de estos asuntos en Tópicos Selectos de Ciencias Químicas y Matemáticas, elegidos de entre las contribuciones, reunimos algunos investigadores y estudiantes.

Rojano, Salazar y Ruiz presentan Análisis experimental de temperatura y humedad relativa en una instalación para hongo seta, *Escalante, Rodríguez y Escalante* presentan Modelos empíricos que explican la dinámica de acumulación de materia seca de la maleza presente en frijol y de su rendimiento en clima templado, *Carrera, Mayorga y Maya* presentan Risk salinity and sodicity from the cutuchi hydrographic system basin high from amazon, Ecuador, *Carrera, Guevara, Gualichicomín y Maya* presentan Processes controlling water chemistry and eutrophication in the basin of Río Grande, Chone, Ecuador, *Contreras, Lugo y Ayala* presentan Aplicación para obtener el área foliar desde imágenes obtenidas de un escáner, *Sepúlveda, Loera y Sepúlveda* presentan Revisión de modelos matemáticos para captura de agua y nutrientes por la raíz de las plantas, *Gómez, Miranda, Olvera y Rodríguez* presentan Residue analysis of organochlorides and organophosphorus pesticides in raw milk by GC-MS, *Zuleta, Chávez, Reyes y Guerra* presentan Alcoholes de cadena larga y b-sitosterol DE *Thalictrum hernandezii* Tausch ex. J. Presl, *López* presenta Manejo forestal para el control de inundaciones en la subcuenca de Manialtepec, Oaxaca, *Souza* presenta Conglomerados productivos de cacao en México, *Salazar y López* presentan La teoría difusa en la modelación de sistemas agrícolas

Quisiéramos agradecer a los revisores anónimos por sus informes y muchos otros que contribuyeron enormemente para la publicación en éstos procedimientos repasando los manuscritos que fueron sometidos. Finalmente, deseamos expresar nuestra gratitud a la Universidad Autónoma Chapingo en el proceso de preparar esta edición del volumen.

Sepúlveda-Jiménez, Daniel
Salazar-Moreno, Raquel
Pérez-Soto, Francisco
Rocha-Quiroz, Jaime

Texcoco de Mora- México. Octubre, 2015.

Contenido	Pág
1 Análisis experimental de temperatura y humedad relativa en una instalación para hongo seta ROJANO-AGUILAR, Abraham, SALAZAR-MORENO, Raquel y RUIZ-GONZALEZ, Luis Gerardo	1-6
2 Modelos empíricos que explican la dinámica de acumulación de materia seca de la maleza presente en frijol y de su rendimiento en clima templado ESCALANTE-ESTRADA, José Alberto Salvador, RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, María Teresa y ESCALANTE-ESTRADA, Yolanda Isabel	7-14
3 Risk salinity and sodicity from the cutuchi hidrographic system basin high from amazon, Ecuador CARRERA-VILLACRÉS, David Vinicio, MAYORGA-LLERENA, Eduardo Patricio y MAYA-CARRILLO, Azucena Maribel	15-24
4 Processes controlling water chemistry and eutrophication in the basin of Río Grande, Chone, Ecuador CARRERA-VILLACRÉS, David, GUEVARA-GARCÍA, Paulina, GUALICHICOMIN-JUÍÑA, Grace y MAYA-CARRILLO, Azucena Maribel	25-36
5 Aplicación para obtener el área foliar desde imágenes obtenidas de un escáner CONTRERAS-MURILLO, Sergio, LUGO-ESPINOSA, Oziel y AYALA-DE LA VEGA, Joel	37-46
6 Revisión de modelos matemáticos para captura de agua y nutrientes por la raíz de las plantas SEPÚLVEDA-JIMÉNEZ, Daniel, LOERA-MARTÍNEZ, Jesús y SEPÚLVEDA-ROBLES, Daniel Eduardo	47-59
7 Residue analysis of organochlorides and organophosphorus pesticides in raw milk by GC-MS GÓMEZ-XICOTÉNCATL, Teresita, MIRANDA-CRUZ, Edith, OLVERA-PÉREZ, Ma. Antonia y RODRÍGUEZ-BLANCO, Lili	60-69
8 Alcoholes de cadena larga y b-sitosterol DE <i>Thalictrum hernandezii</i> Tausch ex. J. Presl ZULETA-PRADA, Holber, CHÁVEZ-SAN AGUSTIN, Rodrigo, REYES-TREJO, Benito y GUERRA-RAMÍREZ, Diana	70-82
9 Manejo forestal para el control de inundaciones en la subcuenca de Manialtepec, Oaxaca LÓPEZ-CAMACHO, Maribel	83-91

10 Conglomerados productivos de cacao en México SOUZA-PEÑALOSA, Patricia	92-104
11 La teoría difusa en la modelación de sistemas agrícolas SALAZAR-MORENO, Raquel y LÓPEZ-CRUZ, Irineo Lorenzo	105-116
<i>Apéndice A Consejo Editor Universidad Autónoma Chapingo</i>	117
<i>Apéndice B Consejo Editor ECORFAN</i>	118-119
<i>Apéndice C Comité Arbitral ECORFAN</i>	120

Análisis experimental de temperatura y humedad relativa en una instalación para hongo seta

ROJANO-AGUILAR, Abraham, SALAZAR-MORENO, Raquel y RUIZ-GONZALEZ, Luis Gerardo

A. Rojano, R. Salazar y L. Ruiz

Universidad Autónoma Chapingo, Km 38.5 Carr. México-Texcoco. Chapingo, Edo. México, C.P 56230. México
abrojano@hotmail.com

D. Sepúlveda, R. Salazar, F. Pérez y J. Rocha (eds.) Ciencias Químicas y Matemáticas-©ECORFAN, Texcoco de Mora-México, 2015.

1 Introducción

Cuando hablamos de hongos, varios pensamientos nos asaltan, desde los más delicados y buenos recuerdos culinarios hasta los miedos más acendrados debido a los numerosas experiencias vividas o escuchadas por la población. Si de hongos en forma natural nos generan dichos pensamientos, es otra historia cuando la necesidad y la curiosidad mueven al hombre a cultivarlos, a conocerlos y a manipularlos. Los descubrimientos no son nuevos, ya desde los tiempos antiguos, en las diferentes culturas había la intención de domesticarlos hasta en la actualidad que existen empresas dedicadas a hacer negocio.

Cuando se observa la abundancia de la producción y su rápido crecimiento que da lugar a los adagios conocidos de ‘crecer como hongos’, uno nunca se percata de que una vez motivados por llevar a cabo una producción a diferentes escalas empiezan a aparecer los problemas en cualquiera de las etapas que conllevan llevar los hongos hasta un paladar exigente.

Así es, la naturaleza genera condiciones ambientales apropiadas en determinadas ventanas temporales, que los campiranos aprovechan para hacer la recolección, Degustación y explicaciones más inverosímiles. La curiosidad, lo exótico, y los efectos curativos y riquezas nutrimentales de dichos alimentos han hecho que el consumo se incremente recientemente.

Los altos contenidos nutricionales proteínicos y el bajo contenido calórico hacen de este alimento una alternativa viable para una sociedad como la de la república mexicana.

Sin embargo cuando la producción tiene que ser con demanda continúa, implica no solo establecer los procedimientos correctos sino también contar o construir las instalaciones apropiadas.

Los hongos, dependiendo de cada especie requieren condiciones muy específicas de temperatura, humedad investigadas en este trabajo, y la luminosidad que será abordada en experimentos posteriores para poder desarrollarse en sustratos apropiados, y la especie que ahora nos ocupa no es la excepción, los *Pleurotus ostreatus*, son unos hongos seta bastante comercializados.

Los hongos requieren principalmente de seis fases que comprenden desde la producción del micelio (semilla) hasta la producción de hongos para llegar a un final feliz. La producción de micelio es llevado a cabo por medio de dos pasos. Primero, la preparación del sustrato de residuos de trigo, maíz o cualquier otro vegetal por medio de un proceso de pasteurización con aplicación de sustancias químicas y de aplicación de vapor, y segundo la propagación del micelio en unas instalaciones completamente cerradas.

Posteriormente, el proceso de producción es llevado a cabo por los cuatro pasos restantes que involucran inoculación del sustrato, periodo de incubación de 15 a 20 días, fructificación y cosecha en un periodo de siete a diez días. De hecho, la fase que uno observa a simple vista es la parte final de fructificación y la cosecha.

Específicamente, en términos de variables psicométricas, el problema típico de producción de hongos sujeto a un monitoreo frecuente de temperatura y humedad es un reto de la producción intensiva. Aun cuando existen otras variables como la luminosidad y ventilación, estas son explicadas de acuerdo a la bibliografía consultada (Chang, et. al., 1978; Rinker, 1986).

La influencia de la temperatura y la humedad es un caso particular de la psicrometría, la cual es una teoría ampliamente usada en explicar y describir los procesos ambientales, sin embargo poco a poco se han ido investigando las particularidades que cada situación atmosférica genera. La presencia de vapor de agua en la atmosfera implica desarrollar o adaptar nuevas herramientas para entender, predecir y controlar o adaptarse a las condiciones probables de escenarios futuros de la humedad relativa donde la temperatura puede cambiar en varios grados (Bartzanas, et. al., 2007).

En este sentido, el presente trabajo impacta la problemática de la agricultura intensiva de hongos con el fin de buscar las condiciones de construcción más adecuadas para conseguir mayor cantidad de producto por unidad de volumen, así como un mejor control de calidad, calculando los valores de temperatura y humedad absoluta para conseguir las trayectorias para alcanzar las condiciones óptimas en los aspectos climáticos del sistema de producción (Vedder, 1978, Stamets, et. al., 1983).

Las medidas necesarias para alcanzar y mantener las condiciones ambientales óptimas en términos de temperatura y humedad relativa de 24 °C y 95%, respectivamente, en un experimento llevado a cabo en la colonia Salitrería, Texcoco, Estado de México.

1.1 Materiales y métodos

Una instalación simple y acondicionada para producción como la que se muestra la Figura 1, fue adaptada e instrumentada, cercana a la Universidad Autónoma Chapingo, y con un sistema de recolección de datos Arduino para seis posiciones diferentes.

Figura 1 Instalación provisional de un sistema electrónico de captura de datos de temperatura humedad con un sistema Arduino



Asimismo, la obtención de la información es llevada a cabo con un formato Excel para temperatura en °C y humedad relativa en % en una salida de Excel como series de tiempo, para seis posiciones diferentes dentro de la instalación.

Tabla 1 Se muestran las estadísticas típicas de cada punto muestreado en la serie de tiempo en estudio, y calculadas con Matlab

Variable	RH1	RH2	RH3	RH4	RH5	RH6	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Mean	66.94	66.39	67.94	61.94	44.27	61.36	21.32	22.10	22.73	21.75	22.70	21.46
sdv	6.40	6.11	7.87	6.93	4.58	7.65	2.32	2.23	2.65	2.63	2.57	2.38
var	40.93	37.29	62.01	48.00	21.01	58.56	5.40	4.98	7.02	6.91	6.58	5.67
min	58.00	54.00	57.00	50.00	38.00	48.00	16.00	17.00	17.00	16.00	17.00	16.00
max	83.00	81.00	89.00	76.00	58.00	79.00	25.00	26.00	27.00	26.00	27.00	26.00
range	25.00	27.00	32.00	26.00	20.00	31.00	9.00	9.00	10.00	10.00	10.00	10.00

Tabla 1.1 Diferentes escenarios seleccionados para llevarlos a las condiciones óptimas por medio de calentar o humedecer, en diferentes localizaciones de la cámara de producción de acuerdo a como se requiera

Escenarios	Temperatura(°C)	Humedad Relativa (%)
A	16	90
B	16	50
C	22	80
D	22	40
E	28	60
F	28	30
G	24	95

Figura 1.1 Presentación del comportamiento de la temperatura y humedad relativa en el día 26 de junio de 2014, para diferentes posiciones dentro de la cámara de producción como se describe en cuadro 2

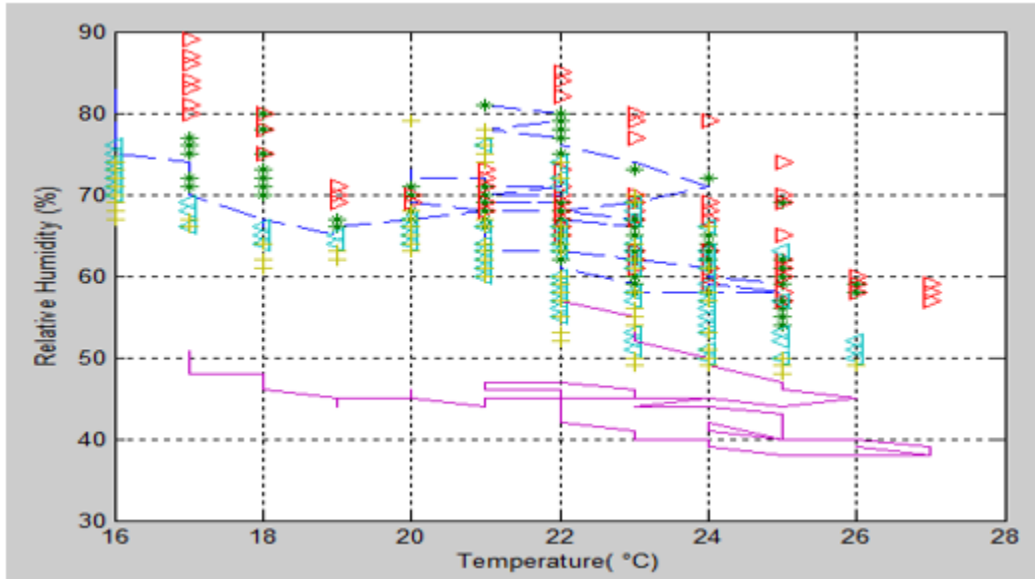
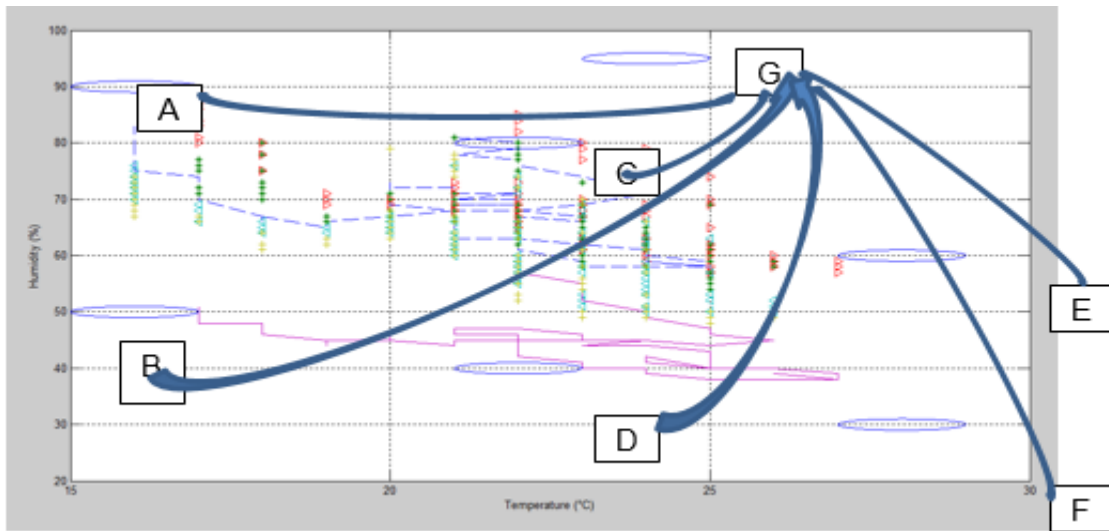


Figura 1.2 Presentación esquemáticas de las trayectorias de solución para seis diferentes condiciones diferentes para llegar a las condiciones óptimas de (24 oC, 95 %)



1.2 Discusión

Estos resultados muestran que no solo es indispensable conocer las variables psicrométricas de un lugar a través del tiempo con los cambios de día y noche, así como los estacionales, sino que viendo a mayor detalle también hemos encontrado que es importante hacer ajustes dentro de las instalaciones ya que existen condiciones diferentes y significativas que pueden servir para hacer arreglos topológicos adecuados que maximicen la producción de hongo seta.

1.3 Conclusiones

Basados en las diferencias espaciales significativas de las variables en estudio, entonces existe la necesidad de poner atención para colocar las bolsas de cultivo de setas y calcular las cantidades de calor y humedad apropiadas para llegar a las condiciones óptimas y llevar a cabo los procesos de homogenización atmosférica por medio de una ventilación para llegar a un buen mezclado en las condiciones ambientales ideales.

1.4 Referencias

Bartzanas, T., Kittas, C., Sapounas, A., et al. 2007. Analysis of airflow through experimental rural buildings: Sensitivity to turbulence models. *Biosystems Engineering*, 97, 229-239.

Chang, S.T. and W. A. Hayes. 1978. *The Biology and Cultivation of Edible Mushrooms*. Academic Press Inc., New York, New York. 819 pp.

Rinker, D. L. 1986. *Commercial Mushroom Production*. Ontario Ministry of Agriculture and Food. Parliament Building, Toronto, Ontario 32 pp.

Stamets, P. & J., S. Chilton. 1983. *The Mushroom Cultivator*. Agarikon Press, Olympia, Washington.

Vedder, P. J. C. 1978. *Modern Mushroom Growing*. Grower Books. 50 Doughty Street, London, England WCIN 2LP 420 pp.

Modelos empíricos que explican la dinámica de acumulación de materia seca de la maleza presente en frijol y de su rendimiento en clima templado

ESCALANTE-ESTRADA, José Alberto Salvador`, RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, María Teresa` y ESCALANTE-ESTRADA, Yolanda Isabel`

J. Escalante, M. Rodríguez y Y. Escalante

`Postgrado en Botánica. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de Méx., México.56230.

`Instituto de Investigación Científica, Área de Ciencias Naturales. Universidad Autónoma de Guerrero. Chilpancingo, Guerrero, México.
jasee@colpos.mx

D. Sepúlveda, R. Salazar, F. Pérez y J. Rocha (eds.) Ciencias Químicas y Matemáticas-©ECORFAN, Texcoco de Mora-México, 2015.

2 Introducción

Uno de los principales problemas que limitan la producción de frijol es la presencia de maleza. Cuando esta no se controla, ocurren altas reducciones en el rendimiento (RG) y calidad de los cultivos (Serrano et al., 2001; Escalante y Rodríguez, 2007) o cuando su manejo se realiza en forma tardía o deficiente (Bowen y Kratky, 1980), debido a que además de competir por espacio, agua, luz y nutrientes son hospederas de plagas e insectos vectores de enfermedades. Por lo general, se ha determinado que para evitar reducciones en el RG se requiere un período libre de maleza entre un tercio y un cuarto del su ciclo de desarrollo del cultivo (Kasasian y Seeyave, 1969). En frijol, se han encontrado reducciones entre 60 y 80 % en el RG con maleza durante todo el ciclo del cultivo (Woolley et al., 1993). Medrano et al. (1973) señalan que no remover la maleza durante el ciclo del frijol, reduce el rendimiento hasta el 69% y que el período crítico de competencia con la maleza está entre los primeros 20 a 40 días. Asimismo, señalan que la maleza que crece después de los 40 días solamente reducen el rendimiento en 19%. Mondragón et al. (2001) con siembras en Chapingo de los cultivares de frijol Negro Huasteco (hábito determinado Tipo I), Pedigri-341 y Negro San Luis (hábito indeterminado Tipo II y III, respectivamente) a la densidad de 33 plantas m⁻², con aplicación de dos riegos en las etapas iniciales de desarrollo del cultivo, encontraron que a los 44 dds del frijol, una densidad de maleza entre 329 y 411 plantas m⁻² y una producción de MS de 257 a 308 g m⁻². El RG del frijol osciló entre 877 y 1082 g m⁻². Dentro de las especies monocotiledóneas de maleza que se encontraron en el cultivo tenemos a *Eragrostis mexicana*, *Eleusine multiflora* y *Cyperus esculentus*, y dicotiledóneas como *Simsia amplexicaulis*, *Portulaca oleracea*, *Oxalis latifolia*, *Malva parviflora* y *Amaranthus hybridus*. Por otra parte, si se considera que la acumulación de MS en la maleza es a costa de la acumulada en el grano de *Phaseolus*, es de importancia conocer el grado de relación mediante modelos empíricos. El objetivo de este estudio fue determinar: a) el modelo que explica el rendimiento del ayocote y frijol y la producción de materia seca de maleza en función de la densidad de población de maleza; b) sí el tamaño del dosel del frijol influye sobre la densidad, acumulación de materia seca de la maleza, rendimiento del cultivo y el modelo que explique dicha respuesta

2.1 Materiales y métodos

La siembra de los cultivares indicados en el Cuadro 1, se realizó el 19 de junio de 2012, a la densidad de 4.16 plantas por m⁻², en surcos de 80 cm de separación bajo condiciones de lluvias estacionales en Montecillo, Méx. (19°29' N, 98° 45' O, 2 250 m de altitud, clima templado, García, 2004). El suelo fue de tipo Fluvisol arcilloso con pH de 8.0, una conductividad eléctrica (CE) media de 0.76 dS m⁻¹, fertilizado con 100-100-00 de N, P y K. Los cultivares de *Phaseolus* utilizados en el presente estudio así como sus características morfológicas y fenología se presentan en la tabla 2.

Tabla 2 Cultivares de Phaseolus utilizados en el presente estudio. Montecillo Méx

Cultivar	Abreviatura	Hábito de crecimiento	Tipo
Bayomex	BAYO	Determinado	I
Flor de Durazno	FDO	Determinado	I
Ojo de Venado*	OJVE	Indeterminado	II
Ayocote Morado *	AYOM	Indeterminado	II
Ayocote Blanco *	AYOB	Indeterminado	II
Ayocote Negro *	AYON	Indeterminado	II
Pinto Villa	PINVI	Indeterminado	III
Negro Qro.	NQRO	Indeterminado	III

El diseño experimental fue bloques al azar con cuatro repeticiones. Durante el ciclo del cultivo se registró el promedio decenal de la temperatura (°C) máxima (T_{máx}) y mínima (T_{mín}) y la suma decenal y estacional de la precipitación. En el frijol se evaluó la fenología (de acuerdo con el criterio señalado en Escalante y Kohashi (1993) y el rendimiento de grano (RG, MS, g). Se aplicó un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Tukey. El cultivo se mantuvo libre de maleza por los primeros 35 días. Después de este período se dejó desarrollar. A la MF del frijol, con un cuadrante de 50 * 50 cm por cada unidad experimental se evaluó el número de especies, la densidad y la producción de materia seca o biomasa (MS), de maleza, reportándose los datos por m². Se calculó el índice de cosecha de cultivo (ICC), mediante la ecuación $ICC = \left\{ \frac{MS \text{ acumulada en el grano del frijol}}{MS \text{ acumulada en el grano del frijol} + \text{Materia seca de la maleza}} \right\} * 100$. Mediante el paquete estadístico Excel, se buscaron los mejores modelos de ajuste para rendimiento de frijol y la materia seca producida por la maleza en función de la densidad de población de maleza.

2.2 Resultados y discusión

Tabla 2.1 Fenología, ancho del dosel a la floración, hábito y tipo de crecimiento de los cultivares de *Phaseolus* utilizados en el presente estudio. Montecillo, México

Cultivar	Abreviatura	Hábito de crecimiento	Tipo	Días a floración (R6)	Días a madurez fisiológica (R9)
Bayomex	BAYO	Determinado	I	45	100
Flor de Durazno	FDO	Determinado	I	46	102
Ojo de Venado*	OJVE	Indeterminado	II	50	100
Ayocote Morado *	AYOM	Indeterminado	II	52	110
Ayocote Blanco *	AYOB	Indeterminado	II	52	112
Ayocote Negro *	AYON	Indeterminado	II	54	112
Pinto Villa	PINVI	Indeterminado	III	45	98
Negro Gro.	NQRO	Indeterminado	III	55	105

Maleza

En el cultivo de frijol las especies de maleza que ocurrieron en orden de mayor densidad y acumulación de MS fueron: *Simsia amplexicaulis* (cav) Pers, *Chenopodium* spp, gramíneas (*Eragrostis mexicana* Hornem (Link), *Eleusine multiflora* Hochst. Ex A.Rich), *Amaranthus hybridus* L., *Oxalis latifolia* Kunt y *Cyperus esculentus* L. Así mismo, se observa que la especie, densidad y materia seca de la maleza (de la siguiente generación después de la eliminación realizada a los 31 dds de la siembra del cultivo), mostró cambios en función del cultivar de *Phaseolus* sembrado. En la siembra con ayocote (*Phaseolus coccineus* L.) se encontró la más baja densidad y materia seca de maleza (16 a 32 plantas m⁻²; y 216 a 301 g m⁻², respectivamente). El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) presentó la DP y acumulación de MS de maleza más alta que los cultivares de Ayocote (Tabla 2.1). BAYO presentó la mayor densidad y MS de maleza (76 plantas m⁻² y 588 g m⁻², respectivamente), seguido de NQRO, OJVE y PINVI el cual presentó el valor más bajo con 50 plantas m⁻² y 469 g m⁻², respectivamente (Tabla 2.1).

Tabla 2.2 Rendimiento (RG, gm⁻²), ancho del dosel de los cultivares de Phaseolus, materia seca (MS) y densidad de población (DP) de la maleza (g m⁻²), índice de cosecha del cultivo (ICC). Montecillo, México

Cultivar	Abreviatura	Hábito de crecimiento	Tipo	Ancho de dosel a floración (cm)	RG (gm ⁻²)	MS maleza (g m ⁻²)	DP MALEZA (plantas m ⁻²)	ICC (%)
Bayomex	BAYO	Determinado	I	30	20 d	550 a	76 a	4 c
Flor de Durazno	FDO	Determinado	I	40	80 c	489 b	60 b	14 c
Ojo de Venado*	OJVE	Indeterminado	II	40	70 c	419 c	40 d	14 c
Ayocote Morado *	AYOM	Indeterminado	II	60	159 a	288 d	27 e	46 a
Ayocote Blanco *	AYOB	Indeterminado	II	60	128 b	301 d	32 e	30 b
Ayocote Negro *	AYON	Indeterminado	II	60	169 a	216 e	16 f	44 a
Pinto Villa	PINVI	Indeterminado	III	30	40 d	469 b	50 c	8 c
Negro Qro.	NQRO	Indeterminado	III	30	50 d	498 a	66 b	9 c

Rendimiento de grano del ayocote y frijol

Bajo competencia con la maleza después de los 31 dds, *P.coccineus* L. presentó un RG más alto que *P.vulgaris* L. Así, el RG de AYON, AYOM y AYOB fue de 169,159 y 128 g m⁻², respectivamente (Cuadro 3), el cuál superó en 66% a *P.vulgaris* L. El RG más alto del frijol lo presentaron FDO y OJVE con 80 y 70 g m⁻², respectivamente; seguido de NQRO, PINVI y BAYO que presenta el RG más bajo con 20 g m⁻² (Tabla 2.2).

Modelos de la dinámica del rendimiento en grano y materia seca de la maleza en función de la densidad de población de maleza

En la Figura 1 que presenta la dinámica del RG y de la MS de la maleza en función de la DP de la maleza, se observa que el RG de Phaseolus disminuyó; mientras que la acumulación de MS se incrementó conforme su DP fue más alta. El modelo que explica ambas dinámicas fue del tipo logarítmico. Esto indica que un aumento en DP de maleza, conduce a una reducción en el RG del frijol en beneficio de una acumulación de MS más alta de la maleza, observando una relación lineal negativa entre ambas variables como se presenta en la Figura 2.1.

Figura 2 Dinámica de acumulación de materia seca en el grano de frijol (RG) y en la materia seca (MS) de la maleza que ocurre en el cultivo en función de la densidad de plantas (DP) de maleza. Montecillo, Edo. de México

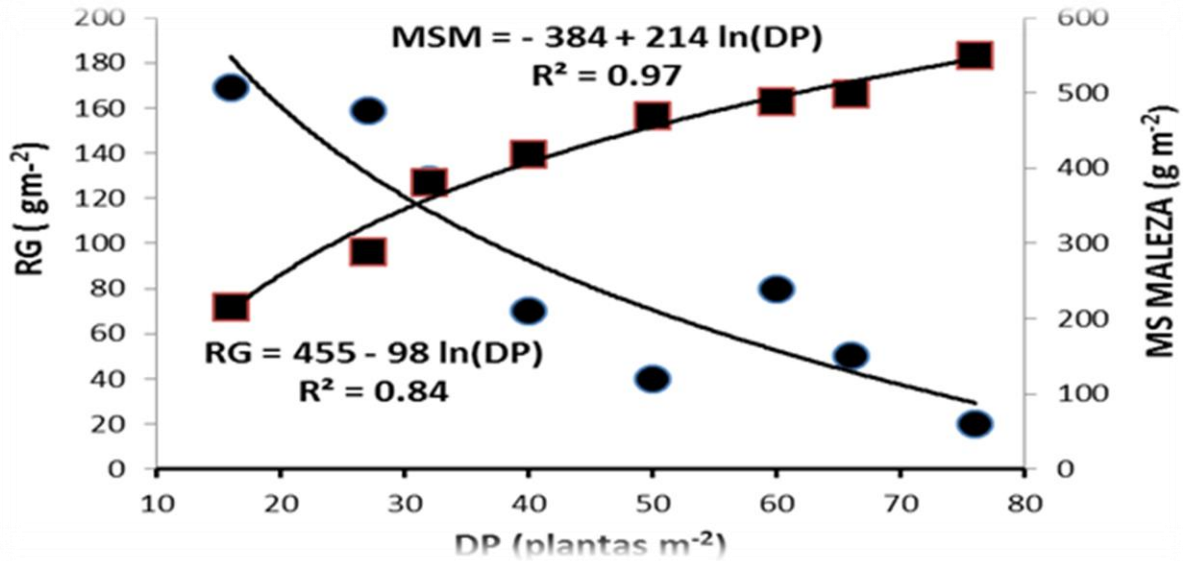
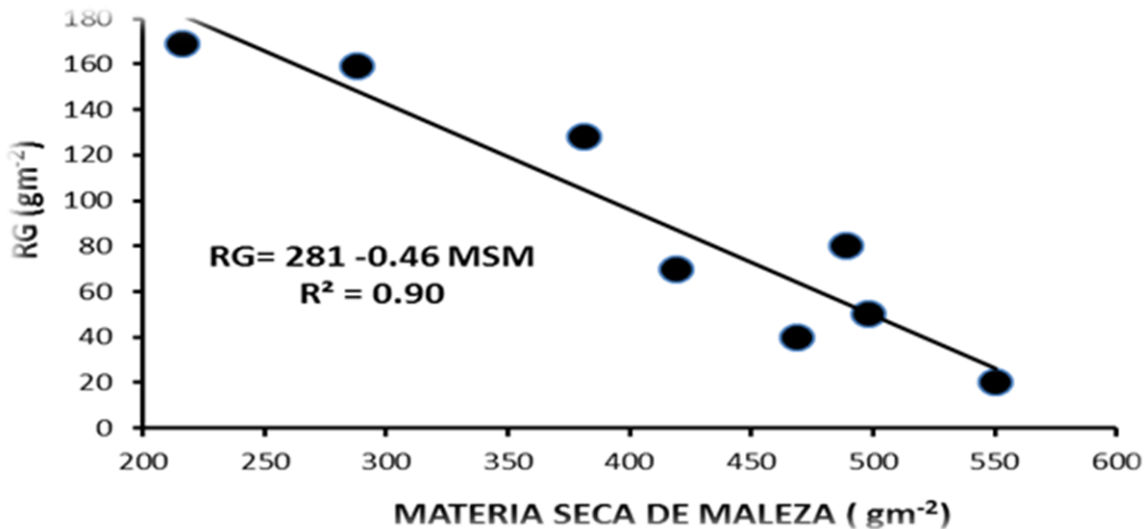


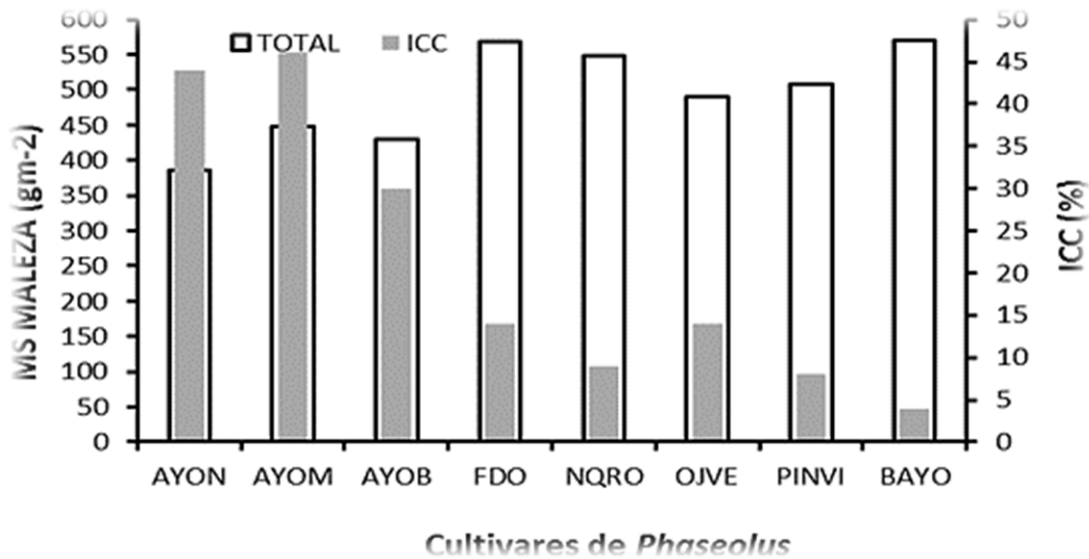
Figura 2.1 Relación materia seca acumulada en el grano del frijol y acumulada en la maleza que ocurre en el cultivo. Montecillo, Edo. de México



Índice de cosecha del cultivo (ICC)

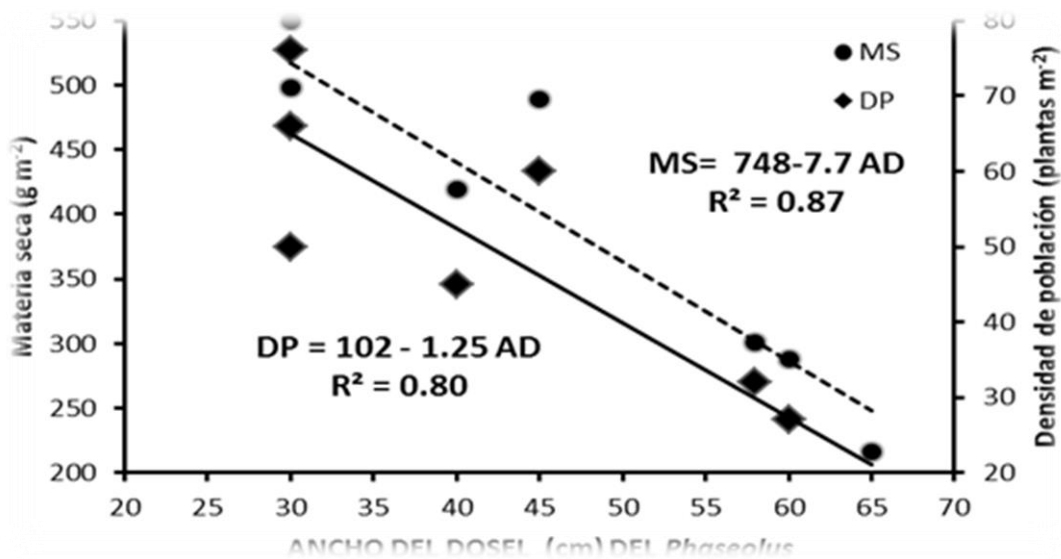
El índice de cosecha del cultivo (ICC), de *P. coccineus* L. fue más alto que en *P. vulgaris* L., lo que indica una mayor eficiencia en la acumulación de MS hacia el cultivo de interés agrícola con la siembra de ayocote, en relación a la siembra de frijol. Así, el ICC del Ayocote fue del orden de 30 a 46%; mientras que el frijol fue de 4 a 14%. En *P. coccineus* L., el ICC más alto se observó en AYON y AYOM; mientras que en frijol el ICC más alto correspondió a FDO y OJVE y el más bajo a BAYO (Tabla 2.2 y Figura 2.1).

Figura 2.2 Índice de cosecha del cultivo (ICC) en una parcela de frijol con maleza. Montecillo, Edo. de Méx. AYON= Ayocote negro, AYOM= Ayocote morado, AYOB = Ayocote blanco, FDO = Flor de durazno, NQRO = Negro Querétaro, OJVE = Ojo de Venado, PINVI = Pinto Villa, BAYO = Bayomex



Finalmente, la densidad de población, acumulación de materia seca en la maleza que ocurre a partir de los 35 días de la siembra del cultivo, y el rendimiento en grano del Ayocote y frijol, puede estar determinado por el tamaño del dosel vegetal como se indica en la Figura 2.3, en donde se observa una reducción en la densidad y acumulación de materia seca de la maleza, conforme el dosel del cultivo es de mayor tamaño. Dicha función responde a un modelo lineal con pendiente negativa.

Figura 2.3 Densidad de población (plantas m⁻², DP) y acumulación de materia seca (gm⁻²) de la maleza presente en función del tamaño del dosel (ancho en cm) del cultivo de Phaseolus. Montecillo, Edo. de México



2.3 Conclusiones

La acumulación de materia seca en el grano de *Phaseolus* y en la maleza como respuesta a la densidad de maleza sigue un patrón logarítmico. Bajo competencia con maleza, en relación a los cultivares de frijol, los de Ayocote presentan mayor rendimiento en grano. La densidad y acumulación de materia seca en la maleza presente en el cultivo de Ayocote es más baja que en frijol. La densidad y acumulación de materia seca en la maleza que se presenta a partir de los 35 días de la siembra del cultivo y el rendimiento en grano de *Phaseolus* están determinados por el tamaño del dosel vegetal.

2.4 Referencias

- Bowen J. E. y B. A. Kratky.(1980). Control de malezas en los trópicos. *Agricultura de las Américas* 29 (6):20.
- Escalante-Estrada J. A. and M. T. Rodríguez G. (2007). Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) yield reduction based on weed intensity competition. *Annual Report of the Bean Improvement Cooperative* 50:169-170.
- Escalante- Estrada J. A. y J. Kohashi-Shibata. (1993). El rendimiento y crecimiento del frijol. Manual para toma de datos. Colegio de Postgraduados. Montecillo. Mpio. De Texcoco Méx. 84 pág.
- García E. L. (2004). Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen 4a. Ed. UNAM. México, D.F. 217 p.
- Kasasian L. and J. Seeyave. (1969). Critical periods for weed competition. *PANS* 15:208-212.
- Medrano S. C., R. Avila L. y J.T. Villasmil. (1973). Determinación del período crítico de competencia de las malezas en frijol *Vigna unguiculata* (L) Walp. *Revista de la facultad de agronomía (LUZ)* 2 (3):7-13.
- Mondragón-Pedrero G., L M. Serrano C., J. Hernández J y G. Méndez V. (2001). Efecto de diferentes arreglos topológicos de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) sobre el rendimiento e incidencia de malezas. *Revista Mexicana de la ciencia de la maleza* 1 (1):19-23.
- Serrano C.L.M., G.Mondragón P. y R. Martínez M. (2001). Épocas de deshierbe en siete genotipos de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y su habilidad competitiva contra la maleza. *Revista Mexicana de la ciencia de la maleza* 1 (1):41-47.
- Woolley B.L., T. E. Michaels, M.R. Hall and C.J. Swanton. (1993). The critical period of weed control in white bean (*Phaseolus vulgaris*). *Weed Sci.*41:180-184.

Risk salinity and sodicity from the cutuchi hidrographic system basin high from amazon, Ecuador

CARRERA-VILLACRÉS, David Vinicio[`], MAYORGA-LLERENA, Eduardo Patricio^{``} y MAYA-CARRILLO, Azucena Maribel^{```}

D. Carrera, E. Mayorga y A. Maya

[`]Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Sangolquí, Ecuador.

^{``}Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Químicas. Quito, Ecuador.

^{```}Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. Departamento de Ciencias Económicas y Administrativas, Sangolquí, Ecuador.

dvcarrera@espe.edu.ec

D. Sepúlveda, R. Salazar, F. Pérez y J. Rocha (eds.) Ciencias Químicas y Matemáticas-©ECORFAN, Texcoco de Mora-México, 2015.

3 Introducción

El 80% del agua limpia se convierte en agua residual y su mal uso en la producción agropecuaria determina el deterioro de las condiciones de vida de la población rural, la misma que consume aproximadamente el 65% del recurso disponible (Cisneros et al., 2001); en la zona centro del Ecuador alrededor del 95,67% de las aguas provenientes de las Cuencas hidrográficas son caudales concesionados que se usan para riego (Ecuador Latacunga, 2011). La cuenca del Cutuchi provee agua para regadío en especial al canal de riego Latacunga Salcedo Ambato (LSA) que cubre una extensión aproximada de 24.000 ha y escurren en la cuenca aproximadamente 1000 Mm³ anuales (Gutierrez, 2013). La salinización y sodificación de los suelos esta en relación al uso de las aguas residuales para la agricultura y de las malas prácticas de riego, por consiguiente, el objetivo de éste trabajo fue analizar los siguientes parámetros físico-químicos para interpretar la salinidad y sodicidad de las aguas: concentración de iones hidrogeno (pH), Conductividad Eléctrica (CE), Carbonatos (CO₃²⁻), Bicarbonatos (HCO₃⁻), Cloruros (Cl⁻), Sulfatos (SO₄²⁻), Sodio (Na⁺), Potasio (K⁺), Calcio (Ca²⁺) y Magnesio (Mg²⁺), sales totales disueltas (STD) y fundamentalmente los índices: PSI, PSE, PSP, RAS y RASaj.

3.1 Aspectos teóricos

Relación de Adsorción de Sodio (RAS).

La valoración del riesgo de salinización de los suelos se realiza en base a parámetros que se determinan en el agua de regadío porque el extracto de saturación del suelo se encuentra en equilibrio con el agua de riego, así, se puede interpretar lo que sucede en el suelo a través de medir la concentración en el agua (Tabla 3).

Tabla 3 Clasificación de las aguas en base al RAS

Clasificación	Tipo	RAS	Observaciones
S1	Aguas bajas en Sodio	<10	Poca probabilidad de PSI
S2	Aguas medias en Sodio	10 a 18	Presenta problemas si no hay lavado
S3	Aguas altas en Sodio	18 a 26	Necesita prácticas especiales de manejo
S4	Aguas muy altas en Sodio	>26	Inadecuada, excepto cuando es su salinidad baja

Fuente: (Richards, 1954).

Los valores asignados al RAS en esta clasificación son referenciales, inicialmente se estableció en base a la relación del sodio con el calcio, sin embargo, dentro de la relación de los iones sodio, calcio y magnesio su efecto no varía proporcionalmente (Olías et al., 2005). El magnesio presenta un comportamiento similar desde el punto de vista de neutralización de cargas negativas en el intercambio catiónico que sucede en el suelo, por lo que se modificó la relación (1), (Richards, 1954 y Can et al., 2011).

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

(1)

El RAS como relación original es muy variable ya que no siempre está el calcio disponible y varía por procesos de precipitación, por lo que el índice se ajusta al RASaj definido en la relación (2) (Carrera, 2007):

$$RAS_{aj} = RAS_{orig} [1 + (8,4 - pHc)] \quad (2)$$

El pHc es el pH teórico en equilibrio con la calcita CaCO₃ y se calcula en base a (3):

$$pHc = (pK_2 - pK_{ps}) + p(Ca^{2+} + Mg^{2+}) + p(CO_3^{2-} + HCO_3^-) \quad (3)$$

PK₂-pK_{ps} Constituye el logaritmo negativo de la segunda constante de disociación del H₂CO₃ y la constante de solubilidad del CaCO₃ respectivamente, las dos se encuentran corregidas por la fuerza iónica.

p(Ca²⁺ + Mg²⁺) es el logaritmo negativo de la concentración molar del Ca²⁺

p(CO₃²⁻ + HCO₃⁻) es el logaritmo negativo de la concentración equivalente de las bases CO₃²⁻ y HCO₃⁻.

Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI)

El exceso de sodio en el suelo se define como PSI, porcentaje de Sodio intercambiable, definido por Eaton (1950) citado en (Richards, 1954), se calcula de acuerdo a la ecuación empírica (5), la misma que está en función del RAS

$$PSI = \frac{100(-0,0126 + 0,01475RAS)}{1 + (-0,0126 + 0,01475RAS)} \quad (4)$$

Si se toma en consideración que el CaCO₃ precipita, el PSI se expresa en la siguiente relación:

$$PSI = 2 RAS [1 + (8,4 - pHc)] \quad (5)$$

Donde:

RAS es la relación de adsorción de Sodio y

pHc es el pH teórico en equilibrio con la calcita CaCO₃. (Ayers y Westcot, 1987). Un contenido elevado de sodio respecto a los demás cationes del complejo de intercambio del suelo puede generar una dispersión de las partículas arcillosas y de la materia orgánica, con la consecuente formación de un fondo impermeable. El valor crítico se define como 15% (Porta et al., 2003).

Presión Osmótica

Según Richards (1954) existe una estrecha relación entre la concentración de sales, la presión osmótica y la conductividad eléctrica, de acuerdo al autor, se puede inferir el tipo de sal predominante a través de determinar la pendiente de diferentes relaciones funcionales. Las aguas del canal LSA se acercaron más a la relación concentración de sales vs CE de tipo de NaHCO₃ y/o MgSO₄.

La presión osmótica se puede determinar por métodos directos con el equipo definido como osmómetro. Otro método es por cálculos a partir de la concentración de solutos, en el presente caso se realiza los cálculos en base a la ecuación siguiente (6):

$$\pi = CRT$$

(6)

Donde:

$R = 0,082 \text{ atm l mol}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$

$T = 298,15^{\circ}\text{K}$

C= Concentración de iones (molar)

Esta relación es factible ya que a bajas concentraciones, las soluciones de partículas se comportan termodinámicamente como gases ideales por lo que son dependientes de la temperatura.

Efecto de la concentración de iones CO_3^{2-} y HCO_3^-

La concentración de los iones CO_3^{2-} y HCO_3^- en las aguas de riego están en estrecha relación con las concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} y su importancia se establece en la interacción de estos cuatro iones puede generar la precipitación como carbonatos alcalino-térreos, por lo que existe la posibilidad de incremento del PSI; existen tres indicadores que referencian a la interacción de estos cuatro iones.

El problema de la erosión del suelo es fundamental e identificar el efecto que causarían las aguas residuales, por la presencia de sodio, en la reducción de la conductividad hidráulica generando compactación y fractura resulta primordial desde el punto de vista ambiental (Pérez-León, 2011).

Desde el punto de vista agrícola, el uso de agua residual con concentraciones de Na^+ porcentualmente altos afecta la producción y calidad de los cultivos. No existen límites específicos de la concentración de sodio en el suelo ni tampoco de la concentración en agua, pues dependerá de múltiples factores, como frecuencia de riego, evapo-transportación, tipo de cultivo, sensibilidad de la planta, CE, etc. El índice PSP constituyó uno de los primeros parámetros de referencia del riesgo de alteración de los suelos por el uso de aguas residuales. Aguilera y Martínez (1996) especifica que valores de PSP sobre 50% o más representa un peligro de desplazamiento del $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ por el Na^+ .

La posibilidad de infiltración es igualmente un riesgo latente (Balmaseda, C. y García, Y., 2013)); sin embargo, este proceso se inicia cuando la concentración de sodio en solución representa más del 50 % de los cationes disueltos, de acuerdo a Rodríguez et al., (2008) se confirma que el proceso de sodificación es mayor cuando la concentración de Na^+ sobrepasa los 10 meq l-1. Según Salgado-García et al. (2006) el PSP debe referirse a la salinidad efectiva (SE), por lo que se calcula mediante la fórmula (7):

$$\text{PSP} = (\text{Na}^+/\text{SE}) 100.$$

(7)

3.2 Objetivo

El objetivo de este trabajo fue determinar el potencial riesgo de salinidad y sodicidad de las aguas durante los períodos de lluvia (enero-marzo, fase I) y estiaje (Julio-agosto, fase II) del 2013.

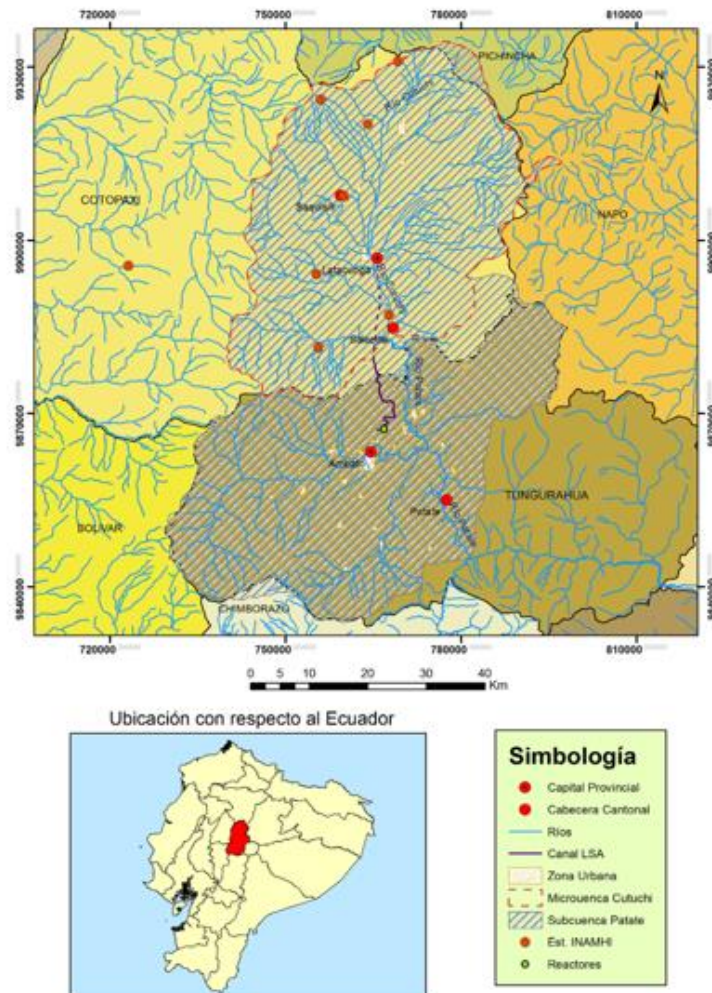
3.3 Materiales y métodos

Zona de Estudio: El estudio se realizó en el Ecuador, en la Figura 3 se presenta la cuenca del Cutuchi, su ubicación geográfica y las estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI).

Investigación de campo: Para comprender la influencia la actividad iónica de las aguas de la cuenca del Cutuchi en la sodicidad y salinización de los suelos que lo utilizan, se desarrolló el estudio en la bocatoma del canal de riego LSA. La investigación se efectuó en dos fases, la primera fue entre los meses de enero y marzo del 2013 en época de lluvia y la segunda entre los meses de julio y agosto del 2013 en época de estiaje.

Parámetros analizados: Se determinaron en cada muestra de agua: pH, conductividad eléctrica (CE), temperatura, cationes (calcio, magnesio, sodio y potasio) y aniones (carbonatos, bicarbonatos, cloruros y sulfatos), temperatura, STD, de acuerdo a los métodos APHA/AWWA/WEF Standard Methods N° 5220, métodos 4500-H+B, 2510 B, 3500 Ca D, 3500 Na K D, 2320 B, 4500 Ci B, 4500-SO4 B, 2540 D y 2540 E, 1995).

Figura 3 Cuenca Hidrográfica del río Cutuchi y ubicación geográfica



3.4 Discusión y resultados

La composición promedio de los parámetros analizados del agua de la cuenca del Cutuchi en la bocatoma del canal LSA se presenta en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Parámetros Físicos del agua de la cuenca del Cutuchi en la toma del canal LSA

Parámetro	n	Valores mínimos y máximos
pH	24	7,4 - 8,7
Temperatura (°C)	24	13,6-20,5

En la tabla 3.2 se resumen los valores de RASorig y RASaj de las aguas de la cuenca del Cutuchi en la bocatoma del canal LSA.

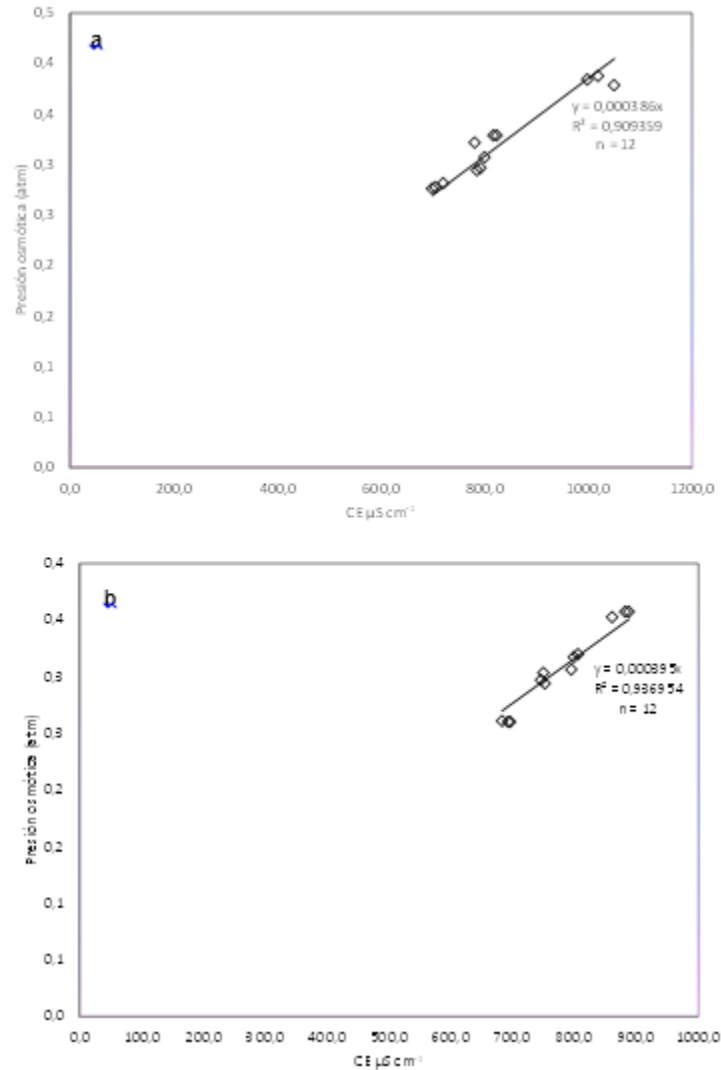
Tabla 3.2 Clasificación de las aguas de la cuenca del Cutuchi en la bocatoma del canal LSA de acuerdo a RASorig y RASaj

No. muestra	FASE I					FASE II				
	suma de cationes meq/L	RAS _{orig}	Clase	RAS _{aj}	Clase*	suma de cationes meq/L	RAS _{orig}	Clase	RAS _{aj}	Clase*
1	10,29	1,52	S1	4,3	S1	8,40	1,4	S1	3,9	S1
2	9,96	1,68	S1	4,7	S1	8,40	1,4	S1	4	S1
3	9,73	1,92	S1	5,4	S1	8,50	1,3	S1	3,7	S1
4	7,60	1,16	S1	3,2	S1	8,30	1,4	S1	3,8	S1
5	7,68	1,02	S1	2,9	S1	8,40	1,3	S1	3,7	S1
6	8,11	1,24	S1	3,5	S1	8,10	1,3	S1	3,6	S1
7	8,23	2,02	S1	5,7	S1	7,70	1,2	S1	3,2	S1
8	7,92	2,01	S1	5,6	S1	7,80	1,3	S1	3,7	S1
9	8,30	2,24	S1	6,3	S1	7,70	1,3	S1	3,8	S1
10	6,93	1,84	S1	5,2	S1	8,40	1,4	S1	4	S1
11	7,07	1,8	S1	5	S1	8,30	1,4	S1	3,9	S1
12	7,10	1,64	S1	4,6	S1	8,50	1,4	S1	3,8	S1
13	7,43	1,63	S1	4,6	S1	8,00	1	S1	2,8	S1
14	7,60	1,57	S1	4,4	S1	7,90	1	S1	2,8	S1
15	7,45	1,21	S1	4,4	S1	7,70	0,9	S1	2,58	S1
16	6,63	1,18	S1	3,4	S1	7,70	1	S1	2,7	S1
17	6,72	1,18	S1	3,3	S1	8,70	1,5	S1	4,1	S1
18	6,78	2,17	S1	3,3	S1	7,90	1,3	S1	3,5	S1
19	9,05	2,06	S1	6,1	S1	8,70	1,5	S1	4,3	S1
20	8,91	2,17	S1	5,8	S1	8,50	1,9	S1	5,4	S1
21	9,09	1,85	S1	6,1	S1	8,40	1,4	S1	3,8	S1
22	7,87	1,96	S1	5,2	S1	8,60	1,4	S1	4	S1
23	8,10	1,96	S1	5,5	S1	8,80	1,3	S1	3,5	S1
24	8,09	1,96	S1	5,5	S1	9,00	1,8	S1	4,9	S1

* Según Richards (1954)

Los promedios de PO de las fases I y II corresponden a 0,000386 y 0,000395 atm respectivamente, según (Richards, 1954) la relación entre la PO en atmosferas y la CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$ es útil para algunos propósitos en agricultura, pues pendientes de 0,00036 son apropiadas para el crecimiento de la planta. En la Figura 3.1 se indica la relación funcional de la PO vs la CE de las aguas de la cuenca hidrográfica del Cutuchi en sus dos fases, los valores obtenidos se acerca a 0.00036, los mismos que se consideran correctos ya que el presente análisis se fundamenta en los iones analizados.

Figura 3.1 Relación de la Presión osmótica y la Conductividad eléctrica de las aguas de la cuenca del Cutuchi (a) fase I y (b) fase II



El valor del PSI de las aguas de la cuenca del Cutuchi correspondió a 1,23 y 0,71 para las fases I y II respectivamente, valores que se encuentran muy por debajo del referente de PSI como igual o mayor a 15. Carrera et al. (2011) establece gráficas de soluciones de sales por separado para poder inferir el comportamiento de la solución del suelo en saturación, así, las aguas cuenca del Cutuchi presentaron un comportamiento cercano a las condiciones de una solución de NaCl. El promedio de la composición iónica de las aguas de la cuenca del Cutuchi se describe en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Promedio de la composición iónica de las aguas de regadío del canal de riego LSA.

Cationes					Suma Cationes					Suma Aniones
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	\sum meq L ⁻¹	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	\sum meq L ⁻¹
Promedio FASE I	2,8	2,4	2,7	0,20	8,0	0,1	6,5	0,8	0,6	8,0
Promedio FASE II	1,2	4,7	2,3	0,2	8,42	0,14	7,03	0,8	0,7	8,7

Efecto de carbonatos bicarbonatos

En la tabla 3.4 se resume los valores de PSE, PSP y CSR.

Tabla 3.4 Efecto de la concentración de iones CO₃²⁻ y HCO₃⁻ (Aceves, 2011)

Indice	Porcentaje de sodio encontrado (PSE)	Porcentaje de sodio posible (PSP)	Carbonato de sodio residual (CSR), meq L ⁻¹
Valores normales	<50%	<50%	<1,25
Agua canal LSA fase I	34,2%	96,5	buena para riego 1,4
Agua canal LSA fase II	28%	92	1,27

Cuando la concentración de sodio representa el 50% de la concentración de cationes, es decir PSE >50%, existe la posibilidad de desplazamiento del Ca²⁺ y Mg²⁺ como sales de CO₃²⁻ o SO₄²⁻, lo que permitirá el incremento de la concentración de Na⁺. Las aguas del canal LSA presentan valores de PSE de 34,2 % y 28% para las fases I y II respectivamente, se puede colegir que existe probabilidad de convertir los suelos que irriga en suelos sódicos. Si se toma en consideración las propiedades físicas del suelo, Las aguas de la cuenca del Cutuchi reportan PSP de 96,5% y 92%; valores que deberían considerarse de alto riesgo y condicionadas su uso en agricultura.

3.5 Conclusiones

De acuerdo a la CE las aguas de la cuenca del Cutuchi generan el efecto de salinidad de los suelos que irrigan, criterio que se confirma con el índice de CSR con valores mayores a 1,25 meq L⁻¹; según los índices: RASorig y RASaj las aguas de la cuenca del Cutuchi se encuentran dentro del rango de clasificación S1 por lo que resultan ser de baja peligrosidad de generar sodicidad; los valores de PO fueron de 0,32 y 0,34 atm y el índice PSI correspondió a 1,23 y 0,71 para las fases I y II respectivamente, valores que se encuentran por debajo del referente de PSI como igual o mayor a 15, el índice PSE fue de 34,2 % y 28% para las fases I y II respectivamente. Las aguas de la cuenca del Cutuchi reportaron PSP de 96,5% y 92%. De acuerdo a PSI y RASaj presentan bajo riesgo de sodicidad y finalmente de acuerdo a los índices de PSP y PSE deberían considerarse de potencial riesgo de convertir los suelos que irriga en sódicos.

3.6 Referencias

- Aceves N., E. 2011. El ensalitramiento de los suelos bajo riego. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Estado de México, México.
- Aguilera, C. y Martínez, E. (1996). Relaciones Agua Suelo Planta Atmosfera. . Mexico: Patronato de la Universidad Autónoma Chapingo.
- Ayers, R. S. y D. W. Westcot. (1987). La calidad del agua y su uso en la agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje 29 Rev. 1. Trad. Al español por J.F. Alfaro de: Water quality and use in agriculture. APHA/AWWA/WEF.1995. Standard Methods N° 2550 B, N° 4500-H+ B, N° 2510, N° 2540, N° 2540, N° 2540, N° 2340, N° 2320 B, 3.500 Na+ y K+,D, 4.500 C-IB 1995, Azometina-H. (1995). N° 5220, N° 4500 E
- Balmaseda, C. y García, Y. (2013). Calidad de las aguas para riego de la cuenca del río Naranjo, Municipio majibacoa. Cultivos tropicales, Vol. 34(4) , 68-73.
- Can, C. A., Ramírez, A.C., Ortega, E. M., Trejo, L.C., Cruz, D. J. . (2011). Evaluación de la relación de adsorción de sodio en las aguas del río Tulancingo, Estado de Hidalgo, Mexico. Terra Latinoamericana, 26 (3), , 243-252.
- Carrera. D. (2007). Calidad de las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, México. Colegio de Postgraduados. (Tesis de Maestría en Ciencias). México
- Carrera-Villacrés. D. Ortega-Escobar, H., Ramírez-García, J., Ramírez-Ayala, C., Trejo-López, C., Becerril-Román, A. (2011). Boro, Fosfatos e índices de Salinidad del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac. Tecnología y Ciencias del Agua, vol.II, num.2, abril-junio de 2011, , 5-21.
- Cisneros, O., González, J., y Fuente, C. (2001). Perspectiva de aprovechamiento de las aguas residuales en la Agricultura. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua IMTA. México: IMTA, Comisión Nacional del Agua.
- Ecuador Latacunga. (2011). Diagnóstico Estratégico cantonal. Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Latacunga. Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial; bienestar y desarrollo para el buen vivir. Capítulo I. Situación Ambiental. Latacunga: Gobierno Autónomo Descentralizado.
- Gutierrez, C. (2010). La contaminación del río Cutuchi. UTPL. Centro Universitario Latacunga. Postgrado en Derecho Ambiental. Loja. Ecuador
- Olías, M., Cerón, J. y Fernández, I. (2005). Sobre la utilización de la clasificación de las aguas de riego del U.S. Laboratory Salinity (USLS). Geogaceta 37 (2005), 111-113
- Pérez-León, J. M. (2011). Manual para determinar la calidad del agua para riego agrícola. Trabajo de experiencia recepcional. México: Xalapa.
- Porta, C. J., M. López y C. Ronquero. (2003). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. México: Mundi-Prensa. p. 959.

Richards, L. (1954). Diagnóstico y rehabilitación de Suelos salinos y sódicos. Manual de Agricultura. Washington: Dpto de Agricultura de los Estados Unidos de América No.60.

Rodríguez, M.; D'Urso, C.; Rodríguez, G.; Sales, A. . (2008). Evaluación de la calidad de aguas para riego de la cuenca del río Calera. Ciencia, Vol. 3(7)dic. , 15-30.

Salgado-García, S., Palma, D., Lagunes, L., Castrelán, N., (2006). Manual para muestreo de suelos, Plantas y aguas e interpretación de análisis. Colegio de Posgraduados, Campus Tabasco ISPROTAB. 2da Ed. México

Processes controlling water chemistry and eutrophication in the basin of Río Grande, Chone, Ecuador

CARRERA-VILLACRÉS, David[`], GUEVARA-GARCÍA, Paulina^{``}, GUALICHICOMIN-JUIÑA, Grace^{```} y MAYA-CARRILLO, Azucena Maribel^{````}

D. Carrera, P. Guevara, G. Gualichicomín y A. Maya

[`]Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Sangolquí-Ecuador

^{``}Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Sangolquí-Ecuador

^{```}Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Sangolquí-Ecuador

^{````}Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Sangolquí-Ecuador
dvcarrera@espe.edu

D. Sepúlveda, R. Salazar, F. Pérez y J. Rocha (eds.) Ciencias Químicas y Matemáticas-©ECORFAN, Texcoco de Mora-México, 2015.

4 Introducción

La provincia de Manabí, al oeste del Ecuador, cada año sufre la falta de agua para satisfacer la demanda de los habitantes y de las zonas de producción durante el periodo de estiaje; de manera contradictoria en época de lluvias el exceso de precipitaciones ocasiona pérdidas en éstos mismos sectores. Para satisfacer la demanda de agua y evitar que la ciudad de Chone se inunde, el Estado ecuatoriano, con una inversión de 66 millones de dólares, ejecuta el Proyecto Propósito Múltiple Chone (PPMCH) que tiene como objetivos la construcción de la presa de río Grande y la construcción de un sistema de riego para abastecer una demanda de aproximadamente 7000 ha. Las condiciones climáticas de la región la definen como una zona de características extremas, con precipitaciones anuales superiores a los 3500 mm (año 1998, fenómeno del Niño); y menores a los 500 mm. La temperatura media es de aproximadamente 25° C y la humedad relativa está en el orden del 85% (INHAMI, 2008) (SENAGUA, 2012). Por las marcadas diferencias en las precipitaciones resulta importante conocer y comprender los procesos químicos que ocurren en el agua, así como el fenómeno de eutrofización que tienden a generar las presas de éste tipo.

4.1 Objetivo

El objetivo de éste trabajo fue determinar los procesos que controlan la química del agua a través de la concentración inorgánica y el régimen pluviométrico de la cuenca de río-Grande, además, se pretendió estimar la aceleración de los procesos de eutrofización que generaría la presa.

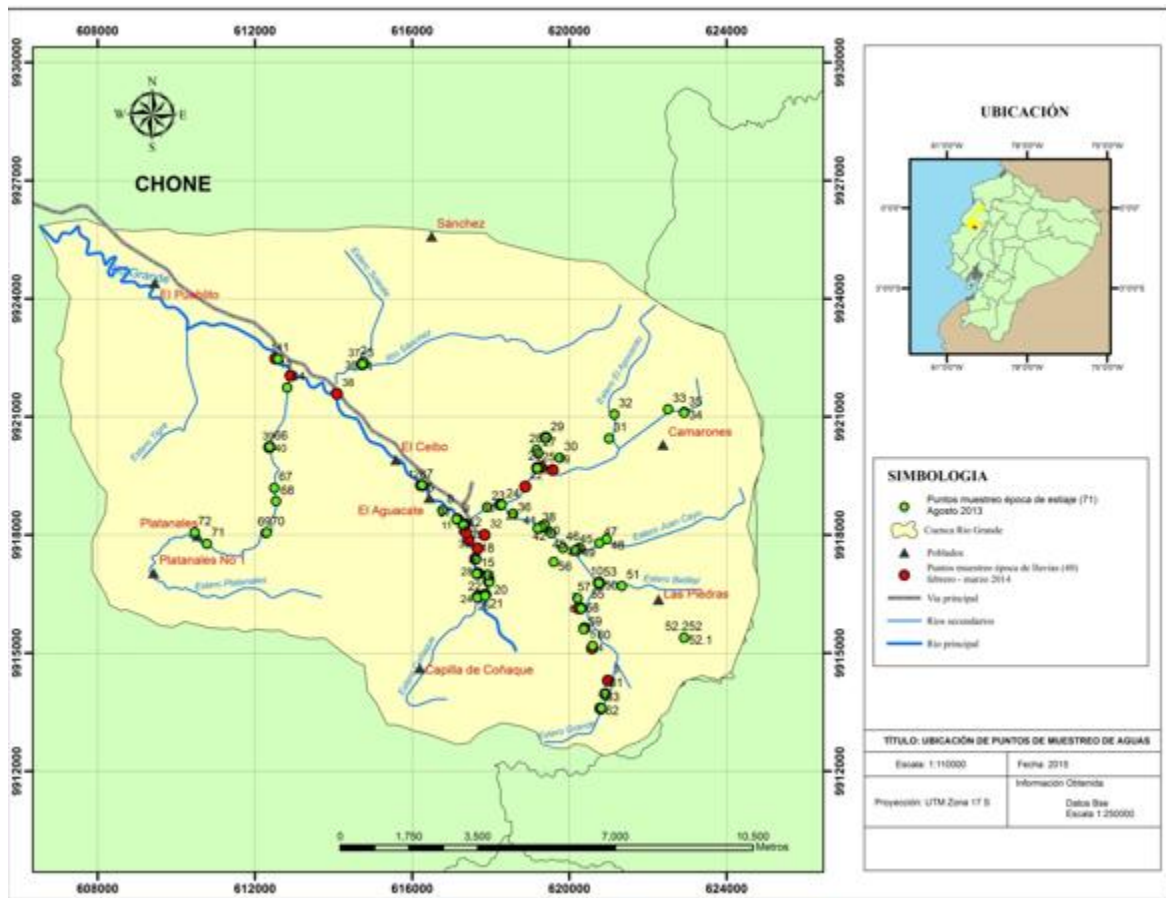
4.2 Materiales y métodos

Para desarrollar el presente trabajo se realizó dos muestreos, el primero en época de estiaje y el otro en época de lluvias, tomando 71 y 40 muestras de agua respectivamente en toda la cuenca del río Grande. En la Figura 4 se indica los puntos de muestreo de aguas.

En primera instancia, mediante datos obtenidos de la estación M162 del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI) se determinó las variaciones anuales y mensuales de precipitación durante un período de 46 años, datos que fueron completados y validados anticipadamente de acuerdo a lo que propone Monsalve (2009).

La metodología de muestreo fue en toda la cuenca hidrográfica de río Grande, tanto el afluente principal como los secundarios que son: Guayacán, Juan Cayo, la Balsa, Coñaque, Sánchez y Platanales.

Figura 4 Ubicación de los puntos de agua muestreados en época de estiaje y de lluvias



Los parámetros medidos en las muestras de agua de los diferentes sistemas hidrográficos que integran la cuenca de río Grande con la metodología de análisis se indican en la tabla 4.

Tabla 4 Determinaciones para las aguas

Determinación	Método	Referencia
1. pH	Potenciómetro marca Beckman	NOM-AA-008-SCFI-2000
2. Conductividad eléctrica.	Conductímetro puente de Wheatstone con celdas de vidrio de rango 1-5	NOM-AA-93-1984
3. Sodio y potasio.	Absorción atómica	APHA, 1995.
4. Calcio más magnesio	Volumétrico titulación con EDTA (Merck, Titristol, Art. 9992)	APHA, 1995
5. Carbonatos	Volumétrico titulación con ácido sulfúrico (Merck, Titristol Art. 9984)	APHA, 1995
6. Bicarbonatos	Volumétricos titulación con ácido sulfúrico (Merck, Titristol Art. 9984) 0.01N	APHA, 1995
7. Cloruros	Mohr. Titulación con nitrato de plata (Merck, Nitrato de Plata en solución, Art. OC248386)0.01 N. Indicador cromato de potasio al 5%	APHA, 1995
8. Sulfatos	Turbidimetría	APHA, 1995
9. Fosfatos	Espectrofotómetro Marca Hach.	APHA, 1995

Con los resultados obtenidos se elaboraron curvas de distribución de los diferentes aniones y cationes de acuerdo al sistema hidrográfico, la altitud y los diferentes períodos, para observar cuál es la distribución de la concentración inorgánica de las aguas. Además, para comprender las variaciones producidas por las marcadas condiciones climáticas se empleó la curva que controla los procesos químicos del agua superficial propuesta por Gibbs (1970).

Los procesos de aceleramiento de la eutrofización que generaría la construcción de la represa fueron evaluados de acuerdo a los límites que propusieron Sharpley y Withers (1994).

4.3 Discusión y resultados

Precipitación

Antes de determinar las variaciones mensual y anual de las precipitaciones los datos de la estación M162 de Chone fueron completados y verificados estadísticamente, para ello se utilizó también la estación M005 de Portoviejo. La variación en la precipitación mensual y anual de la estación M162 se observa en las Figuras 4.1 y 4.2.

De acuerdo a la figura 4.1 se observó que los valores de precipitación más altos están en los meses de enero, febrero y marzo, éste periodo de tiempo en el Ecuador se lo conoce como invierno.

La figura 4.3 demuestra que las precipitaciones más altas están en los años 1972, 1983, 1998 y 1999 precisamente cuando ocurrió el fenómeno del Niño, en cuanto a las precipitaciones mínimas se puede concluir que en todos los años hubo una sequía marcada. En los últimos 12 años, entre 1997 y 1998 fueron las precipitaciones medias más altas. El resto de años presentaron precipitaciones medias relativamente constantes.

Figura 4.1 Variación mensual de la precipitación en una serie de 46 años (estación M162)

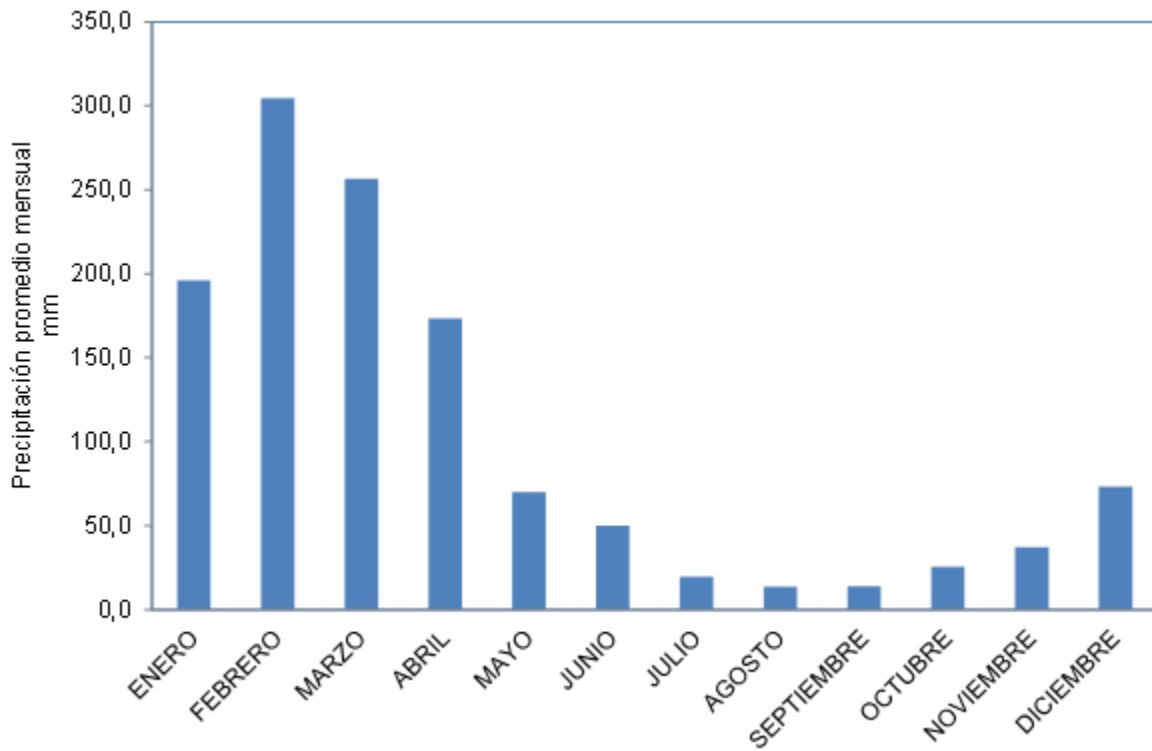
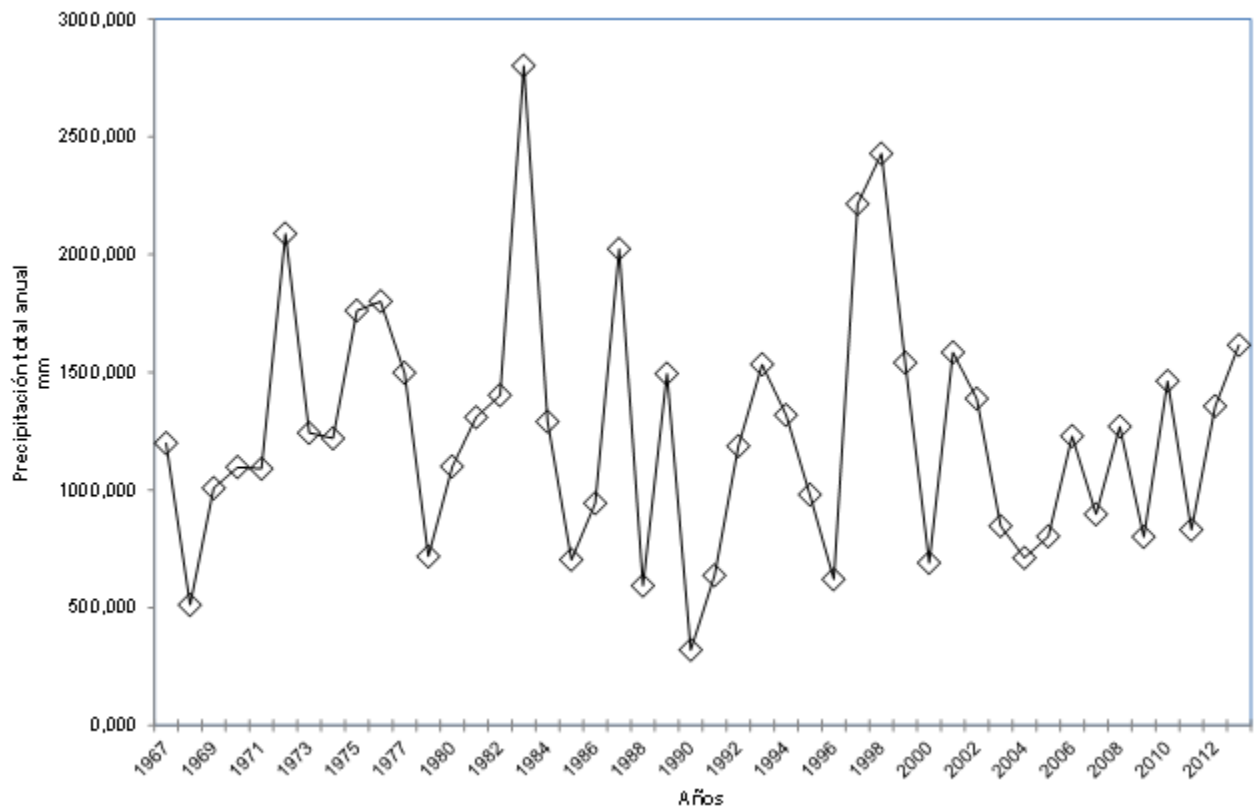


Figura 4.2 Variación anual de la precipitación, estación M162

La cuenca hidrográfica del río Grande, donde se construye el PPMCH tiene un comportamiento hidrológico variado, desde precipitaciones que superan los 2500mm que aguas abajo generan inundaciones y pérdidas económicas, hasta precipitaciones con valores inferiores a los 500mm ocasionando pérdidas en los campos de cultivo por falta de agua para riego.

Distribución de aniones y cationes

En los resultados de las muestras de estiaje y de lluvia se determinó una alta concentración de bicarbonatos en el afluente principal y los afluentes secundarios a excepción de cuatro puntos donde el elemento predominante fue el calcio.

Para justificar el contenido de bicarbonatos en las muestras de estiaje, es importante mencionar que los carbonatos y bicarbonatos presentes en cuerpos naturales de agua dulce se originan generalmente del desgaste y disolución de rocas en la cuenca que contienen carbonatos tales como la piedra caliza, definida por la geología de la zona (Carta Geológica de Chone MIII-F2 3591-I, 1979). A pesar de que la piedra caliza no es muy soluble en agua pura, su disolución es promovida por la presencia de CO₂ disuelto en el agua (CO₂ atmosférico o CO₂ generado en sedimentos ricos en materia orgánica (Fuentes y Masoll, 2002). En cuanto a la superioridad del calcio en ciertas zonas, esto indica que los minerales predominantes son los feldespatos, además la geología del lugar describe que la zona de estudio posee restos fósiles, los que tienen como componente principal al calcio.

En las Figuras 4.3 y 4.4 se presentan la distribución de aniones y cationes en los diferentes sistemas hidrográficos que conforman la cuenca del río Grande para la época de estiaje y de lluvias.

Figura 4.3 Distribución de iones del muestreo de aguas (estiaje) de la cuenca en donde se construye el PPMCH

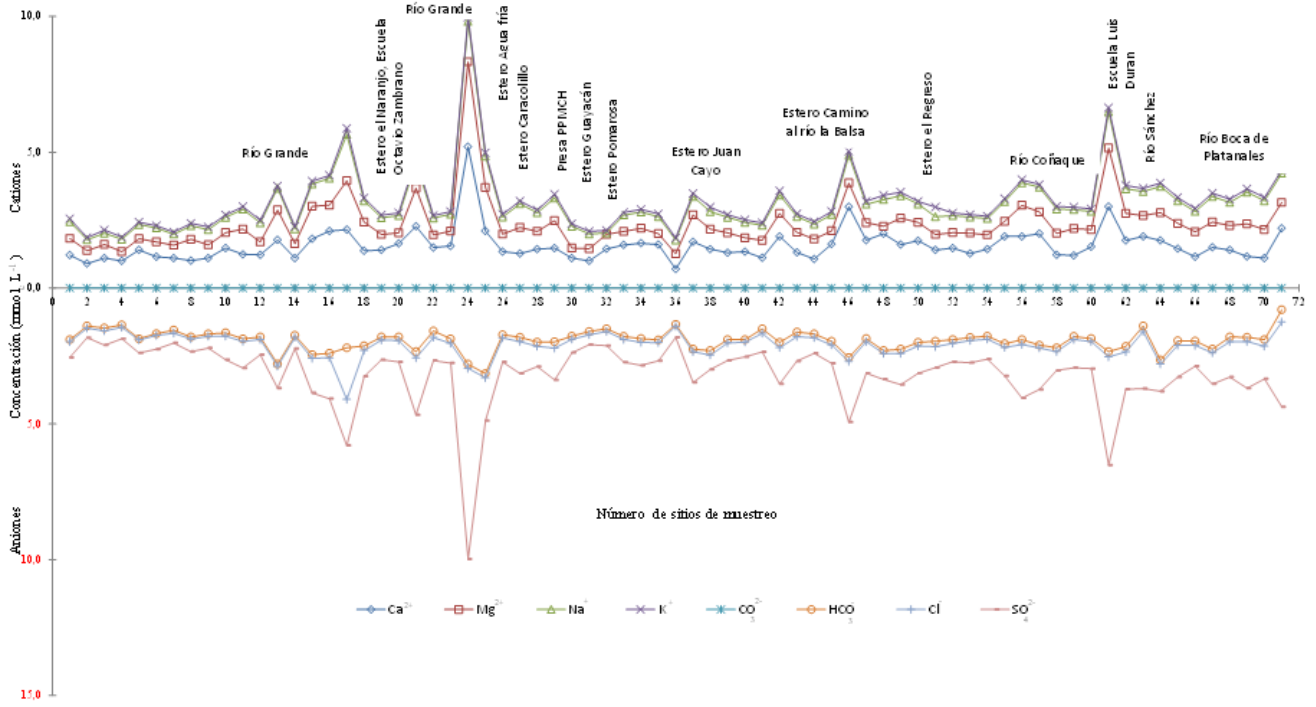
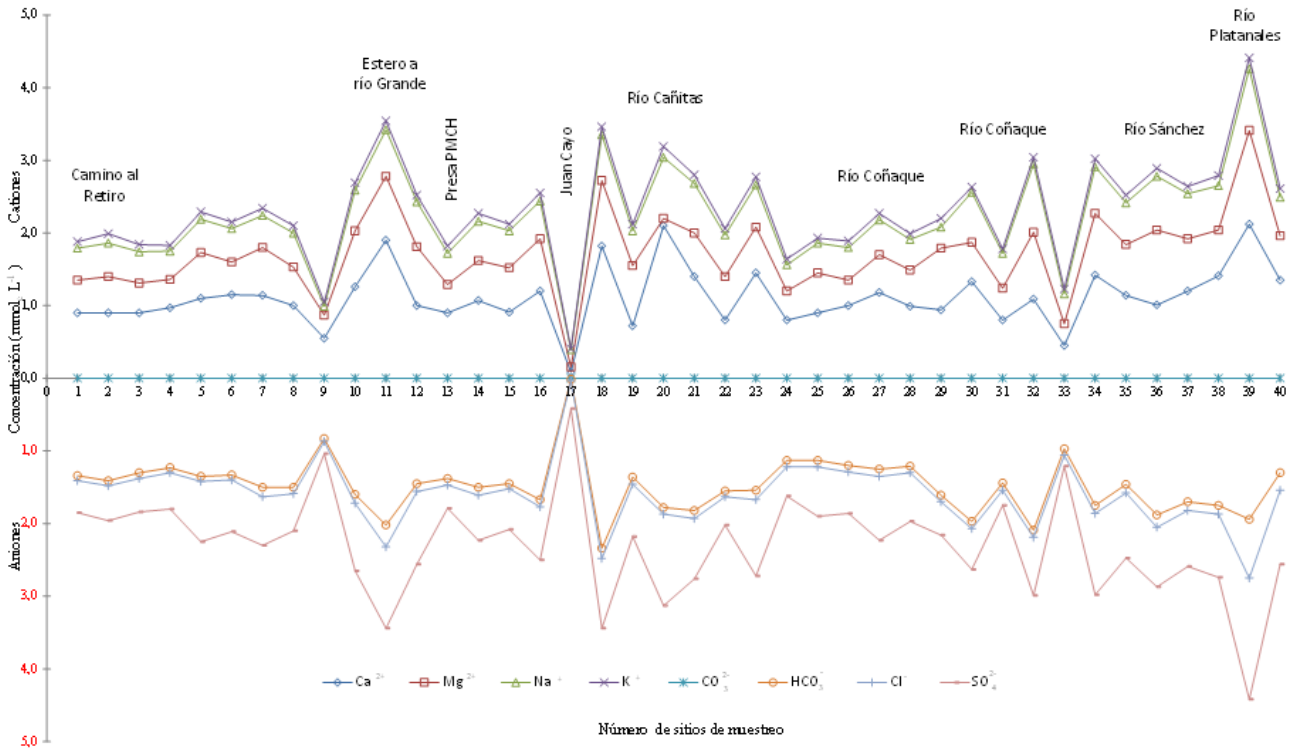


Figura 4.4 Distribución de iones y cationes del muestreo de aguas (época de lluvia)



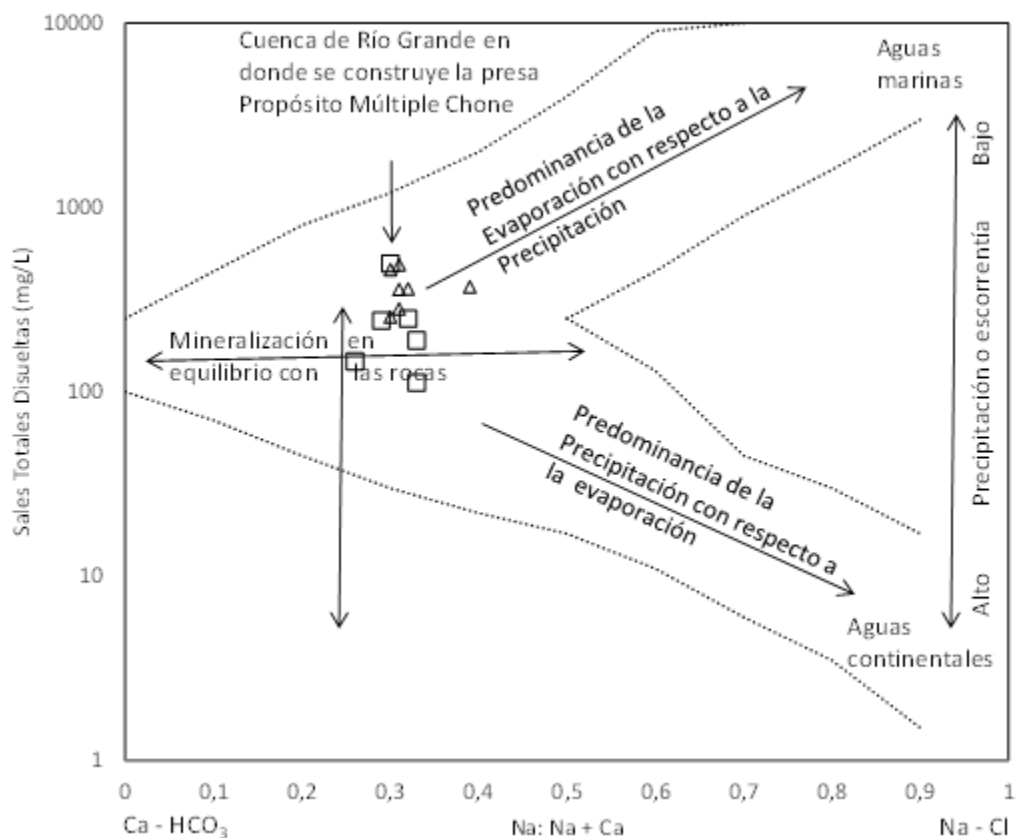
En la Figura 4.5 se observó que el mayor contenido de sales está en el punto 24 perteneciente al río Grande, esto se debe a que este es el punto de descarga de todos los afluentes secundarios que tienen mayor concentración.

Diagrama que representa los procesos que controlan la química de las aguas superficiales

Gibbs (1970) identificó tres mecanismos naturales que controlan la química del mundo de las aguas continentales superficiales: la mineralización en equilibrio con las rocas, predominancia de la evaporación con respecto a la precipitación y predominancia de la precipitación con respecto a la evaporación.

Para definir el comportamiento de la cuenca del río Grande se agrupó las estaciones por sistemas hidrográficos, resultando seis en la época de lluvias y siete en periodo de estiaje. De cada uno de los sistemas se obtuvo el valor promedio de los sólidos totales disueltos y de la relación Na:(Na+Ca) (Figura 4.5).

Figura 4.5 Puntos de agua de la época de estiaje (Δ) y de lluvia (\square), ubicados en la curva de salinidad de Gibbs



Los resultados indican que las aguas del periodo de estiaje presentaron la tendencia a una concentración del tipo clorhídrico – sódico, es decir, estaría aumentando el potencial osmótico de las aguas lo cual ocasionaría, si se mantiene la tendencia, un impacto negativo para la biota de la cuenca de río Grande. Además, la precipitación o escorrentía tienden a la baja, es interesante, si se considera que la cuenca de río Grande se localiza en el Ecuador en donde las precipitaciones son altas en comparación con el resto del planeta.

La precipitación se está reduciendo y la concentración de las aguas de río Grande aumentando, así, es necesario establecer un plan de manejo ecosistémico de la cuenca hidrográfica en donde se construye el PPMCH.

Eutrofización

El fósforo deviene en la naturaleza desde las profundas masas fundidas, por las finas agujas de apatita y termina en los filtros vivientes, microorganismos que se apoderan del fósforo de las disoluciones débiles del agua del mar. El destino del fósforo está ligado a los procesos de la vida y la muerte, este elemento se acumula donde muere la vida orgánica y donde tiene lugar la muerte en masa de animales, como son los puntos de enlace de las corrientes marítimas donde se dan los cementerios submarinos. El fósforo se concentra en la tierra de dos formas: en los yacimientos profundos de apatito, que vienen de los magmas fundidos calientes o en los restos de las partes óseas de los animales (Fersman, 1971).

No existe una interacción directa del fósforo con la atmósfera, a lo contrario de lo que sucede con el azufre, por consiguiente, el fósforo es el elemento a estudiar en los procesos de eutrofización (Sharpley y Withers, 1994; Kronvang et al., 2009). Una manera de remediar el exceso de fósforo en lagos es utilizando a gran escala el sulfato de aluminio, ya que desempeña un doble papel como adsorbente de fósforo soluble y coagulante de sólidos suspendidos (Welch y Cooke, 1999; Mason et al., 2005),

Los resultados obtenidos del muestreo en época de estiaje indican que el 36,36% de los puntos de agua no aceleran la eutrofización y el 63,64% aceleran la eutrofización, para las muestras en época de lluvias el 19,51% no acelera la eutrofización mientras que el 80,49% aceleran la eutrofización.

El contenido de fósforo en la cuenca de río Grande se debe al pasado geológico ya que se resalta la presencia de restos fósiles, donde el principal componente es el fosfato cálcico. Cuando los organismos quedan enterrados en el sedimento, lo primero que sucede es la destrucción de la materia orgánica blanda, formando una masa rica en nutrientes que es consumida por las bacterias, y que puede dar lugar a la formación de petróleo. Las partes duras como los huesos y conchas sufren un proceso de mineralización por intercambio y aporte de sustancias químicas con el sedimento que los contiene, estos procesos pueden ser muy variados, pero los principales son: carbonatación, silicificación, piritización y fosfatación (Szabolcs, 1989). Probablemente la fosfatación ocurre en la zona de estudio por la presencia de minerales como el calcio y el fósforo.

En las Figuras 4.6 y 4.7 se presenta la concentración de los fosfatos en los sistemas hidrográficos que conforman la cuenca del río Grande y que drenan sus aguas hacia el PPMCH para la época de estiaje y de lluvia respectivamente.

Los resultados indicaron que los procesos de eutrofización se está acelerando en la cuenca de río Grande, debido a que en el invierno la concentración máxima fue de 1,4 mg L⁻¹, mientras tanto, en el verano fue de 1,2 mg L⁻¹ en el lugar en donde se construye la presa. Cuando la presa finalice con seguridad estas concentraciones aumentarán sin un adecuado plan de manejo de la cuenca.

Figura 4.6 Concentración de fosfatos en los diferentes sistemas hidrográficos de la Cuenca de Río Grande (época de estiaje)

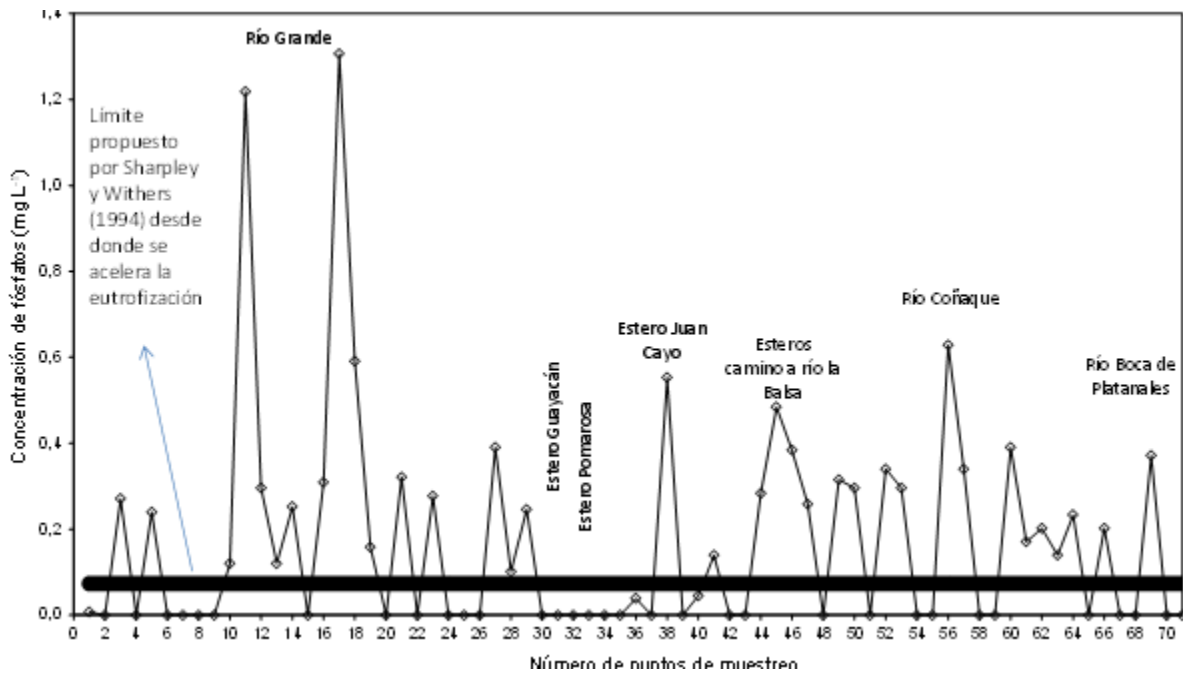
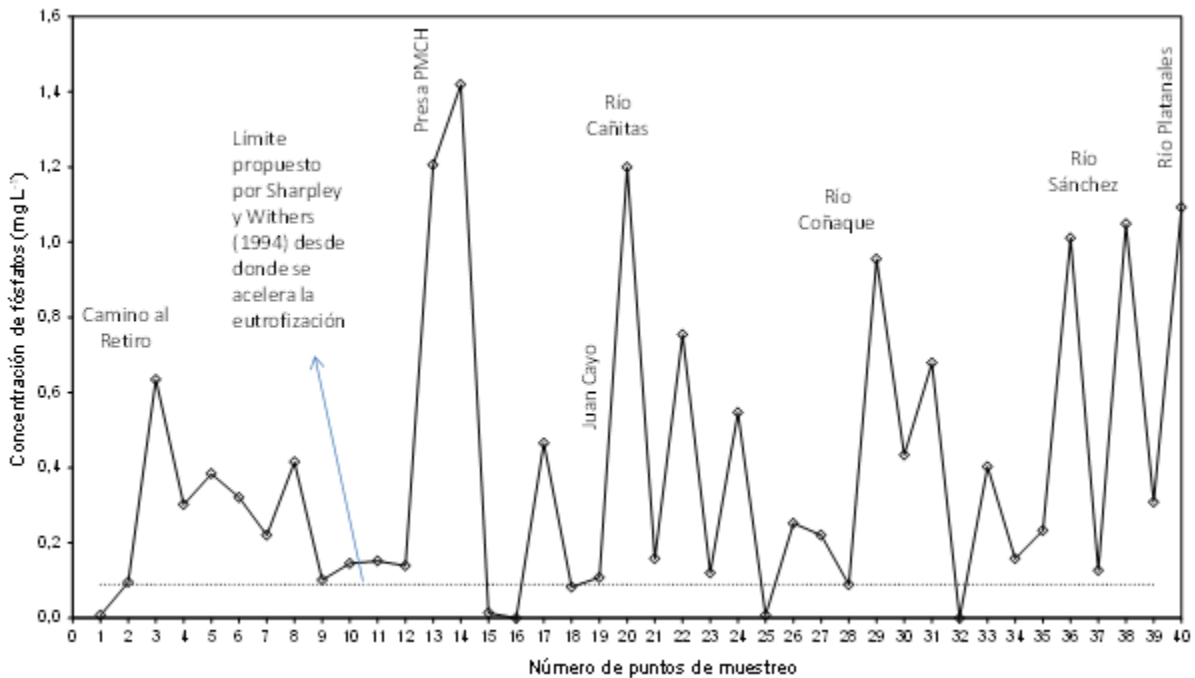


Figura 4.7 Concentración de fosfatos en los diferentes sistemas hidrográficos de la Cuenca de Río Grande (época de lluvia)



4.4 Conclusiones

La cuenca hidrográfica de río Grande, en donde se construye el PPMCH, presentó una irregular distribución de lluvias en un período de 46 años.

En el fenómeno del niño las precipitaciones superaron los 2500mm generando inundaciones, mientras que en otros años, existió una sequía con precipitaciones que no alcanzaron los 500mm al año.

Los procesos que controlan la química del agua superficial de los sistemas hidrográficos que forman río Grande se encuentran en la zona de mineralización en equilibrio con las rocas, sin embargo, en el periodo de estiaje se observó la tendencia hacia la zona donde predomina la evaporación con respecto a la precipitación aumentando la concentración de las aguas, generando así, problemas a los recursos bióticos. Los procesos de eutrofización se acelerarán en más del 60% de las estaciones monitoreadas lo que va a producir serios problemas en la represa si no existe un plan de manejo adecuado en la cuenca alta.

4.5 Referencias

APHA. American Public Health Association. 1995. Standard Methods for the examination of water and wastewater 19th edition. Publication office American Public Health Association, Washington D.C. Chapter 1 p.45; Chapter 2 p.88; Chapter 3 p. 106 and Chapter 4 p.124.

Carta Geológica de Chone MIII-F2 3591-I. (1979).

Fersman, A. (1971). Geoquímica Recreativa. Ediciones Martínez Roca. p. 343.

Fuentes, F., & Massol-Deya, A. (2002). Manual de laboratorio, ecología de microorganismos. Puerto Rico.

Gibbs, R.J. (1970) Mechanisms controlling world water chemistry, Science, 170: 1088-1090.

INAMHI. (2008). Estudio Hidrológico de Inundaciones en la Cuenca Alta del Río Chone. Quito, Ecuador.

Kronvang, B., G. H. Rubæk and G. Heckrath. (2009). International Phosphorus Workshop: Diffuse Phosphorus Loss to Surface Water Bodies Risk Assessment, Mitigation Options, and Ecological Effects in River Basins. Journal Environmental Quality. 38: 1924-1929.

Mason, L., C. Amrhein, C. Goodson, M. Matsumoto and M. Anderson. (2005). Reducing sediment and phosphorus in tributary waters with alum and polyacrylamide. Journal Environmental Quality. Vol. 34. pp. 1998 - 2004.

Monsalve, G. (2009). Hidrología en la Ingeniería. (1ra ed. 3ra Reimp.) Alfaomega

NMX-AA-008-SCFI-2000. Análisis de agua – Determinación del pH – Método de prueba.

NOM-AA-93-1984. Contaminación del agua – Determinación de conductividad eléctrica.

SENAGUA. (2012). Secretaria Nacional del Agua, Ecuador. Construcción del Puente San Pablo en el canal San Antonio. Chone.

Sharpley, A. N. and Winters, P. 1994. The environmentally-sound management of agricultural phosphorus. Netherlands. Fertilizer Research Vol. 39:133-146.

Szabolcs, I. (1989). Salt-Affected Soils. CRC Press, Inc. Printed in the United States, Boca Raton, FL. p. 274.

Welch, E. B. and G. D. Cooke. (1999). Effectiveness and longevity of phosphorus inactivation with alum. *Lake Reservoir Manage.* 15: 5–27.

Aplicación para obtener el área foliar desde imágenes obtenidas de un escáner

CONTRERAS-MURILLO, Sergio[`], LUGO-ESPINOSA, Oziel^{``} y AYALA-DE LA VEGA, Joel ^{```}

S. Contreras, O. Lugo y J. Ayala

[`]Universidad Autónoma del estado de México, Centro Universitario Texcoco, Alumno de la maestría en Ciencias de la Computación; Av. Jardín Zumpango s/n Fracc. El Tejocote, Texcoco, Estado de México

^{``}Universidad Autónoma del estado de México, Centro Universitario Texcoco, Profesor Investigador de tiempo completo en la Maestría en Ciencias de la Computación; Av. Jardín Zumpango s/n Fracc. El Tejocote, Texcoco, Estado de México;

^{```}Universidad Autónoma del estado de México, Centro Universitario Texcoco, Coordinador de la Maestría en Ciencias de la Computación; Av. Jardín Zumpango s/n Fracc. El Tejocote, Texcoco, Estado de México

jayalad@uaemex.mx

D. Sepúlveda, R. Salazar, F. Pérez y J. Rocha (eds.) Ciencias Químicas y Matemáticas-©ECORFAN, Texcoco de Mora-México, 2015.

5 Introducción

El tamaño de las hojas de las plantas es uno de los aspectos más importantes en el estudio de la salud de un cultivo pues está directamente relacionado con su capacidad para absorber la luz solar e intercambiar humedad y CO₂ con su ambiente.

Mediante el análisis del área foliar puede medirse el efecto de una plaga sobre una planta, la eficacia de las técnicas y sustancias empleadas en su cuidado o cuantificar su volumen de producción.

Las técnicas para determinar el área foliar se dividen en destructivas y no destructivas, dependiendo de si la hoja estudiada es separada o no de la planta. Dichas técnicas intentan contrarrestar los errores presentes en una estimación manual.

Un primer método de medición es la utilización de un integrador electrónico. Existen integradores portátiles y de laboratorio. Estos equipos son escáneres cuya principal desventaja es su costo elevado.

La segunda técnica es la obtención del área de una hoja mediante estimaciones matemáticas con la desventaja de que debe diseñarse un modelo matemático por cada cultivo distinto a estimar. La exactitud de un modelo estadístico depende de la técnica empleada y de la calidad de las muestras utilizadas para su desarrollo.

Las técnicas estadísticas son una alternativa al uso de equipo especializado de medición pero dependen a su vez de otras mediciones que, de realizarse manualmente, pueden propagar errores.

En cuanto a las técnicas destructivas, la medición en condiciones de laboratorio se centra en el uso de aplicaciones para el tratamiento digital de imágenes. Un ejemplo es la aplicación ImageJ® (imageJ) que es una herramienta de propósito general que permite aplicar transformaciones a imágenes digitales.

En este trabajo se presenta una aplicación de tratamiento digital de imágenes que a diferencia de otras opciones es específica para obtener el área foliar por lo que el usuario sólo requiere seleccionar la imagen que desee analizar.

Otras opciones requieren que el usuario aumente el contraste, elimine el ruido, aplique filtros, etc. antes de obtener el área en píxeles. Además, debe instrumentar una técnica para convertir de píxeles a cm en imágenes tomadas, por ejemplo, con cámaras digitales de una resolución y a una distancia particulares.

La interface gráfica de la aplicación fue desarrollada con lenguaje java en el IDE netbeans y el tratamiento digital de las imágenes se realizó mediante la ejecución de un script del lenguaje R.

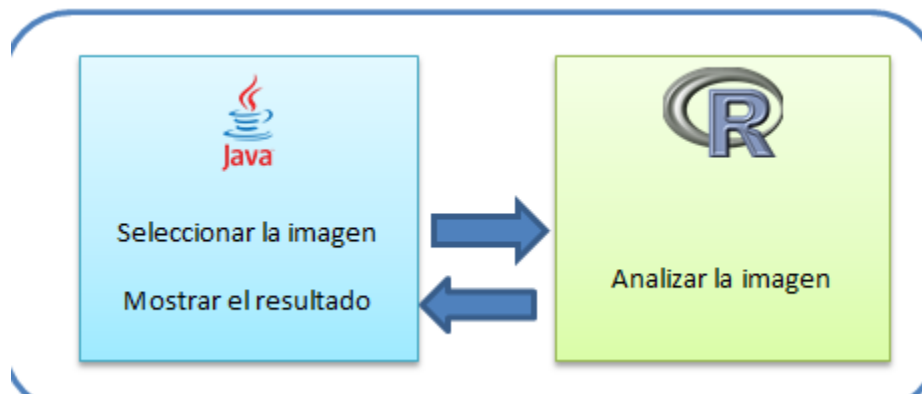
5.1 Materiales y métodos

La aplicación realiza el tratamiento digital de las imágenes mediante la ejecución de un script del lenguaje R en una instancia instalada por el usuario.

"R es un lenguaje y entorno para cómputo estadístico y graficación, similar al lenguaje S desarrollado originalmente en los laboratorios Bell. Es una solución de código abierto para el análisis de información que es mantenido por una activa y numerosa comunidad alrededor del mundo" (Kabacoff, 2011).

La interface gráfica está desarrollada con el lenguaje Java. El desarrollo en diferentes plataformas de la lógica de negocios y la interface gráfica permite que ambas secciones sean codificadas paralelamente, ahorrando tiempo y favoreciendo la integración de equipos multidisciplinarios (Figura 5).

Figura 5 módulos de la aplicación



El programa fue desarrollado para el sistema operativo Windows© pero puede utilizarse en Linux© y Macintosh© pues tanto R como Java son multiplataforma.

La aplicación presentada se desarrolló en la versión 8 del entorno de desarrollo gratuito NetBeans.

Por otro lado, los scripts del lenguaje R se desarrollaron en el entorno de desarrollo gratuito CRAN (Comprehensive R Archive Network) disponible para el sistema operativo Windows.

Al instalar "R" se publica la variable de entorno R_HOME que indica la ubicación de los archivos instalados. Las variables de entorno son una lista de claves que el sistema operativo almacena sobre la ubicación de archivos y programas.

Inicialmente, R solo incluye un conjunto base de paquetes. Los paquetes son conjuntos de scripts desarrollados por programadores alrededor del mundo cuyas funciones pueden ser utilizadas gratuitamente en las aplicaciones. Existen más de 5000 paquetes disponibles para su descarga desde servidores de universidades y centros de investigación.

El script de R que analiza las imágenes digitales requiere de la instalación de 3 de estos paquetes:

Paquete JPG:

Este paquete proporciona una manera fácil y sencilla de leer, escribir y mostrar imágenes de mapa de bits almacenados en el formato JPEG. Puede leer y escribir vectores en memoria o hacia archivos (jpeg, 2014).

Paquete BMP:

Lee imágenes en formato BMP de Windows. Actualmente se limita a imágenes en escala de grises a 8 bits e imágenes (A) RGB de 24 y 32 bits. Aplicación R sin dependencias externas (bmp, 2014).

Paquete PIXMAP:

Funciones para la importación, exportación, impresión y demás manipulaciones de imágenes de mapas de bits (pixmap, 2014).

La aplicación supone que el usuario digitalice sus muestras como imágenes en formato jpg con la ayuda de un escáner convencional (Figura 5.1). La aplicación no está acotada a ninguna marca o modelo particular de escáner. Tampoco requiere que las imágenes tengan una resolución o tamaño específico pero debe tenerse en cuenta que su calidad incide directamente en la rapidez del análisis.

Figura 5.1 Digitalización de las hojas



Las imágenes en formato JPG obtenidas desde un scanner tienen como parte de sus metadatos su densidad, es decir, el número de píxeles que representan una pulgada cuadrada. Este valor es utilizado por las impresoras para imprimir las imágenes en su tamaño correcto. También es utilizado por una computadora para desplegar las imágenes en un monitor en su tamaño real y es utilizado por la aplicación para convertir los resultados de píxeles a centímetros.

Figura 5.2 Parte de los metadatos de una imagen en formato JPG

```

<javax_imageio_jpeg_image_1.0>
  <JPEGvariety>
    <app0JFIF
      majorVersion="1"
      minorVersion="1"
      resUnits="1"
      Xdensity="96"
      Ydensity="96"
      thumbWidth="0"
      thumbHeight="0"/>
    </JPEGvariety>
  <markerSequence>
    <dqt></dqt>
    <sof
      process="0"
      samplePrecision="8"
      numLines="513"
      samplesPerLine="931"
      numFrameComponents="3">
    </sof>
    <dht></dht>
    <sos></sos>
  </markerSequence>
</javax_imageio_jpeg_image_1.0>

```

La figura 5.2 muestra un fragmento de los metadatos de una imagen en formato JPG en la que las propiedades "numLines" y "samplesPerLine" de la etiqueta "sof" hacen referencia al alto y ancho de la imagen en pixeles. Por su parte, las propiedades "Xdensity" e "Ydensity" de la etiqueta "app0JFIF" muestran los pixeles que, vertical y horizontalmente, dibujan una pulgada cuadrada en su escala original.

La clase "ImageIO" del paquete javax.imageio permite tener acceso a los metadatos de una imagen desde un programa de java. La estructura XML de los metadatos de las imágenes es diferente para cada tipo de archivo. Actualmente la aplicación solo soporta el formato JPG.

La estrategia de funcionamiento de la aplicación es la siguiente (Figura 5.3):

Habiendo digitalizado la muestra utilizando un escáner:

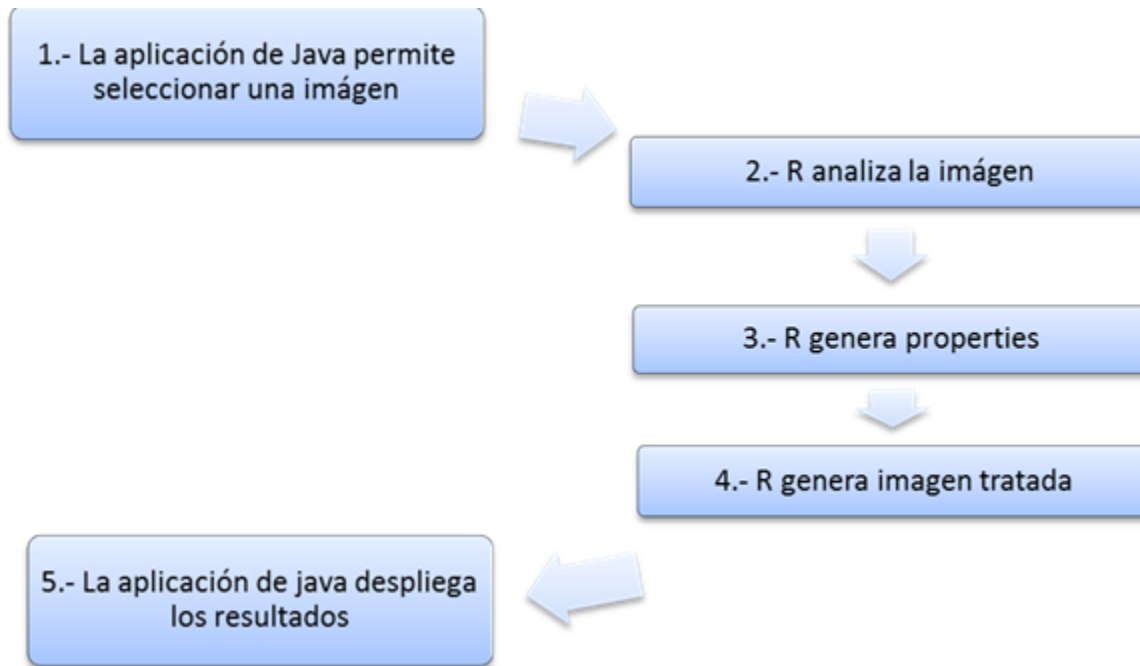
- 1.- La aplicación le solicita al usuario que seleccione una imagen a analizar.
- 2.- La aplicación ejecuta un script del lenguaje R para analizar el archivo seleccionado.
- 3.- Las dimensiones de la hoja se guardan en un archivo de texto con el mismo nombre y ubicación que la imagen pero de tipo "properties".
- 4.- También se guarda un archivo de imagen con el mismo nombre y ubicación que la imagen original pero en formato de mapa de bits de 256 colores que contiene la versión tratada digitalmente.
- 5.- La aplicación despliega los resultados al usuario.

Los resultados son almacenados para que cuando el usuario revise una imagen nuevamente no sea necesario volver a analizarla.

La aplicación no requiere que las carpetas e imágenes tengan una estructura o nomenclatura específica. El usuario puede almacenarlas como prefiera.

El contenido del archivo properties y la imagen resultante del análisis pueden ser revisados posteriormente por el usuario, incluso sin utilizar esta herramienta.

Figura 5.3 Funcionamiento de la aplicación



Internamente R convierte la imagen a blanco y negro. Debido a que las imágenes son obtenidas de un escáner no se consideró eliminar el ruido pues las condiciones de iluminación suelen ser óptimas y el proceso elevaría el tiempo de ejecución de la aplicación.

La imagen es tratada como matriz numérica donde cada pixel es representado con un número que va del 0 al 256 y que representa tonos de oscuros a claros respectivamente (Figura 5.3).

Figura 5.4 Imagen de una hoja en blanco y negro.



A partir de la imagen en blanco y negro se detectan los bordes de la hoja con el operador de Roberts Cross (Figura 5.4). Este método le aplica dos kernels a la matriz numérica mediante una operación de convolución.

Al implementarlo [El detector de bordes], el valor máximo arrojado por la aplicación de dichos patrones es guardado como el valor del borde en ese punto. El punto $E_{x,y}$ en el borde es entonces el máximo de los dos valores derivados de la convolución de los dos kernels en un punto $P_{x,y}$ de la imagen. (Nixon, 2008).

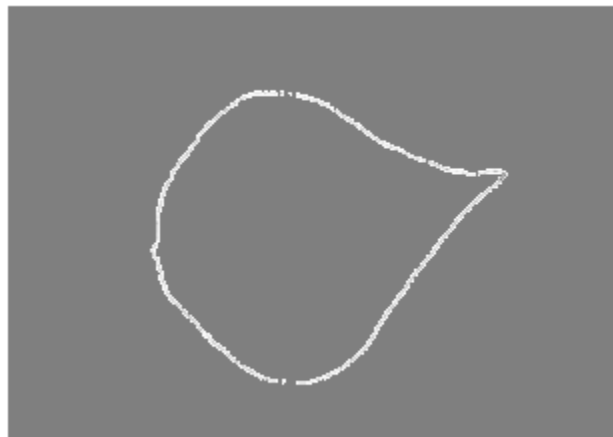
Operador de Roberts Cross:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Operación de convolución:

$$E_{x,y} = \max\{|M^+ * P_{x,y}|, |M^- * P_{x,y}|\} \quad \forall x, y \in 1, N - 1 \quad (1)$$

Figura 5.5 Aplicación del detector de bordes



Las coordenadas de los pixeles que componen el borde son aislados para ser presentados al usuario dibujados sobre la imagen original (Figura 5.5).

Figura 5.6 Borde de la hoja

Para encontrar el ápice (punta) de la hoja se busca la esquina del borde que esté más alejada de cualquier otro pixel. Una esquina es el punto en el que la dirección del borde cambia más allá de cierto número de grados. Dependiendo del tipo y estado de la muestra podría haber varias esquinas pero solo una es el ápice. El ápice es necesariamente una esquina.

Las matrices de la Figura 5.7 son un ejemplo de secciones que pueden encontrarse en la matriz numérica que representa la imagen, Los valores reales van del 0 al 256 pero se presenta binarizada para su mejor análisis.

Figura 5.7 Ejemplos de secciones presentes en la imagen.

$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Color sólido	Borde	Esquina

La interface gráfica permite que el usuario reubique la base y la punta propuestas en el caso de que la las condiciones o taxonomía de la hoja hubiera dificultado su análisis.

Finalmente se realiza un barrido perpendicular al eje formado por la base y la punta para obtener la parte más ancha de la hoja.

El método “exec” de la clase `java.lang.Runtime` permite ejecutar comandos del sistema operativo desde una aplicación Java.

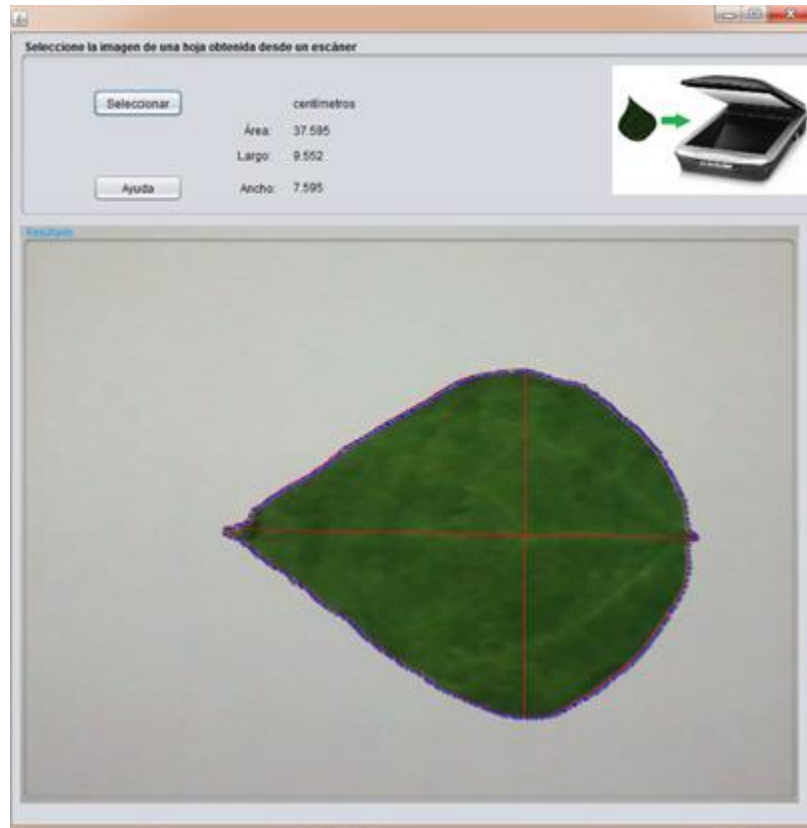
El comando para solicitarle a R la ejecución de un script es "R CMD BATCH script.R log.txt" solo accesible si la variable de entorno `R_HOME` está correctamente establecida.

5.2 Resultados

La aplicación requiere que el usuario tenga a Java y a R apropiadamente instalados. La aplicación consta de un archivo ejecutable que se guarda junto con los scripts de R en una ubicación específica. La aplicación se diseñó para que sea el usuario el que defina la estructura de carpetas y nombres para sus imágenes. La figura 9 muestra la única ventana de la aplicación.

Para iniciar el análisis de una imagen el usuario selecciona un archivo en formato JPG obtenido desde un escáner presionando el botón "seleccionar". La imagen seleccionada es tratada y el resultado es presentado como texto en la parte superior y gráficamente debajo (Figura 5.8).

Figura 5.8 Ejecución de la aplicación



Los resultados son almacenados en un archivo de propiedades con el mismo nombre y ubicación que la imagen seleccionada. Si la imagen ya había sido tratada, entonces sólo despliega los resultados previamente obtenidos; del mismo modo se guarda la imagen tratada digitalmente. Ambos archivos pueden ser revisados por el usuario posteriormente incluso sin utilizar esta herramienta.

5.3 Conclusiones

Existen opciones gratuitas y comerciales de aplicaciones que permiten realizar un tratamiento digital a las imágenes y obtener las medidas de las figuras que muestran, pero al ser de propósito general requieren que el usuario realice cada vez configuraciones, pasos y conversiones que se evitan al utilizar una herramienta de uso específico como ésta.

Las imágenes obtenidas desde un escáner sí guardan en sus metadatos su densidad, imágenes obtenidas de otras fuentes podrían no contener esta información. Para esta técnica tampoco se requiere un fondo de color específico o con patrones. Incluso no depende de una marca o tipo específicos de escáner en tanto que se configure para obtener las imágenes en formato JPG.

La aplicación supone que solo aparezca una hoja simple por imagen.

La aplicación se diseñó para no ser una herramienta intrusiva, es el usuario el que establece su propia estructura de carpetas para almacenar sus archivos digitales y la imagen original no es alterada.

Los archivos no están acotados a un tamaño y resolución específicos pero el usuario debe considerar que la velocidad de ejecución de la herramienta depende de las dimensiones de las imágenes seleccionadas y de las especificaciones del equipo de cómputo; cuanto menor sea la resolución y tamaño de las imágenes, menor será también el tiempo que tome su análisis. El usuario puede configurar su escáner para obtener los archivos con las propiedades que requiera su investigación.

Tanto el lenguaje R como el lenguaje Java son distribuidos gratuitamente y son ampliamente utilizados en el ámbito académico y de investigación.

5.4 Referencias

Jefferis, G. (2014) read windows Bitmap (BMP) images. Consultado el 2 de septiembre de 2014 en <http://cran.r-project.org/web/packages/bmp/>

Rasband, W. (2014). ImageJ features .Consultado el 2 de septiembre de 2014 en <http://imagej.nih.gov/ij/features.html>

Urbanek, S. (2014) read and write JPEG images. Consultado el 2 de septiembre de 2014 en <http://cran.r-project.org/web/packages/jpeg/>

Kabacoff, R, R in action, data analysis and graphics with R 1a ed. Nueva York. Manning, 2011. p. 5. ISBN: 9781935182399

Nixon M. y Aguado A. Feature Extraction and image Processing, 2a ed., Londres, Elsevier, 2008, p. 120. ISBN: 9780123725387

Bivand, R; Leisch, F. y Maechler M. (2014). pixmap: Bitmap Images ("Pixel Maps"). Consultado el 2 de septiembre de 2014 en <http://cran.r-project.org/web/packages/pixmap>

Hornik K, (2013). Frequently asked questions on R. Consultado el 2 de septiembre de 2014 en <http://cran.r-project.org/doc/FAQ/R-FAQ.html>

Venables W. N. y Smith D. M. (2014)., An Introduction to R, Notes on R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics, Version 3.0.1, R Core Team, 2014.

Revisión de modelos matemáticos para captura de agua y nutrientes por la raíz de las plantas

SEPÚLVEDA-JIMÉNEZ, Daniel[`], LOERA-MARTÍNEZ, Jesús^{``} y SEPÚLVEDA-ROBLES, Daniel Eduardo^{```}

D. Sepúlveda, J. Loera y D. Sepúlveda

[`]Centro de Investigación en Economía y Matemáticas Aplicadas de la Uach

^{``}División de Ciencias Económico-Administrativas

^{```}División de Ciencias Económico-Administrativas

sepjim700@yahoo.com.mx

D. Sepúlveda, R. Salazar, F. Pérez y J. Rocha (eds.) Ciencias Químicas y Matemáticas-©ECORFAN, Texcoco de Mora-México, 2015.

6 Introducción

El agua y los nutrientes son absorbidos por las raíces de las plantas debido a que éstas penetran en un gran volumen de suelo. Las raicillas más pequeñas que se van formando tienen una epidermis delgada por la que el agua penetra con facilidad, circulando a través de las células de cada raíz hasta llegar al otro tipo de vasos llamados xilema. Esta vía de circulación está formada por células muertas que tienen más o menos forma de tubo, de manera que muchas células unidas forman largas tuberías por las que el agua asciende de la raíz, a través del tallo, hasta las células de las hojas, en donde es requerida en la mayor cantidad.

Las raíces de las plantas son órganos con potencialidades extraordinarias; a pesar de ello, han sido menos estudiadas que las hojas, debido quizá a que presentan mayores dificultades para su estudio por su crecimiento y funcionamiento subterráneo. Las raíces crecen y se ramifican continuamente durante las etapas activas de las plantas, de manera que se van formando nuevas raíces hacia las capas del suelo en las que existe más agua y también nutrientes que puedan ser absorbidos. Se ha visto que la forma y la disposición de las raíces de las plantas varían de acuerdo con las especies y el ambiente en donde crecen. Algunos tipos de plantas concentran sus raíces en la superficie, otras en zonas intermedias o profundas del suelo y otras más exploran simultáneamente varias capas; de este modo se reduce la competencia entre plantas diferentes, ya que pueden tener las raíces en diversos niveles. En la figura se representan diferentes tipos de raíces.

El contacto del agua y los nutrientes con la superficie de la raíz es necesario para que se produzca la absorción de los mismos, esta se puede producir de dos formas: En forma directa por el crecimiento de las raíces y por movimiento de los nutrientes por difusión o flujo másico desde el suelo hasta la superficie de las raíces. A medida que la raíz crece, se ubica en estratos de suelo en los que encuentra los nutrientes disponibles para la planta, la cantidad de nutrientes que intercepta en forma directa la raíz se encuentra relacionada con la cantidad de nutrientes disponibles en el suelo ocupado por la raíz y el porcentaje de suelo explorado por la raíz. En general solo un pequeño porcentaje del total de nutrientes absorbido por la raíz llega por esta vía.

La mayor cantidad de los nutrientes se mueve desde el suelo antes de ser absorbido por las raíces, los mecanismos de transporte involucrados en el movimiento de los nutrientes en el suelo hasta su llegada hasta la superficie de las raíces son la difusión y el flujo másico. La difusión, es cuando las raíces absorben nutrientes y se crea un gradiente de concentración de nutrientes entre el suelo y la raíz, el resultado de este gradiente es un movimiento de nutrientes hacia las cercanías de las raíces, la cantidad de nutrientes transportadas por este mecanismo va a estar relacionado con el gradiente de concentración y con el coeficiente de difusión del nutriente, que varía con el tipo de suelo y la movilidad del nutriente en el suelo. El porcentaje de nutrientes respecto del total absorbido que llegan hasta la superficie de la raíz por este mecanismo varía de acuerdo el nutriente en cuestión. El flujo másico es el movimiento de agua y de los nutrientes que se encuentran disueltos en la masa líquida que llega hasta las raíces como resultado del proceso de transpiración de la planta, la cantidad de nutrientes que llega por este movimiento está relacionada con la concentración de los mismos en la solución del suelo y con el volumen de agua que absorbe la planta.

Aproximadamente el 70% del agua que se suministra a los cultivos por medio de riego se devuelve a la atmósfera por evapotranspiración. Por lo tanto, áreas con vegetación constituyen una parte importante del sistema hidrológico de la tierra, que ofrece la más prometedora avenida exigiendo nuestra atención para la optimización del uso del agua para riego.

El límite entre el suelo y el sistema radicular de las plantas es una importante interfaz hidrológica en la que más del 50% del agua por evapotranspiración cruza esta interfaz. Un objetivo importante a largo plazo de la ingeniería y de los hidrólogos debe ser el desarrollo de una mejor comprensión de los procesos hidrológicos que intervienen en el transporte de agua del suelo, en y a través de la vegetación. Este dará lugar a la utilización del agua de riego de manera optimizada y mejorará el rendimiento de los cultivos. La absorción de agua por las raíces constituye un importante componente del balance de agua en el campo y por lo tanto, la comprensión de la absorción de agua por la raíz ayuda a manejar los sistemas de riego de manera más eficiente. Un método cuantitativo que describe la absorción de agua de la raíz debe ser establecido para el uso del agua de manera eficiente. Los procesos de transporte de agua dentro de la zona no saturada del suelo, en la zona de la raíz están controlados por propiedades físicas del suelo, características fisiológicas de la planta y factores meteorológicos. En general, la absorción de agua por la raíz de las plantas en la zona radicular del suelo se modela como una función del potencial de transpiración, la distribución vertical de la raíz y la disponibilidad del agua del suelo, con o sin una función prescrita de la carga hidráulica del suelo esta presión representa el efecto de reducción de la humedad sobre la captación. En la extracción de la humedad de la zona de la raíz se ha observado que se pueden seguir diferentes patrones, y por lo tanto se han propuesto diferentes modelos de extracción de agua de la raíz, algunos suponen que la captación sea constante, lineal, exponencial y en general no lineal dentro de la zona de las raíces. Un modelo que predice la extracción de humedad en la zona radicular de manera más precisa puede ayudar a los programas de riego con la finalidad de un plan para el uso del agua más eficiente.

Los modelos matemáticos para captura de agua y nutrientes por las raíces de las plantas se dividen en general en dos grandes categorías: modelos de una sola raíz “microscópicos” y modelos que toman en cuenta la arquitectura de la raíz y de esta en su totalidad como un sumidero modelos macroscópicos. Los modelos microscópicos, tales como el trabajo pionero de Gardner (Gardner, 1960), describen la razón de captura de agua y nutrientes en función de una longitud representativa de la raíz y entonces multiplican esta razón de captura por la longitud total de las raíces en el volumen del suelo. Los modelos macroscópicos, como el de Hillel (Hillel D, 1980), describen el flujo del agua del suelo a través de las fronteras de un volumen unitario del suelo. Los cambios en el volumen se atribuyen a la captura del agua por todas las raíces en dicho volumen como si fueran un sumidero. Ninguno de los modelos que aparecen en la literatura tanto microscópicos como macroscópicos son de validez suficiente para determinar los parámetros necesarios para especificar un cultivo sobre un suelo en particular y usar estos parámetros para predicciones de captura de agua y nutrientes en otros cultivos y en otros tipos de suelos y en otras épocas del año. Estas severas limitaciones hacen necesario en primer lugar, el análisis y sistematización de los modelos matemáticos tanto microscópicos como macroscópicos para captura de agua y nutrientes por las raíces de las plantas y en segundo lugar la extensión de los modelos existentes así como la elaboración de modelos más consistentes. También es necesario el análisis de los procesos físicos y químicos que se llevan a cabo en esta captura y que deberán de ser considerados en los modelos matemáticos propuestos.

La extracción de agua y nutrientes por las raíces de las plantas involucran procesos de transporte en la interacción suelo-planta en diferentes escalas espaciales y temporales y hay necesidad de enlazar estos procesos de una manera formal. Específicamente, la arquitectura y características fisiológicas del sistema radical, también como la heterogeneidad del suelo se han tomado muy pobremente en cuenta en los estudios de captura de agua y nutrientes por las raíces de las plantas, por lo que es conveniente llevar a cabo trabajos con la finalidad de analizar esta captura y sus mecanismos en la escala de una sola raíz y en la escala donde se considera la arquitectura de la raíz, las propiedades hidráulicas del suelo y la variación de la reducción de nutrientes y agua alrededor de las raíces.

En esta investigación se lleva a cabo una revisión de modelos matemáticos existentes para captura de agua y nutrientes por las raíces de las plantas, se presenta un modelo microscópico para captura de agua y se revisa el modelo microscópico de Nye-Tinker-Barber para captura de nutrientes, además, se revisan funciones propuestas para la absorción de agua por la raíz para modelos macroscópicos.

6.1 Materiales y Métodos

En la primera parte de este trabajo se formula un modelo microscópico de flujo de agua hacia la raíz de una planta individual, este es descrito por la ecuación no lineal que resulta de tomar en cuenta el balance volumétrico de masa y la ley de Darcy. Se formula este modelo en términos de variables adimensionales, y se muestra una solución analítica. Se continúa con la discusión del Modelo de Nye-Tinker-Barber, en este modelo los nutrientes son absorbidos por una sola raíz cilíndrica en una extensión infinita de suelo. La absorción de nutrientes por la raíz se considera que se produce a partir de la fase líquida, es decir de agua en el suelo, se discuten los supuestos del modelo y se desarrolla la formulación matemática de dicho modelo.

En la segunda parte se analizan modelos macroscópicos para la absorción de agua por las raíces de las plantas, el punto de partida es la ecuación no lineal de Richards. En este enfoque el flujo individual hacia una raíz se ignora y se considera el sistema de raíces en general para extraer la humedad del suelo. La tasa de extracción en un determinado punto depende del espacio, el tiempo, el contenido de humedad del suelo, el potencial de agua o una combinación de estas variables.

El agua absorbida por las raíces, se representa como un término de extracción en la humedad del suelo en la ecuación de flujo. Las condiciones de contorno se especifican en los límites del sistema compuesto suelo-planta, así como la superficie del suelo y la parte inferior de la raíz en el dominio o nivel freático. Al hacer caso omiso del flujo hacia las raíces individuales, este enfoque evita complicaciones geométricas implicadas en el análisis la distribución de la raíz. Modelos basados en el enfoque macroscópico no requieren una completa visión de los procesos físicos de la absorción de agua por la raíz y por lo tanto eliminan la dificultad de obtener parámetros de la planta. La diferencia entre diferentes propuestas de modelos es el término de extracción, se describen varios términos de extracción encontrados en la literatura. Se termina este trabajo con las conclusiones pertinentes.

6.2 Resultados: Desarrollo de los modelos matemáticos.

Modelos matemáticos microscópicos para captura de agua y nutrientes por la raíz de una planta.

Captura de agua por una raíz desde una capa cilíndrica de suelo. Formulación del modelo. En este apartado se sigue el desarrollo propuesto por P. A. C. Raats, (Raats P. A. C., 2007).

El flujo microscópico de agua en el suelo hacia una raíz de una planta individual se describe por la ecuación de difusión no lineal que resulta de un balance de masa volumétrico y la ley de Darcy

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial r} \right] \quad (1)$$

Donde r es la coordenada radial, θ es el contenido volumétrico de agua en la escala microscópica en la región de influencia de raíces de plantas individuales, y $D(\theta)$ es la difusividad suelo-agua. La distribución inicial del contenido de agua se supone que es uniforme:

$$t = 0, \quad r_0 < r < r_1, \quad \theta = \theta_i \quad (2)$$

Donde θ_i es el contenido inicial de agua. La condición de frontera en el límite exterior de la capa cilíndrica de suelo es:

$$t > 0, \quad r = r_1 \quad \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

La condición de frontera en la interface suelo-raíz se rige por la demanda de agua por la raíz de la planta y por la capacidad del flujo desde el suelo a la raíz de la planta para satisfacer esta demanda. En la escala de la vegetación, considere un volumen arraigado representativo V de suelo. La captura U de agua desde este volumen de suelo puede ser escrito como:

$$U = \int_V \bar{\lambda} dv = \int_V -F \sigma dv = \int_V D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial r} \sigma dv \quad (4)$$

Donde F es el flujo en la interface suelo-raíz. si el flujo del agua a la raíz no es limitante, la absorción de U está determinada por las condiciones atmosféricas y la etapa de crecimiento de la vegetación. Si el sistema de la raíz es uniforme, entonces en cada punto de la interface suelo-raíz el flujo puede ser escrito como:

$$F = -\frac{U}{\sigma V} = -\frac{\bar{\lambda}}{\sigma} = -\frac{r_1^2}{2r_0} \bar{\lambda} = -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial r} \quad (5)$$

Claramente, los aumentos de la superficie específica del área de la raíz σ y el volumen arraigado V reducen la demanda F sobre una base de la raíz individual. Para la condición de frontera en la interface suelo-raíz se consideran dos posibilidades:

A. durante el período, hasta el tiempo crítico t_{crit} , de razón constante de absorción $\bar{\lambda}$:

$$0 < t < t_{crit}, \quad r = r_0, \quad D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial r} = \frac{\bar{\lambda}_c}{\sigma} = \frac{r_1^2}{2r_0} \bar{\lambda}_c \quad (6)$$

B. Durante el período, después que el tiempo crítico t_{crit} , de la caída de la tasa de absorción $\bar{\lambda}$:

$$t > t_{crit}, \quad r = r_0, \quad \theta = \theta_{crit} \quad (7)$$

Durante el período de razón constante, el balance de masas global en el tiempo t requiere que la captura total de agua por unidad de volumen, $\bar{\lambda}_c t$, es igual a la depleción promedio por unidad de volumen $\phi_s = (\theta_i - \bar{\theta})$

$$\phi_s(\theta_i - \bar{\theta}) = \bar{\lambda}_c t \quad \text{o} \quad t = \frac{\phi_s(\theta_i - \bar{\theta})}{\bar{\lambda}_c} \quad (8)$$

Esta ecuación muestra simplemente que durante el período de tasa constante el promedio de contenido de agua disminuye linealmente con el tiempo.

Formulación del modelo con variables adimensionales.

El modelo puede reformularse en términos de variables sin dimensiones. La posición adimensional ρ , el tiempo τ , el agotamiento del agua del suelo Θ , y la difusividad Δ , se definen respectivamente como:

$$\rho = \frac{r}{r_1}, \quad \tau = \frac{t}{t_d}, \quad \Theta = \frac{\theta_i - \theta}{\theta_i - \theta_{crit}}, \quad \Delta = \frac{D}{\widehat{D}} \quad (9)$$

En donde \widehat{D} la difusividad media, y t_d es un tiempo característico asociado con el flujo capilar de agua definidos por:

$$\widehat{D} = \frac{\int_{\theta_{crit}}^{\theta_i} D d\theta}{\theta_i - \theta_{crit}}, \quad t_d = \frac{r_1^2}{\widehat{D}} \quad (10)$$

El tiempo característico t_d describe el flujo capilar del agua desde el suelo hacia las raíces de la planta. Un segundo tiempo característico t_c se define como la relación entre el suministro de agua en el suelo y la velocidad de absorción $\bar{\lambda}_c$ por las raíces de la planta durante el período de velocidad constante:

$$t_c = \frac{(\theta_i - \theta_{crit})\phi_s}{\bar{\lambda}_c} \quad (11)$$

El tiempo característico t_c es la duración del período durante el cual el agua estará disponible si toda el agua en el suelo podría tomarse en la velocidad constante $\bar{\lambda}_c$. El flujo de agua hacia la raíz de una planta del suelo circundante depende del número geométrico ρ_0 y durante el período de tasa constante, también del número de disponibilidad τ_c respectivamente, definido por:

$$\rho_0 = r_0/r_1 = \phi_r^{1/2}, \quad \tau_c = t_c/t_d = \frac{\widehat{D}(\theta_i - \theta_{crit})(1 - \rho_0^2)}{\bar{\lambda}_c r_1^2} \quad (12)$$

El número de disponibilidad τ_c compara la duración t_c del periodo en que el agua estaría disponible si toda el agua en el suelo fuera tomada en la razón constante $\bar{\lambda}_c$ a el tiempo característico t_d del flujo capilar desde el suelo hacia la raíz de la planta.

En términos de la posición adimensional ρ , el tiempo τ , el agotamiento del agua del suelo Θ y la difusividad Δ , el problema de flujo se plantea de la manera siguiente:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\rho \Delta(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial \rho} \right] \quad (13)$$

Con condiciones iniciales

$$\tau = 0, \quad \rho_0 < \rho < 1, \quad \Theta = 0 \quad (14)$$

Las condiciones de frontera. En la frontera exterior de la capa cilíndrica de suelo son:

$$\tau > 0, \quad \rho = 1, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial \rho} = 0 \quad (15)$$

Las condiciones de frontera en la interface suelo-raíz. Durante el periodo de tasa constante de absorción:

$$0 < \tau < \tau_{crit}, \quad \rho = \rho_0, \quad \Delta(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial \rho} = \frac{1 - \rho_0^2}{2\rho_0\tau_c} \quad (16)$$

De estas condiciones de frontera se sigue que el flujo en la interface suelo-raíz es grande si el producto del número geométrico ρ_0 y el número de disponibilidad τ_c es pequeño.

Durante el periodo de caída de la tasa de absorción:

$$\tau > \tau_{crit}, \quad \rho = \rho_0, \quad \theta = 1 \quad (17)$$

Solución analítica para periodo de tasa constante de absorción y difusividad constante.

Se definen como suelos lineales aquellos en que se tiene la difusividad $D = kd\theta/d\theta$ constante y la conductividad hidráulica k lineal en θ . En este caso la solución de la ecuación (13) sujeta a las condiciones dadas por las ecuaciones (14-16) está dada por De Willigen y Van Noordwijk (1987), esta es:

$$\tau_c \theta = \tau + \frac{\rho^2}{4} - \frac{\ln \rho}{2} - \frac{3+4\rho_0^2 \ln \rho - 2\rho_0^2 - \rho_0^4}{8(1-\rho_0^2)} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n(\rho, \rho_0) \exp(-\beta_n^2 t) \quad (18)$$

Con

$$A_n(\rho, \rho_0) = \frac{\pi(1-\rho_0^2) J_1^2(\beta_n) (J_0(\beta_n \rho) Y_1(\beta_n \rho_0) - Y_0(\beta_n \rho) J_1(\beta_n \rho_0))}{2 \beta_n \rho_0 (J_1^2(\beta_n \rho_0) - J_1^2(\beta_n))} \quad (19)$$

Donde las β_n son las raíces de:

$$J_1(\beta_n r_0) Y_1(\beta_n) - J_1(\beta_n) Y_1(\beta_n r_0) = 0 \quad (20)$$

La solución describe la distribución del contenido de agua alrededor de una raíz individual que resulta de una tasa constante de absorción. En la estructura de esta solución se pueden distinguir dos partes:

Los términos que garantizan que se satisfacen las condiciones iniciales, estos tienen la forma de una caída exponencial y la serie infinita con un tiempo característico τ_d . Y los términos que garantizan que se satisfacen las condiciones de frontera y el balance de masa general, estos tienen la forma de un perfil de tiempo invariante, con el contenido de agua decreciendo linealmente.

Modelo de Nye-Tinker-Barber

En este apartado se sigue el desarrollo propuesto por Nye. P. H. y Tinker. P. B. (1977) y Tinker. P. B. y Nye. P. H. (2000). En este modelo los nutrientes son absorbidos por una sola raíz cilíndrica en una extensión infinita de suelo. La absorción de nutrientes por la raíz se considera que se produce a partir de la fase líquida, es decir de agua en el suelo. El suelo se supone que es homogéneo e isotrópico, y los cambios en las condiciones de humedad son insignificantes ya que el suelo se supone que está totalmente saturado. En este modelo también se desprecian los efectos de exudados de las raíces y la actividad microbiana, en la absorción de nutrientes por la planta y movimiento de nutrientes en el suelo. El movimiento de los nutrientes a la superficie de la raíz tiene lugar por convección debido a la absorción de agua por la planta, y por difusión de nutrientes en los iones en el agua intersticial del suelo. La relación entre el flujo entrante de nutrientes al interior de la raíz y la concentración de nutrientes en la superficie de la raíz se describe por medio de una ley heurística de Michaelis-Menten. Clásicamente la cinética de Michaelis-Menten se deriva de una reacción catalizada de la enzima más básica. Esto es compatible con la teoría de portadores de nutrientes en la cual los nutrientes son considerados para ser llevados desde superficie de la raíz través de las membranas de las células por las llamadas proteínas portadoras. Así, la ley absorción de Michaelis-Menten parece incluir las características de la vía symplasmic de nutrientes en la raíz.

Alternativamente, la ley de tipo absorción de Michaelis-Menten también podría ser derivada de manera similar a la de la isoterma de adsorción de Langmuir. Esta describe la fracción de sitios de unión de iones de nutrientes libres y ligados en una membrana o sobre una superficie sólida. Esto se traduce en lo que parece ser un tipo de equilibrio de Michaelis-Menten condición para que el número de sitios que se enlazan están acotados en un tiempo dado. Sin embargo, el modelo Nye-Tinker-Barber no considera el mecanismo exacto de la absorción de nutrientes por la raíz de la planta, sino que utiliza una medida heurística experimental tipo Michaelis-Menten, para la absorción de nutrientes.

La ecuación general para el incremento de nutrientes en el suelo en las fases líquida y sólida está dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi_l c_l + c_s) + \nabla \cdot (c_l \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\phi_l D \nabla c_l) + d_s + d_l \quad (21)$$

Donde c_s es el incremento de iones en la forma sólida, d_s es la razón de transporte de iones en la interface líquido-sólido, c_l es la concentración de nutrientes en la fase líquida del suelo, d_l es la razón de transporte de iones en la interface sólido-líquido, \mathbf{u} es el flujo de Darcy de agua en el suelo esto es volumen de flujo de agua, D es el coeficiente de difusión en la fase líquida del suelo ϕ_l es la fracción de volumen del suelo tomado por el líquido, ϕ_g es la fracción de volumen de gas, aire en el suelo, ϕ_s es la fracción de volumen del suelo en su fase sólida. La conservación del volumen del suelo da:

$$\phi_s + \phi_l + \phi_g = 1 \quad (22)$$

Es conveniente definir la porosidad del suelo como: $\phi = \phi_l + \phi_g$

Si se supone conservación de masa durante el transporte de iones interfacial, esto es, los iones que dejan la fase sólida todos pasan a la fase líquida, así que: $d_s + d_l = 0$.

Si la tasa de adsorción de la fase líquida a la fase sólida es k_a y la tasa de desorción es k_d se tiene:

$$d_s = k_a c_l - k_d c_s = \frac{(k_a/k_d)c_l - c_s}{(1/k_d)} \quad (23)$$

Donde $1/k_d$ es el tiempo de desorción. Suponiendo que $1/k_d$ es muy pequeño o sea que la desorción es muy rápida entonces se obtienen:

$$c_s = \frac{k_a}{k_d} c_l = b c_l \quad (24)$$

Donde $b = \frac{k_a}{k_d}$ se conoce como “potencia de absorción del suelo”. La ecuación (21) puede ser escrita de la manera siguiente:

$$(b + \phi_l) \frac{\partial c_l}{\partial t} + \nabla \cdot (c_l \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\phi_l D \nabla c_l) \quad (25)$$

Si se usan coordenadas polares e identificando $c_l = c$, se obtiene la siguiente ecuación:

$$(b + \phi_l) \frac{\partial c}{\partial t} - \frac{aV}{r} \frac{\partial c}{\partial r} = D \phi_l \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) \quad (26)$$

Donde a es el radio de la raíz. El flujo de agua está dado por $\mathbf{u} = -aV/r$. V es el flujo de Darcy de agua dentro de la raíz. La cantidad $D_{eff} = \frac{D_{ff}\phi_l}{\phi_l + b}$ es el coeficiente de difusión efectivo, cuando $b \gg 1$ este coeficiente se simplifica a $D_{eff} = \frac{D_{ff}\phi_l}{b}$.

La condición de frontera en la superficie de la raíz es:

$$\phi_l D \frac{\partial c}{\partial r} + Vc = \frac{F_m c}{K_m + c} - E \quad \text{en } r = a \quad (27)$$

Donde c es la concentración del nutriente en la fase líquida del suelo, F_m es el flujo máximo del nutriente dentro de la raíz, K_m es la constante de Michaelis-Menten que es igual a la concentración de nutrientes en la superficie de la raíz cuando el flujo de nutrientes dentro de la raíz es la mitad del máximo posible $E = \frac{F_m c_{min}}{K_m + c_{min}}$, donde c_{min} es la mínima concentración cuando la absorción de nutrientes por la raíz se para, y a es el radio de la raíz.

La condición inicial y la condición de frontera alejada de la raíz se establecen de la manera siguiente. En $t = 0$ se supone una distribución uniforme de nutrientes en la fase líquida del suelo. Así que las condiciones iniciales son:

$$c = c_0 \quad \text{en } t = 0 \quad \text{para } a < r < \infty \quad (28)$$

Para todos los tiempos posteriores, la condición de frontera alejada de la superficie de la raíz es:
 $c \rightarrow c_0$ cuando $r \rightarrow \infty$ para $t > 0$ (29)

Si se usan las variables sin dimensiones siguientes:

$$t = \frac{a^2(b+\phi_l)}{D\phi_l} T, \quad r = aR, \quad c = K_m C \quad (30)$$

Donde C , T y R son la concentración, tiempo y variable radial. El Modelo de Nye-Tinker-Barber es:

$$\frac{\partial C}{\partial T} - P_e \frac{1}{R} \frac{\partial C}{\partial R} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial C}{\partial R} \right) \quad (31)$$

Con las condiciones iniciales y de frontera siguiente:

$$\frac{\partial C}{\partial R} + P_e C = \frac{\lambda C}{1+C} - \epsilon \quad \text{en } R = 1 \quad (32)$$

$$C \rightarrow C_\infty \quad \text{cuando } R \rightarrow \infty \quad \text{para } T > 0 \quad (33)$$

$$C = C_0 \quad \text{en } T = 0 \quad \text{para } 1 < R < \infty \quad (34)$$

Los parámetros sin dimensiones en estas ecuaciones son:

$$P_e = \frac{aV}{D\phi_l}, \quad \lambda = \frac{F_m a}{DK_m\phi_l}, \quad \epsilon = \frac{Ea}{DK_m\phi_l}, \quad C_\infty = \frac{c_0}{K_m} \quad (35)$$

En lugar de 8 parámetros que aparecen en el modelo de Nye-Tinker-Barber inicial ahora solamente se tienen 4 parámetros. El más importante en el número de Péclet, P_e que muestra el balance entre el movimiento del agua V y la difusión $D\phi_l$ sobre la longitud típica "a", λ es el parámetro de absorción de nutrientes, C_∞ es la concentración de nutrientes alejados de la raíz y ε es el parámetro que muestra la mínima concentración cuando se para la absorción de nutrientes.

Modelos matemáticos macroscópicos para captura de agua y nutrientes por las raíces de las plantas

La utilización de una función de extracción para representar o calcular la absorción de agua por las raíces de las plantas no es nueva, sin embargo, todas las diversas funciones de extracción propuestas en la literatura son más o menos empíricas. La diferencia más importante entre los diferentes modelos de extracción del agua por la raíz, es la distribución del patrón seleccionado para la absorción para la función de extracción. Este apartado se basa en la revisión propuesta por Shankar V., Hari Prasad K. S., Ojha C. S. P. y Govindaraju R. S. (2013), así como en las referencias originales. Se muestran algunas de las funciones de extracción usadas por diversos investigadores. Los símbolos empleados se corresponden con las referencias originales. Algunas de las notaciones que son utilizadas en estos modelos y son comunes son: K , la conductividad hidráulica no saturada, L la longitud de raíces por unidad de volumen de suelo, T la tasa de transpiración por unidad de área de superficie del suelo, t el tiempo, z la profundidad debajo de la superficie del suelo, z_r la profundidad de la raíz, v la profundidad de la zona de la raíz, θ la humedad contenida por el suelo, θ_s o θ_{sat} el contenido de humedad de saturación, ψ la carga de presión, T_p la tasa de transpiración de la planta, $f(h)$ o $\alpha(h)$ es una función de la humedad del suelo y de la carga de presión, S_{max} es la tasa máxima de extracción de agua por la raíz y E_{pl} es la transpiración real. Modelos encontrados en la literatura científica para el término de absorción de agua por la raíz son:

Gardner (1964). $S = B(\delta - \tau - z)kL$ donde B es una constante, δ es el potencial de agua de las raíces y τ es el potencial de succión del suelo.

Molz y Remson (1970). $S = \frac{-1.6T}{v^2}z + \frac{1.8T}{v}$

Feddes y colaboradores (1978). $S_{max} = \frac{2E_{pl}}{z}$, es la razón máxima de extracción de agua por la raíz. Donde:

$$S = 0 \quad 0 \geq \psi > \psi_1; \quad S = S_{max} \psi_1 \geq \psi > \psi_2 \\ S = S_{max} (\psi - \psi_3) / (\psi_2 - \psi_3) \quad \psi_2 \geq \psi > \psi_3; \quad S = 0 \quad \psi_3 \geq \psi$$

Donde ψ_1 es la máxima carga hidráulica del suelo para la cual $S=S_{max}$; ψ_2 es la mínima carga hidráulica para la cual $S=S_{max}$; y ψ_3 es la carga hidráulica en wilting.

Prasad (1988).

$S(h) = \alpha(h)S_{max}$ Donde: $S_{max} = \frac{2T_j}{z_{rj}} \left(1 - \frac{z}{z_{rj}}\right)$. Donde $\alpha(h)$ es una función prescrita del soil moisture de la carga hidráulica, T_j es la transpiración del j-ésimo día y z_{rj} es la profundidad de la raíz en el j-ésimo día.

Govindaraju y Kavvas (1993). $S_{max} = \frac{E_{pot}}{z_r}$, es la razón máxima de extracción de agua por la raíz, donde:

$$S(\psi) = \alpha(\psi)S_{max}; \quad \alpha(\psi) = \exp(-\delta(\psi - \psi_b)), \quad \psi \leq \psi_b; \quad \alpha(\psi) = 0 \text{ en otros lados}$$

Donde $\alpha(\psi)$ es una función sin dimensiones la cual determina la proporción de la máxima razón de extracción de la raíz para un valor particular de ψ , E_{pot} es la razón del potencial de transpiración, ψ_b es el bubbling presión y δ es una constante de decaimiento exponencial que refleja la razón en la cual el agua permisible a la raíz se reduce cuando el suelo está seco.

Ojha y Rai (1996). $S_{max} = \alpha \left[1 - \left(\frac{z}{z_{rj}} \right) \right]^\beta$ $0 \leq z \leq z_{rj}$ donde: α está dada por: $\alpha = \frac{T_j(\beta+1)}{z_{rj}}$
 $S(h) = f(h)S_{max}$ donde α y β son parámetros del modelo y z_{ij} es la profundidad de la raíz en el j-ésimo día.

Li y colaboradores (1999). $S(h) = \alpha(h)S_{max} = \frac{K_{z_1-z_2}PT_j}{|z_1-z_2|}$, donde: PT_j el el potencial de transpiración en el j-ésimo día y $K_{z_1-z_2}$ es la fracción de la longitud de la raíz total entre las profundidades z_1 y z_2 para un área dada.

Lai y Katul (2000). $S(\theta, z, t) = \alpha(\theta)g(z)E_p(t)$, donde: $\alpha(\theta)$ es la función de eficiencia de la raíz, $g(z)$ es una función de densidad de la raíz y $E_p(t)$ el potencial de transpiración.

Kang y colaboradores (2001). $S(z, t) = f(\theta)T_p(t) \frac{1.8e^{-1.8z/z_r}}{(1-e^{-1.8})z_r}$, donde: $f(\theta)$ es un término sin dimensiones que varía entre 0 y 1, como una función del contenido de agua del suelo, $T_p(t)$ es la razón del potencial de transpiración, z_r es la profundidad en la zona efectiva de la raíz.

Dogan y Motz (2005). $W_r(h, z, t) = \left(1 - \left[\frac{h_{fc}-h}{h_{fc}-h_{wp}} \right]^{C_3/T_p} \right) \left(\frac{\ln C_d}{C_d^{z_r}-1} T_p \right) C_d^z$ si $h \leq h_{fc}$, y
 $W_r(h, z, t) = 0$, si $h \geq h_{fc}$, donde: $W_r(h, z, t)$ es el término de absorción de agua por la raíz, h_{fc} y h_{wp} son las cargas hidráulicas en la capacidad del campo y en el punto de marchitamiento del suelo alrededor de la raíz, h es la carga hidráulica alrededor de la zona de la raíz, C_d es el coeficiente de cultivo del suelo ($0.1 < C_d < 1$) y C_3 es el parámetro que define la forma de la función de estrés hídrico.

6.3 Conclusiones

En este trabajo se presentan modelos matemáticos para absorción de agua y nutrientes por las raíces de las plantas. Estos modelos están divididos en dos grandes grupos; modelos microscópicos y modelos macroscópicos. Los modelos microscópicos describen la razón de captura de agua y nutrientes en función de una longitud representativa de la raíz y entonces multiplican esta razón de captura por la longitud total de la raíz, los modelos macroscópicos toman en cuenta la arquitectura de la raíz y de esta en su totalidad como un sumidero. Fueron desarrollados dos modelos microscópicos, uno para la captura de agua por la raíz desde una capa cilíndrica del suelo y el modelo de Nye-Tinker-Barber, en el primer caso se formuló el modelo, las condiciones iniciales y de frontera que se deben de satisfacer y se muestra una solución analítica para un caso particular debida a De Willigen y Van Noordwijk, en el segundo caso se desarrolló el modelo, este es para captura de agua y nutrientes por la raíz de una planta, se mostró la ecuación diferencial que lo gobierna así como las condiciones iniciales y de frontera que se deben satisfacer.

En el caso de los modelos macroscópicos el punto de partida es la ecuación diferencial de Richards, la diferencia entre los modelos usados por los diferentes investigadores es el término de absorción de agua y nutrientes por la raíz de las plantas, el cual se considera en la ecuación de Richards como un sumidero, se estudiaron las funciones de sumidero para varios modelos macroscópicos. Se encuentra que los modelos matemáticos usados en la absorción de agua por la raíz de las plantas han incrementado su grado de complejidad, también se encontró que en el cálculo de los parámetros usados en los modelos se toman en cuenta bases y principios de la Física basados en mediciones experimentales. La factibilidad que brindan los modelos macroscópicos en la medición de los parámetros involucrados hace que este tipo de modelos sean los más usados en comparación con los modelos microscópicos.

6.4 Referencias

- Barber. S. A. (1984). *Soil Nutrient Bioavailability. A Mechanistic Approach*. A Wiley-Interscience Publication, New York.
- De Willigen, P., Nielsen, N. E., Slaassen, N., Castrignan,: (2000). A. M. Modelling water and nutrient uptake. In: Smit A. L., Bengough G., Engels C., van Noordwijk M., Pellerin S., van de Geijn S. (eds.) *Root Methods: Handbook*. Springer, Berlin.
- Dogan, A., and Motz, L.H., (2005a). Saturated-Unsaturated 3D groundwater model. I: Development. *Journal of Hydrologic Engineering*, 10(6), pp. 492–504.
- Feddes, R.A., Kotwalik, P.J., and Zaradny, H., (1978). *Simulation of field water use and crop yield*. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, The Netherlands.
- Gardner, W.R., (1960). Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Science*, 89, pp. 63–73.
- Gardner, W.R., (1964). Relation of root distribution to water uptake and availability. *Agronomy Journal*, 56, pp. 41–45.
- Govindaraju, R.S., and Kavvas, M.L., (1993). Development of an approximate model for unsaturated flow with root water uptake under rectangular water content profiles assumption. *Journal of Hydrology*, 146, pp. 321–339.
- Hillel, D. (1980). *Applications of Soil Physics*. Academic Press, New York. pp. 385
- Kang, S., Zhang, F., and Zhang, J., (2001). A simulation model of water dynamics in winter wheat field and its application in a semiarid region. *Agricultural Water Management*, 49, pp. 115–129.
- Lai, C.T., and Katul, G., (2000) The dynamic role of root water uptake in coupling potential to actual transpiration. *Advances in Water Resources*, 23, pp. 427–439.
- Li, K.Y., Boisvert, J.B., and Jong, R. De, (1999). An exponential root water uptake model. *Canadian Journal of Soil Science*, 79, pp. 333–343.
- Molz, F.J., and Remson, I., (1971). Application of an extraction term model to the study of moisture flow to plant roots. *Agronomy Journal*, 63, pp. 72–77.

- Nye, P. H. and Tinker, P. B. (1977). *Solute Movement in the Soil-Root System*. Blackwell Scientific Publications.
- Ojha, C.S.P., and Rai, A.K., (1996). Nonlinear root water uptake model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 122, pp. 198–202.
- Prasad, R., (1988). A linear root water uptake model. *J. of Hydrology*, 99, pp. 297–306.
- Raats, P. A. C., (2007). Uptake of water from soils by plant roots. *Transp Porous Med*, 68, pp. 5-28.
- Roose T (2000) Mathematical model of plant nutrient uptake. Thesis, D. Phil. Oxford University.
- Shankar V., Hari Prasad K. S., Ojha C. S. P. y Govindaraju R. S. (2013). Optimizing Water Use in Irrigation-A review. *J. of the Indian I. of Science: Vol, 93:2*, pp. 209-225.
- Tinker, P. B. and Nye, P. H. (2000). *Solute Movement in the Rhizosphere*. Oxford University Press.

Análisis de residuos de plaguicidas organoclorados y organofosforados en leche cruda por CG-MS

GÓMEZ-XICOTÉNCATL, Teresita[`], MIRANDA-CRUZ, Edith^{``}, OLVERA-PÉREZ, Ma. Antonia^{```}
y RODRÍGUEZ-BLANCO, Lili^{^^}

T. Gómez, E. Miranda, M. Olvera y L. Rodríguez

[`]División Académica de Ciencias Biológicas-UJAT. Km. 0.5 de la Carretera Villahermosa-Cárdenas, entronque con Bosques de Saloya,

^{``}Centro de Investigación en Ciencias Agropecuarias (CICA)-UJAT. Carretera Villahermosa-Teapa, Km. 25. Villahermosa, Tabasco, México

^{```}Colegio de Postgraduados-Campus Montecillos, Estado de México.

tere_87_86@hotmail.com

D. Sepúlveda, R. Salazar, F. Pérez y J. Rocha (eds.) Ciencias Químicas y Matemáticas-©ECORFAN, Texcoco de Mora-México, 2015.

7 Introducción

Un plaguicida es una sustancia química o mezclas de sustancias usado con la intención de mitigar, reducir o eliminar el impacto de las plagas en la producción agropecuaria y en las campañas de salud pública entre otros (NOM-232-SSA1-2009). La FAO/OMS (2003) la define como “Cualquier sustancia, o mezcla de sustancias, destinada a prevenir o controlar toda especie indeseable de plantas o animales; es también cualquier sustancia, o mezcla de sustancias, utilizada como defoliante, desecante o reguladora del crecimiento vegetal. Incluye, además, cualquier sustancia que se emplee para combatir plagas durante la producción, almacenamiento, transporte, comercialización o elaboración de alimentos para el hombre y los animales, o se administra a estos últimos para combatir insectos o arácnidos que se encuentren dentro o sobre sus cuerpos. El término no se aplica a los antibióticos y otros productos químicos administrados a los animales con otros fines, como el de estimular su crecimiento o modificar su comportamiento reproductivo, ni a los fertilizantes”.

A pesar del auge que ha tenido la llamada “agricultura orgánica” o “agricultura limpia” en los últimos años, y de que varios de los plaguicidas más tóxicos han sido retirados del mercado, la producción agropecuaria mundial depende aún de una alta proporción en el uso de plaguicidas con el fin de controlar insectos, hongos o plantas que afectan negativamente o compiten con los animales y los cultivos. La utilización de estas sustancias químicas ha permitido un notable incremento en el rendimiento y la producción agrícola y pecuaria, sin embargo el precio que la salud humana y ambiental han pagado, debe ser considerado antes de continuar con su uso indiscriminado (Morales y Rodríguez, 2004).

Diversos estudios señalan que la principal fuente de residuos de plaguicidas en la dieta humana, son los productos contaminados de origen animal y/o vegetal; lo cual es el reflejo de los altos niveles de pesticidas que se usan en la producción agropecuaria, con el agravante de que muchos de ellos se acumulan en el tejido adiposo de los animales, afectando no sólo a estos últimos sino también a su progenie y a los humanos (De la Riva y Andon, 1991; Ramón y Martínez, 2001; Sweeney, 2002).

Los plaguicidas organoclorados (POC) son contaminantes universalmente extendidos, detectables en casi todos los sistemas biológicos debido a su alta estabilidad y liposolubilidad (Zumbado et al., 2004). La contaminación de los alimentos por residuos de plaguicidas organoclorados es consecuencia directa o indirecta del uso de dichas sustancias para el control de plagas que afectan a los cultivos o al ganado y de aquellas que constituyen problemas de salud pública. Cuando el ganado lechero ha estado expuesto a estas sustancias ya sea ambientalmente o a través de los alimentos, las elimina lentamente con la leche y esta secreción puede continuar durante días o semanas después de que la exposición ha cesado. Debido a su estabilidad, tanto los plaguicidas como subproductos de degradación química y bioquímica, aparecen también en los derivados de la leche y se acumula en el tejido adiposo humano (Albert y Reyes, 1978; Yaggen et al., 2003).

Los plaguicidas organoclorados (POC) y organofosforados (POP) son considerados contaminantes ambientales, principalmente los POC, debido a sus propiedades de toxicidad, estabilidad, persistencia y capacidad de bioacumulación en la cadena trófica; estas propiedades dan lugar a la contaminación de aguas, suelos y aire, además de producir determinados efectos secundarios en diversos sistemas biológicos (plantas, animales y humanos). Los residuos de estos compuestos pueden llegar a zonas alejadas del área de aplicación a través de su arrastre por el viento, cursos de aguas continentales o de corrientes marinas o a través de la cadena trófica (Ravelo, 2009).

Diversos estudios señalan la principal causa de contaminación de alimentos por POC y POP se debe a las propiedades fisicoquímicas particulares de estas sustancias, como es su liposolubilidad y persistencia; que asociadas al uso excesivo y poco regulado de estos compuestos en las prácticas agropecuarias, existe la posibilidad de bioacumulación en los tejidos grasos de los animales, incluyendo la producción de leche (Romero et al., 2005).

Cabe mencionar que entre las principales causas de contaminación de leche y productos ricos con residuos de POC y OP, figuran los alimentos para uso animal (pradera, heno, concentrado, ensilaje, otros); control de parásitos en el animal; control de insectos en los establos; contaminación ambiental (agua, aire, suelo), entre otras (Bro-Rasmussen et al., 1968; Blüthgen et al., 1984; Luquet et al., 1974; Pinto et al., 1987).

La posibilidad de que existan residuos de POC y POP en diversos alimentos, y el auge sobre la seguridad alimentaria y la demanda de la sociedad de consumir alimentos sanos y libres de plaguicidas, hace necesario la implementación de métodos analíticos que permitan determinar residuos de estos compuestos a niveles de traza, pues la ingestión de alimentos es una vía de exposición de los consumidores a los plaguicidas. Por consiguiente, los métodos analíticos deben tener una elevada reproducibilidad, particularmente en el análisis de trazas multiresiduos, donde se determinan más de tres analitos simultáneamente

En este trabajo se evaluaron tres métodos para determinar el contenido de residuos de POC y POP utilizados en el control de plagas en el sector agropecuario, como son los animales productores de leche. Para ello se estudiaron muestras de leche cruda de vaca enriquecidas con plaguicidas utilizados en este sector, y se determinaron mediante la técnica analítica de cromatografía de gases acoplado a un detector de espectrometría de masas (CG-MS).

7.1 Materiales y métodos

Muestreo y preparación de muestra compuesta.

Durante el mes de octubre de 2013 se realizó la colecta de muestras de leche cruda para constituir la muestra compuesta, para ello se seleccionaron dos sitios de muestreo que fueron elegidos al azar en el municipio de Huimanguillo, Tabasco. Se consideró este municipio debido a su importancia en la producción de leche de vaca en el estado. De cada sitio de muestreo se colectó 1 L de leche y se trasladó al Laboratorio donde se mezclaron hasta su completa homogeneidad, después se procedió a su conservación en refrigeración previo a su análisis. Las muestras fueron recolectadas de acuerdo a las condiciones de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-ZOO-1995.

Selección del método analítico

Para la extracción de los POC y POP en leche cruda de vaca se estudiaron tres métodos con la finalidad de elegir el método más conveniente para el análisis de este tipo de muestras, con un alto contenido en grasas, por CG-MS. Los métodos estudiados fueron los propuestos por Ashnagar et al. (2009), In-Seek et al. (2012) y Kent (1976), a los cuales se les denominó Método A, B y C respectivamente. Los métodos A y C se basan en una extracción líquido-líquido (LLE), mientras que el Método B se sustenta en una extracción en fase sólida (SPE).

Extracción, limpieza y pre-concentración de muestras

Por cada método estudiado se prepararon por triplicado muestras compuestas y un blanco de referencia que se enriquecieron con una concentración de 0.4 ppm del patrón estándar interno, PSI, (d6 α -HCB, d10 Paratión y Trifenilfosfato). Posteriormente, cada muestra fue sometida al proceso de extracción, limpieza y pre-concentración según lo establecido en los Métodos A, B y C. Los extractos obtenidos se analizaron por CG-MS; y a partir de los cromatogramas se calculó la desviación estándar relativa, RSD (%), ecuación 1, que representa la precisión del métodos; y el porcentaje de recuperación del patrón estándar (reproducibilidad), ecuación 2.

$$\text{RDS (\%)} = \frac{\text{área del pico del analito}}{\text{área del pico del PSI}} \quad (1)$$

$$\% \text{ RECUPERACIÓN} = \frac{\text{analito encontrado}}{\text{analito puesto}} \times 100 \quad (2)$$

Cuantificación de POC y POP por CG-MS

Para el análisis de POC y POP de los extractos obtenidos de leche cruda se utilizó la técnica de cromatografía de gases (CG) acoplado a un espectrofotómetro de masas (MS); marca Agilent Technologies, Modelo 7890A (G3440A), Serie us13171005. Se utilizó una columna capilar VF-17ms, de 30 m de longitud, 0.25 mm d.i. y 0.25 μ m df, con 8.75 psi constante. El gas acarreador fue helio UAP, con un flujo de 1 mL/min; el inyector se utilizó en modo Splitless a 280 °C, con una presión inicial de 50 psi y una presión final de 8.75 psi, el volumen de inyección fue de 1 μ L. El horno utilizó una rampa de 100-325 °C con un tiempo total de 60 min. El detector utilizó una trampa de 220 °C, una línea de transferencia de 280 °C y un manifold de 50 °C.

7.2 Resultados y discusión

Porcentaje de la RSD (%) del PSI

Los extractos de las muestras compuestas obtenidos mediante el proceso de extracción, limpieza y pre-concentración, según lo indicado en los protocolos de los Métodos A, B y C, se analizaron por GC-MS. A partir de los cromatogramas obtenidos se integraron las señales analíticas (área del pico del analito/área del pico del patrón estándar interno) y se calculó la desviación estándar relativa- RSD (%), con la finalidad de obtener la precisión de los métodos estudiados. En la tabla 7 se muestran los valores de la RSD (%) obtenidos para el PSI.

Tabla 7 Valores de RSD (%) en las muestras compuestas (MC) de leche cruda enriquecida con el patrón estándar interno (PSI) para el análisis de POC y POP por GC-MS

PSI	Método A	Método B	Método C
	RSD (%)		
d6 α -HCB	3.1077	2.3551	2.3551
d10- Paratión	2.3551	1.1746	1.1766
Trifenilfosfato	2.0362	1.1766	1.1775

Con base en los datos de la tabla 7.1 se observa que el valor de RSD (%) para el PSI es muy similar entre los tres métodos estudiados, siendo ligeramente mayor en el Método A; mientras que los métodos B y C presentan valores de RSD (%) menores para el caso de los tres analitos del PSI (d6 α -HCB, d10- Paratión y Trifenilfosfato). Por lo tanto, el método A podría considerarse no adecuado en el caso del analito d6 α -HCB, debido a que el valor de %RSD es mayor al valor de rechazo (%RSD=2.5).

Al comparar estos valores entre los tres métodos puede concluirse que la pérdida de analitos por las diversas etapas de LLE y la retención de los analitos por el solvente (SPE) y su elución, no son etapas cruciales en la pérdida de la reproducibilidad de los métodos.

Porcentaje de Recuperación del PSI

La validez de cada método se realizó determinando los valores de recuperación del PSI a un nivel de concentración de 0.4 ppm. En el Cuadro 2 se indican los valores de recuperación para la muestra compuesta por los tres métodos estudiados. Como se observa el valor del % de recuperación es aceptable para los tres métodos estudiados. Por lo tanto las etapas de preparación, extracción, limpieza y pre-concentración de las muestras no influyen significativamente en la determinación de POC y POP en muestras de leche cruda.

Tabla 7.1 Porcentaje de Recuperación (%R) en la muestra compuesta (MC) de leche cruda enriquecida con el patrón estándar interno (PSI) a una concentración de 0.4 ppm para el análisis de POC y POP

	Método A	Método B	Método C
PSI	% Recuperación		
d6 α -HCB	100.3 \pm 0.31	100.1 \pm 0.24	100.1 \pm 0.24
d10- Paratión	100.1 \pm 0.24	100.3 \pm 0.12	100.2 \pm 0.12
Trifenilfosfato	100.2 \pm 0.20	100.2 \pm 0.12	100.1 \pm 0.12

Costo y Tiempo de Análisis

En la selección de un método analítico para la determinación de residuos contaminantes en alimentos, diversos autores mencionan que desde el inicio del proceso de extracción, limpieza y pre-concentración del analito, hasta su detección y cuantificación analítica, es importante que se consideren otros elementos como son el tipo y número de reactivos (sales, polímeros y solventes), la cantidad de cada reactivo, el costo y tiempo de análisis (Juan et al., 2003; Robles et al., 2010). Por lo anterior, con base en los valores de precisión (%RSD) y reproducibilidad (%Recuperación) se procedió a definir estos elementos en los métodos A, B y C (Tablas 7.1 y 7.2).

Con base en los parámetros indicados para cada uno de los métodos estudiados (Cuadro 3 y 4), se observa que el método B, en comparación con los métodos A y C, requiere de cantidades pequeñas de reactivos y de fácil acceso y con un nivel de riesgo no peligroso, un menor número de materiales y un tiempo de análisis de relativamente corto (1 hora). Por consiguiente, el método B es adecuado para la preparación de muestras de leche cruda y además manifiesta valores de RSD (%) y %Recuperación aceptables.

Tabla 7.2 Reactivos empleados en la extracción, limpieza y pre-concentración de muestras de leche cruda en cada método estudiado

Método	Reactivos	Cantidad total empleada	Peligrosidad (a, b, c)
A	Éter de petróleo	170.1 mL	1, 4, 0
	Acetonitrilo	100.05 mL	2, 3, 1
	Oxalato de potasio	50 g	3, 3, 1
	Na ₂ SO ₄ anhidro	70 g	3, 0, 1
	Metanol	50 mL	3, 3, 0
	NaCl	20 g	-----
	Éter dietílico	100 mL	2, 4, 1
	Hexano	70 mL y Cantidad suficiente (lavar material)	1, 3, 0
B	Acetona	Cantidad suficiente (lavar material)	1, 3, 0
	Metanol	Cantidad suficiente (lavar material)	3, 3, 0
	Hexano	Cantidad suficiente (lavar material)	1, 3, 0
	MgSO ₄	5.5 g	1, 0, 0
	Celite	0.5 g	1, 0, 0
	PSA	0.6 g	2, 0, 0
	C-18	0.7 g	0, 1, 0
	NaAC	1.5 g	-----
	Acetonitrilo	15 mL	3, 3, 1
	Tolueno	1200 µL	2, 3, 0
C	Oxalato de potasio	10 g	3, 0, 1
	Metanol	100 mL	3, 3, 0
	Éter de petróleo	345 mL	1, 3, 0
	Na ₂ SO ₄	60 g	1, 4, 0
	Acetonitrilo	95 mL	3, 3, 1
	Hexano	Cantidad suficiente (lavar material)	1, 3, 0
	Éter etílico	50 mL	2, 4, 1

Tabla 7.3 Instrumentos, equipos, materiales y tiempo utilizados para el análisis de muestras de leche cruda según lo indicado en cada método

Método	Instrumentos y equipos empleados	Materiales en general	Tiempo de análisis
A	• Parrilla con agitación	• Vaso de precipitado (1000, 500 y 100 mL)	5 h 11 min
	• Agitador de tubos	• Desecador	
	• Micropipetas (100-1000 μ L)	• Matraz Erlenmeyer (250 mL)	
	• Evaporador rotatorio	• Embudo de vidrio	
	• Homo de secado y esterilización	• Vidrio de reloj	
	• Balanza analítica	• Lana de vidrio	
	• Campana de extracción	• Embudo de separación (500 mL)	
		• Probeta (10, 50 y 100 mL)	
		• Matraz aforado (1000, 500, 100 mL)	
		• Gradilla	
		• Matraz de bola	
		• Soporte universal	
		• Anillo metálico	
		• Espátula	
		• Varilla de vidrio	
		• Termómetro	
• Gel de sílice			
• Viales			
• Puntas Pasteur			
• Sanitas			
• Columna de cromatografía			
B	• Agitador de tubos	• Vaso de precipitado (1000 y 100 mL)	1 h
	• Micropipetas (10, 100 y 1000 μ L)	• Espátulas	
	• Balanza Analítica	• Tubos de centrifuga de 50 y 15 mL	
	• Centrifuga	• Vidrio de reloj	
	• Campana de extracción	• Viales	
	• Evaporizador	• Termómetro	
C	• Parrilla con agitación	• Puntas Pasteur	6 h 58 min
	• Agitador de tubos	• Vaso de precipitado (1000, 100 mL)	
	• Micropipetas (100-1000 μ L)	• Vidrio de reloj	
	• Centrifuga	• Columna de cromatografía	
	• Evaporador rotatorio	• Lana de vidrio	
	• Balanza analítica	• Embudo de separación (500 mL)	
	• Campana de extracción	• Tubos de centrifuga (15 mL)	
		• Probeta (10 y 100 mL)	
		• Matraz aforado (500 mL)	
		• Gradilla	
		• Matraz de bola	
		• Espátula	
		• Viales	
		• Sanitas	
		• Papel filtro	
• Soporte universal			
• Anillo metálico			
• Embudo Buchner			

Conjuntamente si se compara la extracción líquido-líquido, LLE (Método A y C) con la extracción en fase sólida, SPE (Método B); ésta última ofrece mayor ventaja con relación a la LLE, pues se caracteriza por requerir menor cantidad de muestra, menos consumo de disolventes orgánicos y una mejora significativa en porcentajes de recuperación y límites de detección; y además es muy utilizada para la extracción de POP (Juan et al., 2003; Romero et al., 2005).

7.3 Conclusiones

Con base en los objetivos establecidos en la presente investigación se concluye que el Método B es el más adecuado para el análisis por GC-MS de residuos de plaguicidas organoclorados y organofosforados en leche cruda de vaca, dado sus valores de precisión (1.1746 y 2.3551 %RSD), reproducibilidad (100.1 ± 0.24 y 100.3 ± 0.12 % Recuperación), costo y tiempo de análisis (1 h).

El empleo de la técnica de extracción en fase sólida (SPE) para la extracción, limpieza y pre-concentración de analitos en una sola etapa, redujo el tiempo de análisis, la cantidad de solventes utilizados y por lo tanto el costo.

La valoración de métodos analíticos es necesaria para el monitoreo de residuos de POC y POP en leche cruda, y, principalmente, en muestras de alimentos dada la cantidad y tipo de solventes utilizados para la extracción de estos plaguicidas en muestras con alto contenido en grasas.

7.4 Referencias

Albert, L.A., R. Reyes. (1978). Plaguicidas organoclorados II. Contaminación de algunos quesos mexicanos por plaguicidas organoclorados, *Rev. Soc. Quim. Méx.* 22 (2): 65-72.

Ashnagar, A.; Gharib, N, & Cheragh, F. (2009). Determination of organochlorine pesticides residues in cow's milk marketed in Ahwaz city of Iran. *International Journal of Pharm Tech Research.* 1, 247-251.

Blüthgen, A., W. Heeschen, H. & Nijhuis M. (1984). Residues and contaminants in milk and milk products. En: *Challenges to Contemporary Dairy Analytical Techniques*-University of Reading. England, Special publication N° 49: 206-235.

Bro-Rasmussen, F., S.V. Dalgaard, T.M. Jakobsen, S.V. Rock, F. Rodin, E. Uhl, K. Valdamm-Clausen. (1968). Examination of Danish milk and butter of contaminating organochlorine insecticides, *Residues Rev.* 23, 55-69.

De la Riva, C., & Andon, A. (1991). Organochlorine pesticides in cow's milk from agricultural region in northwestern Spain. *Bull Environ Contamin Toxicol.* 46:527-533.

FAO/OMS. FOOD and Agriculture Organization of the United Nations. (2003). Código Internacional de Conducta para la Distribución y Utilización de Plaguicidas. FAO, ROMA. 2003. [text at: http://www.fao.org/fileadmin/templates/agphome/documents/Pests_Pesticides/Code/Spanish.doc].

In-Seek, J., Byung-Man, K, Jang-Hyuk, A., & Seung-Hwan, J. (2012). Determination of pesticide residues in milk using a QuEChERS- based method developed by response surface methodology. *Elsevier. Food Chemistry.* 133 (2), 473-481.

- Juan, A., Picó, Y., & Font, G. (2003). Revisión de los métodos de determinación de residuos de plaguicidas organofosforados en alimentos. *Revista de Toxicología*, 20 (3), 166-175.
- Kent, H. 1976. Gas chromatographic analysis of pesticides. pp. 8-9, 20-21.
- Luquet, F.M., J. Goursand, & J. Casalis. (1974). Les résidues de pesticides organoclorés dans les laits animaux et humanis, *Le Lait*, 54: 269-301.
- Morales, C.A. & Rodríguez, N. (2004). El Clorpirifos: posible disruptor endocrino en bovinos de leche. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. Rev Col Cienc Pec. 17(3), 255-266.
- Norma Oficial Mexicana NOM-005-STPS-1998. Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo para el manejo, transporte y almacenamiento de sustancias químicas peligrosas.
- Norma Oficial Mexicana NOM-010-STPS-1999. Condiciones e higiene en los centros de trabajo donde se manejen, transporten, procesen o almacenen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el ambiente laboral.
- Norma Oficial Mexicana NOM-018-STPS-2000. Sistema para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-ZOO-1995. Análisis de residuos de plaguicidas organoclorados y bifenilos policlorados en grasa de bovinos, equinos, porcinos, ovinos y aves por cromatografía de grasas.
- Norma Oficial Mexicana NOM-026-STPS-2008. Colores y señales de seguridad e higiene, e identificación de riesgos por fluidos conducidos en tuberías.
- Norma Oficial Mexicana NOM-028-STPS-2004. Sistema para la administración del trabajo-seguridad en los procesos y equipos críticos que manejen sustancias químicas peligrosas.
- Norma Oficial Mexicana NOM-232-SSA1-2009. Que establece los requisitos del envase, embalaje y etiquetado de productos para uso agrícola, forestal, pecuario, jardinería, urbano, industrial y doméstico.
- Pinto, M., Montes, L., Tamayo, R., & Cristi R. (1987). Determinación de residuos de pesticidas organoclorados en grasa perirrenal de bovinos. *Agrosur*, 15, 62-74.
- Ramón, A., & Martínez, H. (2001). Residuos de Aldrin, Lindano y Heptaclor en leches esterilizadas. *Diaeta*, 94, 15-21.
- Ravelo-Pérez, L.M. (2009). Metodologías analíticas alternativas para la determinación de plaguicidas en aguas y productos agroalimentarios. Tesis doctoral. 265 p.
- Robles-Molina, J., García-Reyes, J.F., & Molina-Díaz, A. (2010). Protocolo de técnicas de muestreo y técnica analíticas de contaminantes emergentes y prioritarios. *Consolider tregua*. pp. 1-64.

Romero-Blanco, E, Meza-Núñez, H, & Poveda-Calvo, V. (2005). Metodología para la determinación de residuos de plaguicidas organofosforados en leche de consumo nacional mediante cromatografía de gases y extracción en fase sólida. *Tecnología en marcha*. 18 (2), 103- 106.

Sweeney, T. (2002). ¿Is exposure to endocrine disrupting compounds during fetal/post-natal development affecting the reproductive potential of farm animals? *Dom Anim Endocrinol.*, 23 (1-2), 203-209.

Yaggen, D., Crissman, C., & Espinosa, P. (2003). Los plaguicidas: impactos en producción, salud y medio ambiente en Carchi, Ecuador. CIP e INIAP. pp. 51.

Zumbado, M., Goethals, M., Álvarez, E.E., Luzardo, O.P., Serra, L., Cabrera, F., & Domínguez-Boada L. (2004). Exposición inadvertida a plaguicidas organoclorados (DDT y DDE) en la población de las Islas Canarias. *Ecosistemas* 13 (3), 51-58.

Alcoholes de cadena larga y b-sitosterol DE *Thalictrum hernandezii* Tausch ex. J. Presl.

ZULETA-PRADA, Holber, CHÁVEZ-SAN-AGUSTIN, Rodrigo, REYES-TREJO, Benito y GUERRA-RAMÍREZ, Diana

H. Zuleta, R. Chávez, B. Reyes y D. Guerra

Laboratorio de Productos Naturales, Área de Química, Departamento de Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carretera México Texcoco. Texcoco, Estado de México, 56230, México.
hozuleta_13@hotmail.com

D. Sepúlveda, R. Salazar, F. Pérez y J. Rocha (eds.) Ciencias Químicas y Matemáticas-©ECORFAN, Texcoco de Mora-México, 2015.

8 Introducción

México es un país privilegiado por la variabilidad de la vida que existe en su territorio, expresada en la diversidad de ecosistemas, de especies y la variación entre éstas, haciéndolo un país megadiverso, cuenta con más de 26000 especies de plantas ubicándolo en el cuarto lugar a nivel mundial, de éstas alrededor de 10000 son plantas vasculares endémicas (CONABIO, 1998). La existencia de una gran variedad de agroecosistemas, engloba miles de especies conocidas y otras desconocidas resguardadas aún por la naturaleza misma. Se estima que más de 118 especies de plantas han sido domesticadas en nuestro país (Hernández, 1993), algunas de gran importancia alimenticia para el mundo como el maíz (*Zea mays*), frijol (*Phaseolus vulgaris*) y el jitomate (*Solanum lycopersicum* L.), motivo de estudio en diferentes centros de investigación agrícola de México y el mundo, para mejorar las técnicas de producción, mejoramiento genético para la creación de nuevas variedades con mejores rendimientos, calidad y resistencia a plagas y enfermedades. Algunas otras son de utilidad en la medicina, por citarse algunas: el barbasco (*Dioscorea mexicana*) planta que revolucionó la industria farmacéutica en la síntesis de fármacos esteroideos, la yerba del sapo (*Eryngium heterophyllum*), el ahuehuate (*Taxodium mucronatum*), la dalia (*Dahlia spp.*), entre otras, éstas dos últimas emblemas nacionales.

Las sociedades prehispánicas (Tuz, 2009) dieron a conocer la utilidad de miles de plantas con diferentes usos. Un ejemplo es la herbolaria, actualmente usada por los médicos indígenas y la sociedad en general, con el peligro de ser eliminada por la deforestación, la erosión, la recolección desmedida, la contaminación, entre otros peligros (Mendoza, 2008). Aunado a esto, el conocimiento tradicional tiende a perderse en la misma medida (Monroy y Ayala, 2003). La investigación actual sobre el uso de plantas medicinales forma parte de la Etnobotánica; La cual, por su naturaleza interdisciplinaria abarca muchas áreas, incluyendo: Botánica, Química, Medicina, Farmacología, Toxicología, Nutrición, Agronomía, Ecología, Sociología, Antropología, Lingüística, Historia y Arqueología, entre otras; lo cual permite un amplio rango de enfoques y aplicaciones (Bermúdez *et al.*, 2005). Una aplicación es la participación de la Etnobotánica como una metodología indispensable para la selección de plantas en la búsqueda de compuestos con actividad biológica, y que no han sido sometidas a estudios fitoquímicos y farmacológicos previos, así como también a las especies que únicamente se les han realizado estudios parciales del mismo tipo. Dentro de los estudios fitoquímicos, la caracterización de las estructuras químicas de sus principios activos puede servir de modelo para la fabricación de drogas sintéticas y tales principios se pueden utilizar como marcadores taxonómicos en la búsqueda de nuevos medicamentos (Bermúdez, *et al.*, 2005). El interés actual en la herbolaria y la búsqueda de opciones terapéuticas complementarias tiene sus raíces en una creciente insatisfacción hacia la medicina convencional, tanto por su falta de éxito en la cura de algunas enfermedades como por los efectos colaterales que ciertos medicamentos acarrearán, entre otros aspectos por las cualidades medicinales que favorecen a la salud humana de manera más natural. También influye el aspecto económico, las plantas medicinales aún constituyen el recurso más conocido y accesible para grandes núcleos de la población mexicana, ocasionando una revalorización y uso de los saberes étnicos (Monroy y Ayala, 2003). Sin duda alguna las plantas medicinales siguen siendo una fuente de estudio vigente e invaluable para el desarrollo de prototipos de medicamentos en un esquema de aprovechamiento racional y uso sustentable de las especies vegetales.

Ante este panorama y tomando como punto de partida la diversidad del recurso vegetal disponible en el territorio mexicano, el laboratorio de Productos Naturales del Departamento de Preparatoria Agrícola, se ha enfocado en fortalecer la investigación en Fitoquímica de plantas que se les atribuya algún uso medicinal, las cuales hayan sido poco estudiadas o principalmente no tengan ningún estudio de este tipo.

Dentro de las numerosas especies que podrían ser consideradas, se visualizó llevar a cabo el aislamiento, purificación y determinación estructural de algunos constituyentes de las partes aéreas de *Thalictrum hernandezii*. Esta planta ha sido utilizada alrededor del mundo y en la medicina tradicional mexicana para aliviar los ojos inflamados, mitigar el calor y el dolor de los riñones (Ortíz, 1993). Sin embargo su estudio fitoquímico ha sido parcial, hasta hace algunos años sólo se describió la presencia en la raíz del alcaloide hernandezina (Padilla y Herrán, 1962). El propósito de este trabajo fue determinar la composición química de los metabolitos del extracto hexánico de las partes aéreas de *Thalictrum hernandezii* Tausch ex. J. Presl.

8.1 Materiales y métodos

Material vegetal

La colecta del material vegetal tuvo lugar en un área que pertenece al municipio de San Pedro Arriba, Estado de México en la dirección Carretera a Temoaya, en las coordenadas latitud 19° 29.490' norte y longitud 99° 32.907' oeste, a una elevación de 2 798 msnm.

La clasificación de la especie se llevó a cabo en el Herbario-Hortorio “Jorge Hernández Espinoza” del Área de Biología, del Departamento de Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), con la colaboración de la M. C. Ernestina Cedillo Portugal, donde también se resguardó un ejemplar con el N° 25187.

Reactivos y disolventes

Los disolventes: hexano, acetato de etilo, diclorometano, metanol y acetona, se destilaron por los métodos convencionales. Los reactivos químicos fueron obtenidos de Aldrich y la mayoría fueron utilizados sin purificación adicional.

Seguimiento y purificación de productos

El seguimiento de las reacciones se llevó a cabo por cromatografía de capa fina, en cromatoplasmas de gel de sílice 60 (ALUGRAM® SIL G/UV₂₅₄), la visualización se realizó con luz ultravioleta en lámpara de UV Mineral Light, también se usó como revelador el ácido fosfomolibdico por calentamiento de las cromatoplasmas. La cromatografía flash por columna para purificación de los compuestos se realizó sobre gel de sílice 60 (0.040-0.063 mm., malla 230-4000 ASTM) como fase estacionaria.

Análisis físico y espectroscópico de los productos obtenidos

Los puntos de fusión fueron medidos con un aparato Fischer-Johns y no fueron corregidos. Los espectros de infrarrojo fueron obtenidos en un espectrofotómetro de Infrarrojo FT IR tipo ATR marca Cary 630 Agilent. Los espectros Resonancia Magnética Nuclear de protón y carbono (^1H RMN y ^{13}C RMN) se determinaron mediante un espectrómetro a 400 MHz modelo 400 MR DD2 Agilent y usando cloroformo deuterado (CDCl_3) como disolvente, y tetrametilsilano (TMS) como referencia interna. El desplazamiento químico (δ) está dado en partes por millón (ppm) y las constantes de acoplamiento (J) están dadas en Hertz (Hz).

Los espectros de masas (EM) fueron determinados en un espectrofotómetro Jeol JEMAX505HA de baja resolución por la técnica de impacto electrónico, (IE) a 70 eV.

Preparación del extracto hexánico

El material colectado fue secado a la sombra a temperatura ambiente y molido. A una cantidad aproximada de 10 Kg de planta molida se le adicionaron 20 L de hexano, que se dejó macerar por tres días, pasado este lapso, se decantó el hexano para ser evaporado en un evaporador rotatorio esta misma operación se repitió cuatro veces para obtener finalmente el extracto hexánico con un peso de 20.6 g, el cual fue purificado por métodos cromatográficos. El residuo vegetal se almacenó bajo refrigeración a 5°C para la preparación de otros extractos con diferentes disolventes.

Separación por cromatografía en columna

La cromatografía por columna a gravedad (CCG) o columna flash (CCF) para purificación de los compuestos se realizó sobre gel de sílice 60 (0.040-0.063 mm., malla 230-400 ASTM) como fase estacionaria.

8.2 Discusión de resultados

De las fracciones de columna de menor polaridad, se obtuvo un precipitado de color blanco denominado RCH-1. El compuesto se obtuvo por filtración y posterior purificación por medio de cromatografía de columna Flash (CCF). El compuesto RCH-1 se obtuvo como un sólido blanco (con un peso de 0.0254 g) con un punto de fusión de $81\text{-}82^\circ\text{C}$.

El espectro IR del compuesto RCH-1, muestra dos bandas anchas en 3315 y 3222 cm^{-1} correspondiente al estiramiento (St) del grupo OH, de un alcohol (Smith, 1999). Las señales en 2914 y 2847 cm^{-1} , corresponden a los estiramientos C-H de CH_3 y CH_2 respectivamente, una deformación de CH_2 a 1465 y estiramiento en 1375 C-H. El estiramiento C-OH a 1132 además de flexiones en 1030 de C-OH y la señal en 721 cm^{-1} atribuida a los estiramientos de $-(\text{CH}_2)-$ confirman características de un alcohol de cadena larga (Coward, 2010).

El espectro de resonancia magnética nuclear de protón (^1H RMN, 400 MHz, CDCl_3) del compuesto RCH-1 (Figura 9) muestra los patrones de desplazamiento característicos de un alcohol alifático de cadena larga (Mahadevan, 1978). Se destaca la señal ancha a δ 3.59 ppm correspondiente al protón de metino en base oxigenado (HO-C-H) (Silverstein *et al.*, 2005). En la región entre δ 1,47 y δ 1,26 se observan el cúmulo de protones metilénicos $-(\text{CH}_2)_n$ y una señal a δ 0,87 ppm, correspondiente a los protones del metilo ($-\text{CH}_3$) terminal de la cadena. La integración de las señales para un hidrógeno entre δ 3.56-3.59 ppm (1H, m) sugiere proponer que el grupo hidroxilo se encuentra en una posición no terminal, de lo contrario se observaría una integración para 2 protones (CH_2). Lo anterior se puede confirmar por la señal entre δ 0.84-0.87 de un triplete poco simétrico que integra para 6 hidrógenos lo que supone claramente la existencia de dos metilos (CH_3) en los extremos de la cadena (Pretsch *et al.*, 2009).

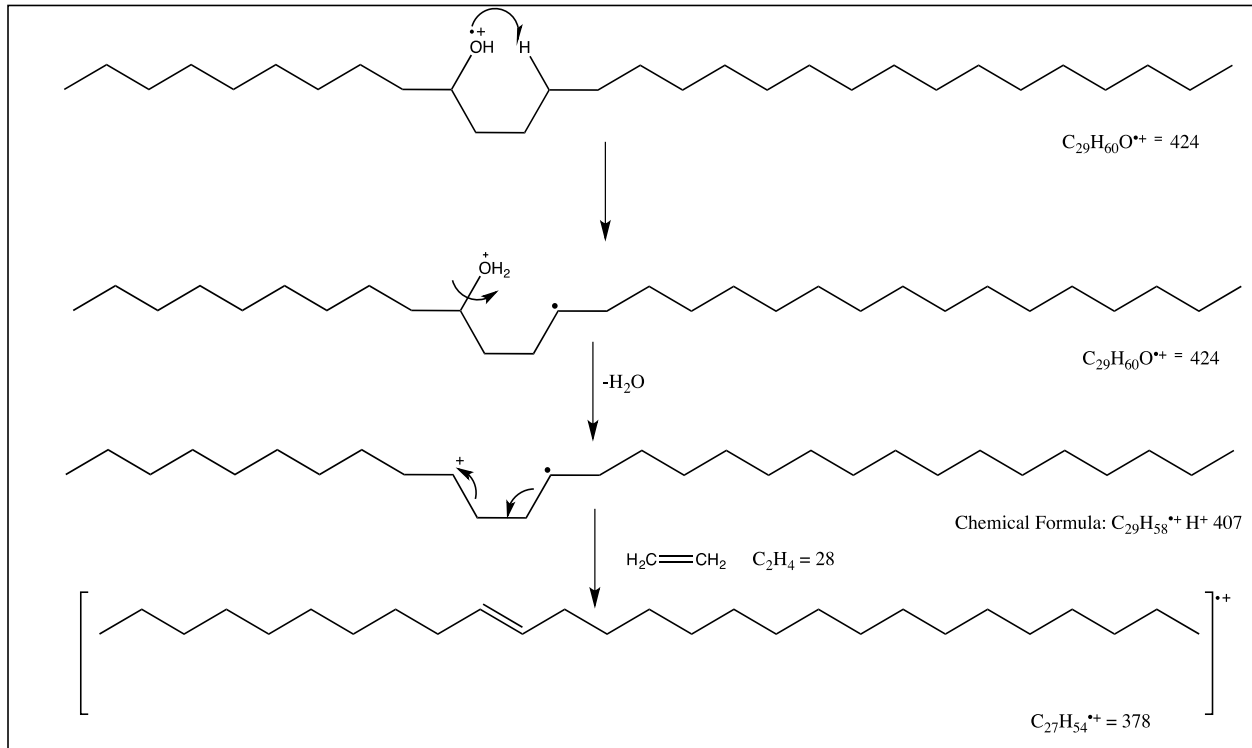
Por otro lado señales comprendidas entre δ 1,47 y δ 1,26, integran para una cantidad de protones aproximada a 54H, esto origina información valiosa del número de carbonos CH_2 posibles, si cada carbono posee 2 hidrógenos, se podría proponer una cadena con 26 a 28 carbonos. Los análisis del espectro de RMN de carbono 13 y de espectrometría de masas (EM) complementan esta información.

El espectro de carbono 13 (^{13}C RMN 100 MHz, CDCl_3), muestra una señal a δ 72.0 ppm correspondiente al carbono C-H de metino base de oxígeno, una señal a δ 37.5 indica la presencia de carbono CH_2 en posición α al carbono que contiene el alcohol, la señal en δ 31.9 se asigna al carbono CH_2 en posición β al carbono que contiene el grupo hidroxilo, en la región entre δ 22.7 y 29.7 se atribuyen a los CH_2 restantes de la cadena (Pavia, *et al.*, 2008).

La señal a δ 14.1 es característica del desplazamiento de los carbonos CH_3 terminales de cadena. El cúmulo de señales en la región de 29.3 a 29.7 ppm no permite cuantificar con precisión el número de carbonos de la cadena, sin embargo dada la similitud en las señales y de acuerdo a los datos espectroscópicos comparados con la literatura (Theuns, *et al.*, 1984), se sigue planteando una cadena entre 26-29 carbonos para el compuesto RCH-1.

Por otro lado, se pueden apreciar 14 resonancias en la región de 14 a 38 ppm, lo que permite deducir a partir de la observación del ion molecular $\text{M}^+ = 424$ de su espectro de masas, que la molécula en discusión podría corresponder a la estructura de un alcohol simétrico, entonces las 14 señales observadas en el espectro de ^{13}C RMN en realidad darían cuenta a 28 resonancias y un grupo $=\text{CH}-\text{OH}$ adicional, sin embargo en el mismo espectro de masas se observan otros fragmentos que no apoyan la hipótesis de la presencia de un alcohol simétrico. El espectro de masas, EI-MS m/e (% abundancia relativa) corroboran las afirmaciones anteriores al mostrar las siguientes señales 424 (4) [M^+] correspondiente al ion molecular, 407 (100) [$\text{M}-\text{H}_2\text{O}$] $^+$ asignada a la pérdida de agua características de los alcoholes y otras señales 391 (30), 379 (8), 351 (0.8), 298(4), 280 (8), 157 (0.5), 111 (0.1) 97 (0.1), 83 (0.1), derivadas de las rupturas y fragmentaciones de iones comunes en los alcoholes de cadena larga. La evidencia de un ion molecular 424 m/z, sugiere que el compuesto RCH-1 es un alcohol de 29 carbonos conocido como: 10-nonaconasol. Para determinar la posición del hidroxilo, es necesario observar las fragmentaciones y así proponer la estructura final. En el esquema 3 se pueden observar los mecanismos propuestos para la fragmentación de este tipo de alcoholes. De acuerdo a la bibliografía (Pretsch, *et al.*, 2009), la señal del ion molecular siempre es difícil observarla, sin embargo en los alcoholes secundarios es posible observar el ión molecular en baja abundancia.

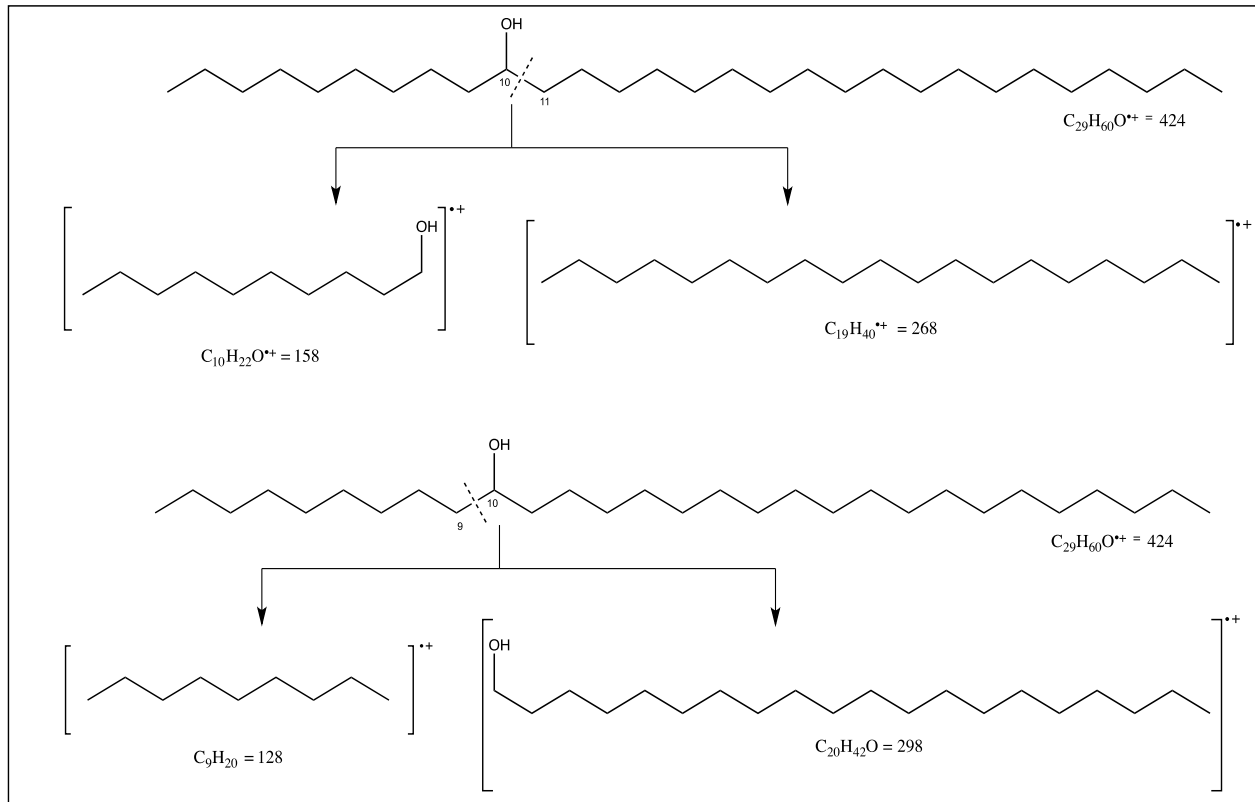
Figura 8 Mecanismo de fragmentación de H_2O y etileno para alcoholes alifáticos del compuesto RCH-1



Indirectamente se puede predecir el peso del compuesto, dado que la señal más sobresaliente en los espectros de EM de este tipo de alcoholes, aparecen asociados los fragmentos m/z de 406-408, y corresponden a la pérdida de una molécula de agua $[\text{M}-\text{H}_2\text{O}]^+$, (McLafferty y Turecek, 1993). Otra señal importante es la generada por la pérdida del etileno $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ (Figura 8).

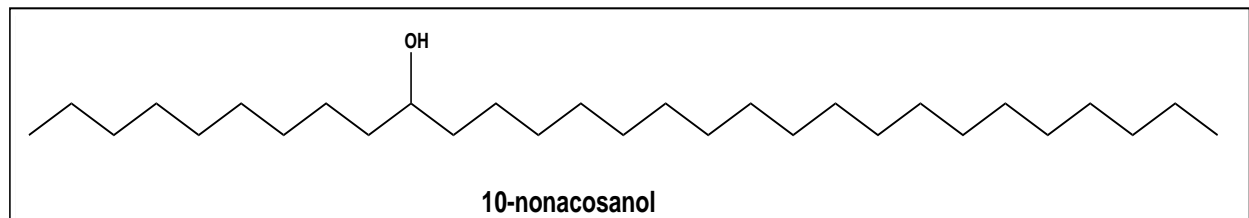
De acuerdo con Kircher (1982), la posición del grupo OH en 10 es muy común, basándonos en esto se analizaron dos rupturas típicas del 10-nonacosanol las fragmentaciones características de estos iones se derivan de la ruptura β del grupo hidroxilo. Cuando la ruptura ocurre entre los carbonos 10 y 11 se generan los iones de 158 y 268, las cuales están presentes en el espectro. La otra ruptura posible ocurre entre los carbonos 9 y 10, en este caso se obtienen los iones de pesos 128 y 298 de igual forma observadas en el espectro. Sucesivas pérdidas de agua o etileno de estos fragmentos generan iones que aparecen en menor abundancia en el espectro. Un ejemplo claro es la pérdida de agua de del fragmento de masa 298, que generaría el ion de 280 también presente en el espectro (Figura 8.1).

Figura 8.1 Mecanismo de ruptura β del grupo hidroxilo para alcoholes secundarios del compuesto RCH-1



Con todos los datos espectroscópicos analizados y con los ejemplos observados en la literatura (Yao *et al.*, 2012; Wollrab, 1968), se puede proponer sin discusión que el compuesto RCH-1 corresponde a la estructura del 10-nonacosanol (Figura 8.2).

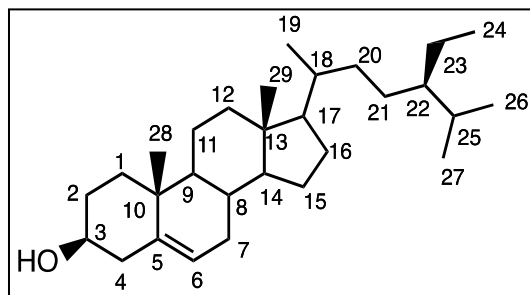
Figura 8.2 Estructura del compuesto RCH-1 (10-nonacosanol)



De la fracción de polaridad media, se observó un precipitado amorfo de color blanco denominado RCH-3. El compuesto se obtuvo por filtración y posterior purificación por medio de cromatografía de columna Flash (CCF). El compuesto RCH-3 se obtuvo como un sólido blanco (con un peso de 0.0167 g) con un punto de fusión de 135-137 C. De acuerdo a los datos de punto de fusión y R_f (índice de retención). Se propuso como posible estructura el β -sitosterol (Figura 2). Este compuesto es muy común en los extractos menos polares de la mayoría de las plantas. Sus datos físicos como el punto de fusión son clave para su detección. Normalmente el procedimiento inicial consiste en comparar el sólido obtenido con una muestra pura, por lo que se realizó una CCD comparativa, donde se usó como referencia una muestra auténtica de β -sitosterol (marca Sigma-Aldrich).

Como se suponía los valores Rf de las muestras fueron exactamente iguales. La confirmación de la estructura se logró totalmente mediante el análisis espectroscópico de IR, ^1H RMN Y ^{13}C RMN.

Figura 8.3 Estructura del β -sitosterol



A continuación se describen los datos espectroscópicos tomados para el β -sitosterol. Cabe mencionar que no se profundizara en el análisis espectroscópico, dado que ya es una estructura conocida y con muchos estudios de este tipo. El espectro IR (ATR), muestra una banda ancha entre $3401\text{-}3327\text{ cm}^{-1}$ correspondiente al grupo hidroxilo (OH), las bandas a 2931 y 2864 cm^{-1} corresponden a las estiramientos C-H de CH_3 , CH_2 , CH. A 1666 se observa la señal del estiramiento C=C del doble enlace, la señal a 1050 cm^{-1} correspondiente al vibración C-O. Otras señales a 1461 , 1375 , 955 , 8367 , 800 y 737 complementan la serie de estiramientos flexiones y vibraciones que presentan los diversos enlaces de este compuesto.

El espectro de resonancia magnética nuclear de ^1H RMN (400 MHz , CDCl_3), muestra a alta frecuencia dos señales importantes: a $\delta 5.35$ (m, 1H), para un protón vinílico H-6, esta señal es característica de los esteroides, la otra señal relevante es el multiplete a $\delta 3.52$ (m, 1H), asociado al protón base de carbono oxigenado H-3, de nuevo una señal característica en ^1H RMN para los esteroides. El resto de señales presentadas entre 2.32 y 1.41 ppm son asignadas a los protones de los ciclos y los fragmentos de cadena. Una ampliación de la zona de baja frecuencia del espectro permite observar con claridad las señales de 6 metilos (CH_3), las cuales dos aparecen como singuletes a $\delta 1.00$ (3H, s) y 0.68 (3H, s) correspondientes a los protones de los metilos 18 y 19, en $\delta 0.92$ (3H, d), 0.83 (3H, d) y 0.81 (3H, d) aparecen los dobletes asociados a los metilos 21, 26 y 27. Finalmente una señal a $\delta 0.84$ (3H, t) corresponde al metilo (CH_3) 29. Estas asignaciones, están de acuerdo para la estructura del β -sitosterol (Chaturvedula y Prakash, 2012).

El espectro de carbono ^{13}C RMN (100 MHz , CDCl_3) para el β -sitosterol compuesto RCH-3 muestra dos señales características a $\delta 140.7$ y $\delta 121.7$, las cuales son asignadas a los carbonos 5 y 6 respectivamente del doble enlace (Agrawal *et al.*, 1985). Otra señal familiar aparece en $\delta 71.7$ correspondiente al carbono 3 (C-H base de oxígeno). El cúmulo de señales en la región de $\delta 56.7$ a 11.8 ppm destaca las señales a 19.0 y 11.8 ppm correspondientes a los carbonos angulares C19 y C18 respectivamente. Las señales: $\delta 56.7$, 56.0 , 50.0 , 45.8 , 42.2 , 39.7 , 37.22 , 36.11 , 33.9 , 31.8 , 31.6 , 29.1 , 28.2 , 26.03 , 24.2 , 23.0 , 21.0 , 19.7 , 19.3 , 18.7 y 11.9 completan el total de señales para el compuesto indicado 29 Carbonos lo que coincide con su fórmula molecular de $\text{C}_{29}\text{H}_{50}\text{O}$. Las asignaciones precisas de los carbonos se complementan por los análisis de espectros bidimensionales (Friebolin, 1998; Simpson, 2012).

De la fracciones más polares del extracto hexánico, se obtuvo otro sólido de color blanco, el cual se denominó RCH-6. El sólido amorfo se obtuvo por filtración y posterior purificación por medio de cromatografía de columna Flash (CCF). El compuesto RCH-6 se obtuvo como un sólido blanco (0.02387 g) con un punto de fusión de 90-93°C.

El espectro IR, muestra dos bandas anchas en 3315 y 3222 cm^{-1} correspondiente al estiramiento (St) del OH, de un alcohol. Las señales en 2914 y 2847 cm^{-1} , corresponden a los estiramientos de CH_3 y CH_2 respectivamente, una deformación de CH_2 a 1465 y estiramiento en 1375 C-H. El estiramiento C-OH a 1132 además de flexiones en 1030 de C-OH y la señal de 721 atribuida a los estiramientos de $-(\text{CH}_2)-$ confirman características de un alcohol de cadena larga. El espectro de resonancia magnética nuclear de protón (^1H RMN, 400 MHz, CDCl_3) del compuesto RCH-6, muestra los patrones de desplazamiento característicos de un alcohol alifático de cadena larga. Se destaca la señal ancha a δ 3.59 correspondiente al protón de metino en base oxigenado (HO-C-H), en este caso al contrario del espectro para el alcohol RCH-1, esta señal integra para 2 hidrógenos; de acuerdo a lo anterior existen 2 posibilidades: la primera opción, podría ser la señal para un metileno CH_2 de una alcohol primario ($\text{CH}_2\text{-OH}$), la segunda opción es la aparición de 2 protones de metilo (HO-C-H) en diferentes posiciones a lo largo de la cadena. La señal que aparece entre 0.96 y 0.92 ppm como un triplete característico de cadena terminal, genera la respuesta para una de las opciones atribuidas al desplazamiento en δ 3.59 (Breitmaier, 1993). Claramente se observa que la señal entre δ 0.96 y δ 0.92 corresponde a los metilos CH_3 , el par tripletes (recuadro de la Figura 19) cuya integración es para 6 hidrógenos, excluye la posibilidad de que la señal en δ 3.59 corresponda a los protones CH_2 de metileno de un alcohol primario ($\text{CH}_2\text{-OH}$). La señal δ 1.57 es interesante, dado el desplazamiento a mayores frecuencias que los característicos protones de metileno CH_2 , observando que la integración es para 2 protones y que no se encuentra acoplada (observación de espectros bidimensionales COSY, HSQC y HMBC), se asignan a los protones del hidroxilo (O-H).

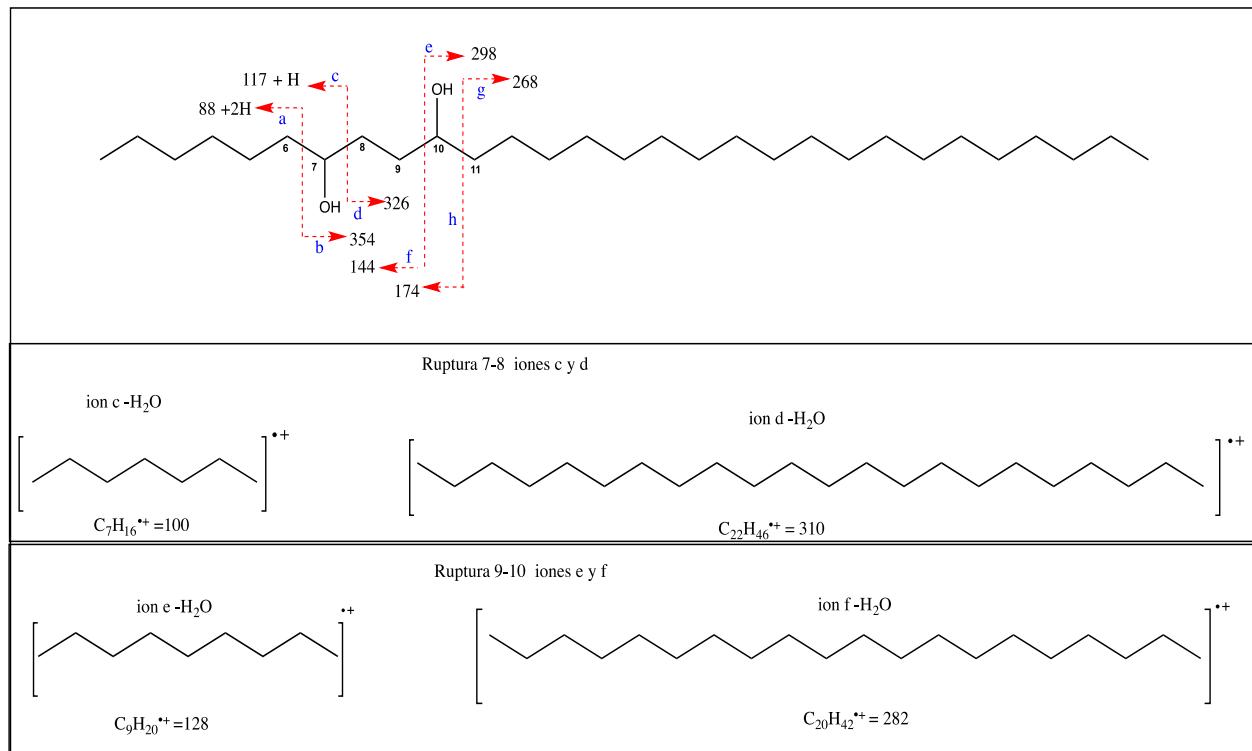
Finalmente en la región del espectro entre δ 1.42 y δ 1.25 se observan el cúmulo de protones metilénicos $-(\text{CH}_2)_n$ que complementan la cadena, la integración de protones es para 50 hidrógenos, lo que indica aproximadamente 24 CH_2 sumados a los otros grupos descritos anteriormente podría proponerse un alcohol de 29 carbonos con dos grupos OH, cuya fórmula sería $\text{C}_{29}\text{H}_{60}\text{O}_2$. Los análisis del ^{13}C RMN y de espectrometría de masas (EM) complementaran esta información.

El espectro de carbono 13 (^{13}C RMN 100 MHz, CDCl_3), muestra una señal a δ 71.8 (2C) correspondiente a los carbonos C-H de metino, a δ 37.5 (1C), 37.3 (2C) y 37.2 (1C), se pueden observar igualmente, las señales típicas de carbono CH_2 en posición α al carbono que contiene el alcohol.

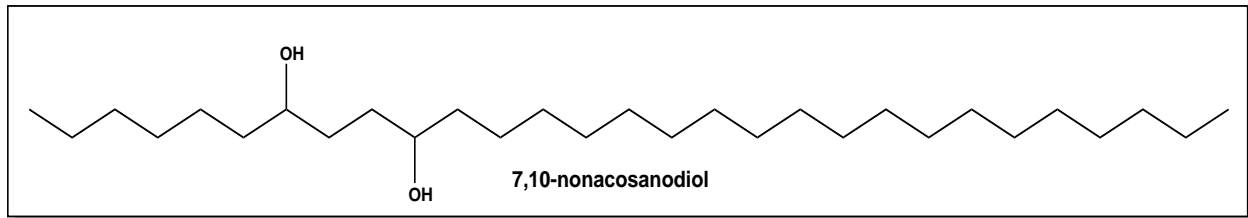
La señal en δ 31.8 (2C) se asigna al carbono CH_2 en posición β al carbono que contiene el grupo hidroxilo. Es de llamar la atención esta señal, dado que da información valiosa de la distancia entre los dos grupos hidroxilo, se puede suponer que: la distancia ente los carbonos que contienen los hidroxilos es de solo 4 carbonos ($\text{COH-CH}_2\text{-CH}_2\text{-COH}$), y por ello solo aparece una resonancia equivalente a 2 carbonos y no para 3 o 4 si hubiese una cadena más larga entre los dos carbonos base de hidroxilo. En la región entre δ 22.7 y 29.7 ppm se encuentran las señales atribuidas a los CH_2 restantes de la cadena. La señal a δ 14.1 ppm (2C) característica del desplazamiento de los dos carbonos CH_3 terminales de cadena complementa el análisis de espectro de ^{13}C RMN. El espectro de masas para el compuesto RCH-6, EI-MS m/e (% abundancia relativa) muestra las siguientes señales 440 (20) $[\text{M}^+]$ correspondientes al ion molecular, 441 (50) $[\text{M}+1]^+$.

La señal a 423 (100) $[M-H_2O]^+$ es asignada a la pérdida de una molécula de agua, adicionalmente se presenta otra señal a 404 (98) $[M-2H_2O]^+$ correspondiente a la pérdida consecutiva de otra molécula de agua lo que valida la existencia del diol. Los mecanismos de fragmentación para la pérdida de agua son similares a los mostrados en el esquema 3, de igual forma un ion abundante a 377 (25) $[M-64]^+$. Indica la pérdida de las dos moléculas de agua más etileno ($CH_2=CH_2$) (Rose y Johnstone, 1982). Para determinar las posiciones que ocupan los hidroxilos, es indispensable observar las fragmentaciones correspondientes a la ruptura β de los grupos hidroxilo (Yang *et al.*, 2009). La señal del fragmento m/z a 117 en el espectro de masas coincide con una ruptura de este tipo entre el carbono 7 y 8 los iones generados con la pérdida de moléculas de agua de estos fragmentos; también se observan en el espectro en señales m/z 100, 310 etc. La otra ruptura interesante ocurre en el carbono 10, donde se determinó esa posición para el segundo grupo Hidroxilo por el análisis del espectro de carbono en el cual se observó la cercanía entre los alcoholes entre 4 carbonos de distancia. Con lo anterior muchos fragmentos coinciden con los generados por el impacto electrónico del 10-nonacosanol y se observan señales complementarias. La ruptura entre los carbonos 9 y 10 luego de la pérdida de las moléculas de agua y etileno (Figura 8.4) presenta señales que concluyen que la estructura del compuesto RCH-6 corresponde al 7,10-nonacosanodiol (Figura 8.5).

Figura 8.4 Mecanismo de β ruptura de los grupos secundarios



Con todos los datos espectroscópicos analizados se propone sin discusión que el compuesto RCH-6 corresponde a la estructura del 7,10-nonacosanodiol.

Figura 8.5 Estructura del compuesto RCH-6 (7,10-nonacosanodiol)

8.3 Conclusiones

Se lograron purificar 12 compuestos de los cuales 3 presentaron alta pureza.

Los tres compuestos aislados corresponden a dos alcoholes de cadena larga 10-nanacosanol y 7,10-nonacosanodiol, además de β -sitosterol, el cual es un conocido esteroles constituyente de muchas especies vegetales.

Los autores agradecemos a la Universidad Autónoma Chapingo por su financiamiento a través del Centro de Investigación en Etnobiología y Biodiversidad (CIETBIO). Agradecemos también a la M. C. Ernestina Cedillo Portugal del área de Biología del Departamento de Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, quien identificó el material vegetal.

8.4 Referencias

- Agrawal, P. K., Jain, D. C., Gupta, R. K., and Thakur, R. S. 1985. "Carbon -13 NMR spectroscopy of steroidal sapogenins and steroidal saponins" *Phytochemistry Res.* (24)11: 2476-2496.
- Bermúdez, A., Olivera, M. M. A. y Velázquez, D. 2005. "La investigación etnobotánica sobre plantas medicinales: una revisión de sus objetivos y enfoques actuales". *Interciencia.* 30(8): 453-459.
- Breitmaier, E. 1993. "Structure Elucidation by NMR in Organic Chemistry". A Practical Guide John Wiley and Sons.
- Chaturvedula, V. S. P. and Prakash, I. 2012. "Isolation of Stigmasterol and β -Sitosterol from the dichloromethane extract of *Rubus suavissimus*". *International Current Pharmaceutical Journal.* (1)9:239-242.
- CONABIO, 1998. La diversidad biológica de México: Estudio de país, 1998. Comisión para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México.
- Coward, J. L. 2010. "FTIR spectroscopy of synthesized racemic nonacosan-10-ol: a model compound for plant epicuticular waxes". *Journal of Biological Physics.* (36)4: 405-425.
- Friebolin, F. 1998. Basic One and Two-Dimensional NMR Spectroscopy; 3ª Edición. VCH.

- Hernández, X. E. 1993. Aspects of plant domestication in Mexico: a personal view. En Ramamoorthy, T. P., Bye, R. A., Lot, A., Fa, J. E. (Eds.). *Biological diversity of Mexico: origins and distribution*. Oxford University Press. Nueva York. 1993. 733-753 pp
- Kircher, H. W. 1982. "10-nonacosanol, sitosterol and nonacosanediols in *Juniperus pinchotii*". *Phytochemistry*. (21)7: 1816-1818.
- Mahadevan, V. 1978. Fatty alcohols: chemistry and metabolism. *Prog. Chem. Fats Other Lipids*. (15)4: 255-299.
- McLafferty, F. W. y Turecek, F. 1993. *Interpretation of Mass Spectra*. 4^a Edition. University science Book.
- Mendoza, C. G. 2008. *La Farmacia Viviente, Recursos Fitogenéticos para la Salud y la Agricultura en México*. Ed. Universidad Autónoma Chapingo.
- Monroy, R. y Ayala, I. 2003. Importancia del conocimiento etnobotánico frente al proceso de urbanización. *Etnobiología*. 3: 79-92, 2003.
- Ortíz, M. B. 1993. *Medicina, Salud y Nutrición Aztecas*. Ed. Siglo XXI Editores. 351p.
- Padilla, J. and Herrán J. 1962. "Hernandezine a new alkaloid of the bisbenzylisoquinoline series". *Tetrahedron*. 18: 427-432.
- Pavia, D. L., Lampman, G. M., Kriz, G. S., Vyvyan, J. A. 2008. *Introduction to Spectroscopy*. Second Edition. Harcourt Brace College Publishers, USA.
- Pretsch, M. E., Badertscher, M. and Bühlmann, P. 2009. "Structure Determination of Organic Compounds. Tables of Spectral Fourth Revised and Enlarged Edition". *Elsevier*.
- Rose, M. E. and Johnstone, R. A. W. 1982. *Mass Spectrometry for Chemists and Biochemists*. Cambridge U. P.15.
- Silverstein, R. M., Webster, F. X., Kiemle, D. J. 2005. *Spectrometric identification of organic compounds*. 7th Ed. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- Smith, B. C.: *Infrared Spectral Interpretation. A systematic approach*. CRC Press, 1999.
- Theuns, H. G., Janssen, R. H. A. M., Biessels, H. W.A., Salemink, C. A. 1984. "Constituents of *Papaver bracteatum*: O-methyl- α -thebaol and 10-n-nonacosanol. Lanthanide-induced chemical shifts in ¹H NMR and ¹³C NMR". *Phytochemistry*. (24)1: 163-169.
- Tuz, C. L. H. 2009. *Así es Nuestro Pensamiento. Cosmovisión e Identidad en Los Rituales Agrícolas de los Mayas Peninsulares*. Universidad de Salamanca, Instituto de Iberoamérica. Tesis Doctoral.
- Wollrab, V. 1968. "Secondary alcohols and paraffins in the plant waxes of the family rosaceae". *Phytochemistry*. (8): 623-627.

Yang, N. Y., Tao, W. W., Duan, J. A. 2009. "Four new long-chain aliphatics from the feces of *Troglodytes xanthipes*". *Journal of Asian Natural Products Research*. (11)12: 1032-1039.

Yao, H., Wei, C., Song, H., Guo, R. 2012. "Quality Evaluation of Policosanol Film-Coated Tablets by Simultaneous Determination of Eight Ingredients Using GC- FID and GC-MS". *Journal of Analytical Sciences*, (2)1: 24-28.

Manejo forestal para el control de inundaciones en la subcuenca de Manialtepec, Oaxaca

LÓPEZ-CAMACHO, Maribel

M. López

Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales.
mar_cal23@hotmail.com

D. Sepúlveda, R. Salazar, F. Pérez y J. Rocha (eds.) Ciencias Químicas y Matemáticas-©ECORFAN, Texcoco de Mora-México, 2015.

9 Introducción

Uno de los aspectos más relevantes de la conservación de suelos forestales es la restauración de arroyos, la estabilización de sus riberas y bosques fluviales. Los aprovechamientos forestales, las obras de derivación, la captación excesiva de caudales hídricos, e incluso la tala de árboles ripícolas como el ahuehuate (*Taxodium mucronatum*) y la extracción excesiva de carrizos, alteran la dinámica fluvial y destruyen la estructura de las orillas, incrementándose con esto la sedimentación en presas, tomas y en canales de la infraestructura de riego, presentándose además inundaciones (Sánchez, 2003).

En este contexto, se debe indicar que la restauración hidrológico forestal ha representado la ejecución de prácticas mecánicas o vegetativas para la formación de suelos donde estos han desaparecido por la erosión, además de la reforestación, la pastización, la inducción de sistemas agrosilvopastoriles, la estabilización de riberas y causes, la promoción de una agricultura conservacionista construyendo terrazas y barreras rompevientos entre otras técnicas.

Por otra parte, además de los problemas naturales que se han presentado desde hace tiempo, tenemos el efecto del cambio climático, el cual está afectando el régimen de precipitación presente en nuestro país, pues mientras en el sur se presentan huracanes, lluvias excesivas e inundaciones; en el norte se tienen sequías extremas y escases de alimentos. El primer caso es el origen de esta investigación, pues los huracanes afectan año tras año a esta subcuenca, causando problemas de índole social, económico y ecológico.

Por lo anterior, este trabajo plantea propuestas para mitigar el efecto negativo que han causado los huracanes en los bosques de la Sierra de Oaxaca, particularmente en la subcuenca del Río Manialtepec. Si bien es cierto que no se puede controlar las inclemencias del tiempo, si es factible implementar obras para contrarrestar los daños de estos desastres naturales y de este modo contribuir en el cuidado del patrimonio y conservación de nuestros recursos naturales en particular de las comunidades Chatinas de Nopala, Cuixtla, Lachao, Tiltepec, Manialtepec y otros pequeños pueblos contenidos en su parteaguas.

9.1 Objetivos e hipótesis

General. Elaborar una propuesta de manejo forestal que coadyuve a mitigar los efectos de las inundaciones ocasionadas por lluvias torrenciales y huracanes en la subcuenca de Manialtepec.

Particulares. Realizar una valoración económica y ambiental de los daños ocasionados por inundaciones en la subcuenca.

Realizar un balance hídrico para evaluar el comportamiento de la humedad y proponer estrategias de control para prevenir inundaciones provocadas por agentes climáticos.

9.2 Hipótesis

H1. Los huracanes ocasionan desastres naturales de gran impacto en el territorio donde tocan debido a la destrucción de la cobertura vegetal.

H2. Es posible implementar estrategias de control en el efecto de huracanes y algunas medidas preventivas para cambio climático.

9.3 Materiales y Métodos

Para cumplir los objetivos de la presente investigación, la metodología utilizada se fundamentó en tres etapas: primera fase de gabinete, fase de campo y segunda etapa de gabinete.

Primera fase de gabinete. Consistió básicamente en la revisión de literatura, en la cual se recopiló toda la información bibliográfica de nuestra zona de estudio para la elaboración de este documento, mencionando conceptos básicos como: cuenca hidrográfica, ordenamiento territorial, balance hídrico, cambio climático, huracanes, obras de conservación de suelo y agua etc. También se delimitó el partaguas de la subcuenca de San José Manialtepec así como la red de drenaje mediante el uso de las cartas topográficas.

Fase de campo. Se realizó un recorrido por los límites de la subcuenca y los ríos principales, tomando muestras de tipo de vegetación, fotografías, puntos de interés con el GPS y realizando un análisis de la problemática que presenta en cada poblado por donde pasa el río principal.

Se realizó otro recorrido desde la parte alta donde empiezan el “río oriente” y “río san Isidro” en el Municipio de San Juan Lachao Nuevo, pasando por el municipio de Santos Reyes Nopala donde el río “la neblina” se une al “río maíz”, siguiendo aguas abajo por el “río Manialtepec” hasta la parte baja donde desemboca a la laguna de Manialtepec y finalmente al mar, para observar los daños ocasionados por el paso de los huracanes dentro la subcuenca.

Finalmente se realizaron entrevistas breves a los pobladores y productores para estimar el daño que ocasionaron estos fenómenos meteorológicos.

Segunda fase de gabinete. En esta parte se analizó toda la información recopilada en la fase de campo, se elaboraron los mapas temáticos de la subcuenca, se calcularon los parámetros morfométricos y finalmente se realizó el cálculo del balance hídrico. La delimitación y caracterización del área de estudio se determinó mediante el uso de las cartas topográficas de INEGI con las claves: E14D86 Santa Catarina Juquila y D14B16 Puerto Escondido; escala 1:50 000. Posteriormente se utilizaron las cartas edafológicas, tipo de uso de suelo y climáticas. Del mismo modo se utilizaron las ortofotos correspondientes a las cartas topográficas y los modelos de elevación digital (MDE) proporcionados por INEGI así como el uso de los programas Arc View 3.1, Arc Gis 10 y Google Earth.

Para la medición de variables morfométricas de la subcuenca se obtuvo el valor de cada uno de los parámetros establecidos (área de la cuenca, perímetro, longitud del cauce principal, densidad de corrientes, densidad de drenaje, pendiente del cauce principal, pendiente ponderada, factor de forma, índice de forma, relación elongación, relación de forma, índice de compacidad y altura media de la cuenca), los cuales son fundamentales en el manejo de cuencas y para el propósito de esta investigación, ya que nos ayuda a comprender el flujo hidrológico superficial que se relaciona con variables físicas del área de estudio y nos ayuda a proponer una solución a los problemas establecidos dentro de la cuenca para sugerir un buen manejo de los recursos naturales que ahí se encuentran. Para el balance hídrico se utilizó la siguiente fórmula de acuerdo con Lee (1989) y Chanf (2003) citado por Velasco (2012), la cual se expresa de la siguiente manera:

$$Bh=P-(Int+Ev+E+Inf+As)$$

(1)

Donde: Bh= Balance hídrico; P= Precipitación total de la subcuenca (m³/año); Int= Intercepción por la cobertura vegetal (m³/año); TR= Evapotranspiración real (m³/año); Es= Esguerrimiento superficial (m³/año); Inf= Infiltración (mm/hr ó día) y As= Agua suspendida o agua higroscópica (m³/año).

Factores físicos y sociales que deterioran la subcuenca: Mediante el recorrido en campo por el parteaguas de la cuenca se observaron e identificaron diversos factores físicos y sociales que deterioran la subcuenca, por lo que se procedió a obtener evidencia fotográfica de esto acontecimientos.

9.4 Resultados y Discusión

En este apartado se presenta la información recabada durante el desarrollo de la investigación dentro de la subcuenca de Manialtepec, se realiza el análisis de los datos y se desarrollan las variables de interés propuestos para cumplir los objetivos de este tema de investigación. Finalmente se analizan los resultados para poder proponer acciones específicas para la conservación de los recursos naturales, el control de inundaciones y prevención de huracanes dentro de la subcuenca culminando con la propuesta de ordenamiento territorial.

Los tipos de uso de suelo dentro de la subcuenca obtenidos fueron los siguientes: selva subcaducifolia representa el 41.73% de la superficie total de la subcuenca y por tanto el mayor territorio, el bosque mesófilo de montaña representa el 26.02%, la selva perennifolia representa el 9.89%, las zonas deforestadas representan el 7.02%, el bosque de pino representa el 4.68%, el bosque de pino-encino representa el 2.48% la agricultura representa el 1.83%, los humedales representan el 1.73%, las playas representan el 1.49%, los cuerpos de agua representan el 1.13%, el bosque de encino representa el 1.13%, las zonas urbanas representan el 0.55% y finalmente las zonas erosionadas con el menor porcentaje representan el 0.32% en un área total de 55,241.41 ha.

Las variables morfométricas fueron calculadas implícitamente junto con el desarrollo de las formulas establecidas dentro de la metodología para calcular cada uno de los parámetros considerados, consultando algunas fórmulas de Orosco (2003). Por lo que solo se presenta el cuadro de resultados obtenidos.

Tabla 9 Parámetros morfométricos de la subcuenca de Manialtepec

Parámetros	Valor o Índice
Área de la cuenca	55,241.41 ha ó 552.41 km ²
Perímetro	135.3 km
Longitud del cauce principal	42.52 km
Densidad de corrientes	0.008
Densidad de drenaje	1.63
Pendiente del cauce principal	1.80%
Pendiente ponderada de la cuenca	30 %
Factor de Forma	0.56
Índice de forma	0.42
Relación de elongación	1.18
Relación de forma	0.38
Índice de compacidad	1.61
Altura media de la cuenca	807 msnm

Fuente: Elaboración propia con ayuda del programa Arc Gis

Los datos obtenidos indican que la subcuenca corresponde a una forma oval oblonga a rectangular oblonga, por lo que la concentración de los escurrimientos será y en un corto periodo de tiempo. De tal manera que cuando se presente una precipitación y de corta duración provocará un incremento considerable en los afluentes, lo cual en ocasiones provoca problemas de inundaciones en las poblaciones bajas de la subcuenca debido a las altas concentraciones de agua en un corto periodo de tiempo directo a los afluentes, esta condición de inundación se verá más afectada si las lluvias son ocasionadas por tormentas tropicales o huracanes.

Cálculo del balance hídrico: Derivado de la obtención de cada uno de los componentes, este es la base de la distribución del recurso hídrico en la subcuenca y a partir del cual se puede tomar decisiones para el manejo de los recursos naturales, considerando como punto de partida el activo hídrico disponible.

Tabla 9.1 Parámetros del Balance hídrico de la subcuenca de Manialtepec

Parámetros del Balance Hídrico	Cantidad en m ³ /año	Cantidad en %/año
Precipitación (P)	823,097,009.00	100
Intercepción (Int)	96,603,693.26	12
Infiltración (Inf)	71,274,344.63	9
Evapotranspiración (Ev)	353,931,713.87	43
Escurrecimiento superficial (Es)	296,314,923.24	36
Agua suspendida (As)	411,548.50	0
Recarga subterránea (Rs)	4,560,785.49	1

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en campo

La representación gráfica de la tabla 9.1, indica que el agua disponible que puede ser aprovechada es de 4, 560, 785.49 m³ al año lo cual representa el 1%, sin embargo el escurrimiento superficial es de 296, 314, 923.24 m³ al año lo cual representa el 36 %, con base en este resultado se puede deducir que las probabilidades de inundaciones en las partes bajas de la cuenca es elevado, pues toda el agua que no es aprovechada escurre y sigue su cauce natural hacia el mar llevando grandes cantidades de agua de manera intempestiva.

Propuesta de ordenamiento territorial para la mitigación de los efectos de los huracanes: Con base en la problemática presente dentro de la subcuenca de Manialtepec presentados en esta investigación, se proponen diversas actividades necesarias para mitigar de cierta forma los detonantes de estos problemas, los cuales son de diversa índole, por lo que se plantean propuestas en el sector forestal, ambiental y social.

De manera tal que para mejorar una cuenca es fundamental el ordenamiento ecológico del territorio, es necesario establecer actividades y proyectos rentables desde el punto de vista económico, sustentables ambientalmente y socialmente de manera justa y equitativa.

Restauración de los bosques de galería o bosques fluviales El ordenamiento considera al agua como el elemento integrador del análisis socioeconómico y eje central para la toma de decisiones; no como elemento aislado, sino integrado a los ecosistemas y es una fase inicial para su manejo, con esto se busca conservar el mayor volumen de agua donde se encuentran los almacenamientos naturales más eficientes y económicos como lo son las vertientes altas que están densamente cubiertas de vegetación (Sánchez, 2003).

Por consiguiente las propuestas de ordenamiento territorial son las siguientes:

1. Pago por servicios ambientales y educación ambiental
2. Sistemas agroforestales
3. Restauración
4. Restauración de los bosques de galería o bosques fluviales
5. Reintroducción de plantas acuáticas
6. Restauración de humedales
7. Obras de conservación de suelos y agua
8. Prácticas para el control de escurrimiento superficial
9. Prácticas de conservación de suelo.

Tabla 9.2 Acciones para la restauración hidrológico-forestal

Acciones en sus vertientes	Acciones en los lechos y riberas de cauces
Prácticas de formación de suelos.	Obras de control de azolves
Diseminación de semillas de especies pioneras	Diques vivos
Suavización de taludes (cambio de pendiente)	Presas de piedra acomodada, block, murillos.
Pastización con especies de hábitos cespitosos	Diques curvos de Tierra, gaviones.
Repoblamiento forestal multiespecífico	Estabilización de rápidos
Reforestación con especies Nativas	Fijación de riberas con piedras
Agricultura ecológica	Empedrado de pasos del ganado
Sistemas Agrosilvopastoriles	Reforzamiento de recodos (zonas de desgaste)
Surcado en contorno	Reintroducción de plantas acuáticas
Zanjas de ladera	Pastización y revestimiento de canales
Construcción de cunetas en caminos	Reposición de bóvedas riparias
Construcción de terrazas	Saneamiento (extracción de basura)

Fuente: Sánchez (2005)

9.5 Conclusiones

Con base en los cálculos realizados en esta investigación, la subcuenca de Manialtepec cuenta con una superficie de 55,241.41 ha, de las cuales 18,952.66 ha son de Bosque de coníferas que es el 34.31 y 29,516.77 ha corresponden a selva media subperennifolia que es el 51.62%, por lo que las oportunidades para obtener ingresos por PSA son altas, debido a la gran cobertura vegetal que tiene esta subcuenca. El perímetro es de 135.3 km con una pendiente ponderada de 30% y un índice de compacidad 1.61, lo cual indica que la subcuenca corresponde a una forma oval oblonga a rectangular, por lo que la concentración de los escurrimientos será rápida y en un periodo corto debido al tamaño y forma que presenta hacia la parte baja de ésta.

En cuanto al balance hídrico realizado se tiene que del total de agua precipitada se puede utilizar 4, 560,785.49 m³ al año como recarga subterránea, el escurrimiento superficial corresponde a 296, 314,923.2 m³ al año que representa el 36%.

El daño estimado por la presencia del huracán Paulina en 1997 fue de \$80,000 millones de pesos aproximadamente en las costas de Oaxaca y Guerrero y más de 300,000 personas que quedaron sin hogar. En cuanto a la valoración ambiental no hay cifras estimadas, pues es difícil calcularlo y la mayoría de los daños que se toman en cuenta para la valoración económica son de infraestructura.

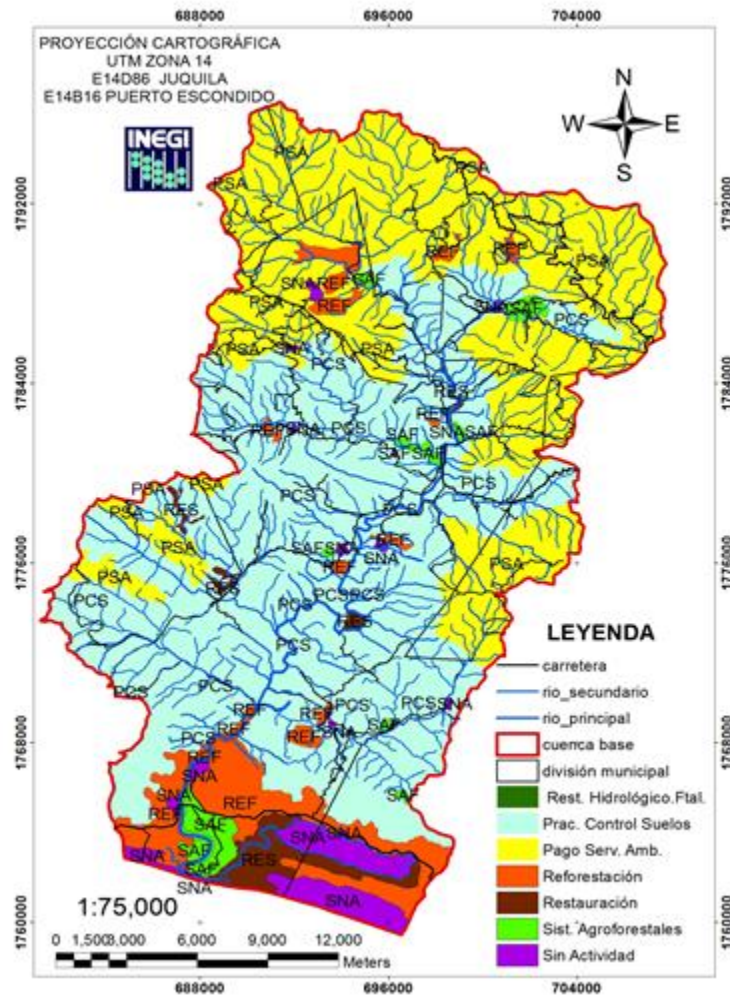
Los sistemas de pago por servicios ambientales hidrológicos no ha despertado el interés esperado a los propietarios de los bosques, pero en un futuro el propósito de los PSH no será solo por la

producción de agua, también será para la protección contra inundaciones en muchos lugares, partiendo del hecho de que el manejo forestal determina en gran medida la existencia de los arroyos, por lo que es urgente establecer medidas de prevención, conservación, restauración y manejo de sitios con alta vulnerabilidad, como son los recodos, áreas de inundación y taludes de cauces. También es necesario ordenar las partes altas de la subcuenca en las vertientes de recepción de la lluvia, estableciendo una cobertura vegetal densa para incrementar la interceptación y propiciando que cuando el agua llegue al suelo se infiltre y recargue los acuíferos profundos.

9.6 Recomendaciones

Se recomienda utilizar la tecnología más barata y disponible, utilizando preferentemente materiales locales. Se deben analizar: la época más apropiada, para realizar los trabajos, la accesibilidad, la disponibilidad de mano de obra, la capacitación, etc., para realizar de manera óptima y eficiente las obras de conservación de suelo y agua.

Figura 9 Mapa de ordenamiento territorial de la subcuenca de Manialtepec



9.7 Referencias

OROSCO P. Valoración económica preliminar de servicios hidrográficos en la cuenca alta del río Zahuapan, Tlaxco, Tlaxcala. Tesis de Licenciatura. Chapingo, México. 2003. 50-59 pp.

SANCHEZ V. A. et al. La cuenca hidrográfica: unidad básica de planeación y manejo de recursos naturales. Chapingo, Méx. 2003. 47 pp.

SÁNCHEZ V., A. et al. Restauración ecológica y conservación de la biodiversidad; retos y oportunidades. En: Uso de los recursos naturales y medio ambiente. Aguilar S., G. Chapingo, DGIP. 2005. 291-317 pp.

VELASCO S. Gestión integral de los servicios ecosistémicos de la microcuenca del río San Juan, Tlazoyaltepec, Oax. Tesis de Licenciatura. Chapingo, México. Ingeniero Forestal. UACH. 2012. 102 - 119 pp.

Conglomerados productivos de cacao en México

SOUZA-PEÑALOSA, Patricia

P. Souza

Matemática aplicada independiente. Rio Magdalena 120-24. México, D.F. 01090.
agromodelos@yahoo.com

D. Sepúlveda, R. Salazar, F. Pérez y J. Rocha (eds.) Ciencias Químicas y Matemáticas-©ECORFAN, Texcoco de Mora-México, 2015

10 Introducción

Uno de los cultivos precolombinos de mayor tradición en Mesoamérica es el del cacao. De acuerdo a las cifras oficiales publicadas al respecto por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2014), este cultivo en México actualmente se limita a los estados de Tabasco, Chiapas y Guerrero. Durante el año agrícola 2013, abarcó un total de 61 mil 319 hectáreas de superficie sembrada, cuyas cosechas se tradujeron en un valor total de mil dieciséis millones de pesos. Con ello, el cacao ocupó en 2013 el lugar número 15 y 25 en superficie sembrada y valor de producción, respectivamente, entre los 136 productos agrícolas perennes del país.

Cabe señalar que de las 27 mil 844 toneladas de cacao cosechadas en 2013 a nivel nacional, 26 mil 951 (96.79%) se produjeron en tierras de temporal, con una participación relativa de Tabasco, Chiapas y Guerrero igual a 18 mil 488 (68.60%), ocho mil 250 (30.61%) y 213 (0.79%) toneladas, respectivamente.

Con el fin de representar las condiciones actuales de dicha producción agrícola con la mayor estabilidad posible, en el presente estudio se promedian los resultados anuales del periodo 2010-2013 correspondientes a un total de 58 municipios productores de cacao en superficies de temporal de México. A este universo se aplica un filtro que preserva a 48 municipios considerados productores auténticos (Cuadro 7), haciendo a un lado a los diez municipios de producción marginal que generaron menos de dos años de cosechas durante dicho periodo (ver Cuadro 9).

Nueve de los diez municipios con producción marginal se encuentran en el estado de Oaxaca, que registra algunas hectáreas de cacao en superficie de temporal durante 2010 y 2011, pero sin cosecha alguna. Para 2012 y 2013, ya no se registran tierras oaxaqueñas que cultiven el cacao, pero el lector aún puede considerar la posibilidad de contar en Oaxaca con un campo potencial para el desarrollo sustentable del cacao.

El propósito más inmediato de la presente investigación es ofrecer una respuesta de calidad a las siguientes preguntas sobre el cacao producido en superficie de temporal. ¿Qué tipos de municipios productores de cacao existen actualmente? ¿Cuáles de sus rasgos son sobresalientes? ¿Dónde se encuentran? ¿Cuáles son las principales dificultades y áreas de oportunidad que comparten?

Para responder a estas preguntas, se emplea un modelo de conglomerados (mejor conocidos como clústers) regido por un algoritmo divisorio de tipo jerárquico (Johnson & Wichern, 2002) que termina por agrupar a los 48 municipios productores en seis categorías (ver Cuadro 7). El análisis correspondiente es multivariado, descriptivo y exploratorio, limitándose al tiempo presente 2010-2013 (Jain, 2010).

En todo momento, se busca presentar al lector un modelo estadístico accesible cuyos resultados sean susceptibles de apoyar a los tomadores de decisiones mediante conclusiones prácticas basadas en evidencia estadística acerca de las oportunidades y dificultades existentes en el cultivo del cacao. El propósito general de este esfuerzo es favorecer un incremento en la productividad y competitividad de la producción agrícola en México.

10.1 Materiales y métodos

a) Valores económicos reales

En el presente estudio, toda variable que represente montos en pesos mexicanos se expresa en pesos constantes de enero de 2013 mediante el Índice Nacional de Precios al Consumidor (INPC) publicado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2014). Es decir: las series nominales de valor de producción, precio medio rural y rendimiento en pesos (SIAP, 2014) son convertidas en series reales de año base 2013. Con ello, se pretende eliminar los efectos de la inflación que están presentes en la información histórica.

Por ejemplo, un monto nominal de 100 pesos al iniciar el año 2012 tiene un valor real de 103.57 pesos al día primero de enero de 2013 porque el INPC de 2012 fue igual a 3.57%. Las series se convierten de esta manera a pesos constantes, aunque dichos cálculos sean aproximados y aunque el INPC no sea el único índice disponible para estos propósitos.

Tabla 10 Tasa anual del Índice Nacional de Precios al Consumidor

Año	INPC
2010	4.40
2011	3.82
2012	3.57

Fuente: INEGI

b) Insumos

El modelo de conglomerados se desarrolla a partir de los valores para el periodo 2010-2013 de las seis variables registradas por el SIAP en torno a la producción de temporal de cacao en los municipios de México.

Con el propósito de enriquecer la información disponible para la elaboración del modelo, a partir de dichas variables se definen dos más. La primera es el porcentaje de la superficie sembrada que resulta cosechada, expresado en valores de cero a cien. La segunda es el rendimiento en pesos contantes que expresa el valor económico real promedio que obtiene el productor por cada hectárea cosechada.

En la tabla 10.1 se precisa el concepto, algunas relaciones entre variables y la unidad de medida de cada una.

Tabla 10.1 Ocho variables de producción agrícola

Variable	Concepto	Unidad de medida	Cálculo
SS	Superficie sembrada	Hectárea	
SC	Superficie cosechada	Hectárea	
Volumen	Volumen de producción	Tonelada	
Rend	Rendimiento	Toneladas por hectárea	$Volumen/SC$
PMR	Precio medio rural real ^{1/}	Pesos constantes por tonelada ^{1/}	$10^6 (Valor/Volumen)$
Valor	Valor real de producción ^{1/}	Millones de pesos constantes ^{1/}	
Variables nuevas			
% SC	Porcentaje de superficie sembrada que es cosechada	Porcentaje (base=100)	$100 (SC/SS)$
\$Rend	Rendimiento en valor real ^{1/}	Pesos constantes ^{1/}	$10^6 (Valor/SC)$
Nota ^{1/} Base = 2013 conforme al INPC			

Fuentes: Basado en información de INEGI y SIAP

Cuando el porcentaje de la superficie sembrada que resulta cosechada es inferior a cien para este cultivo perenne, es posible que además de la superficie de producción haya tierras nuevas y/o de desarrollo. También es posible que cualquiera de estas superficies esté sufriendo pérdidas totales. En cambio, cuando %SC es igual a cien, se sabe que la totalidad de la superficie sembrada se encuentra en producción y libre de pérdidas totales.

Por otro lado, el rendimiento en valor real de estas tierras permite medir económicamente el rendimiento logrado. Es decir, para cada hectárea cosechada no sólo se cuenta con el número promedio de toneladas obtenidas (Rend), sino con el monto real en pesos de 2013 que éstas representan en promedio para el agricultor (\$Rend).

De este modo, en el modelo de conglomerados aplicado aquí se procesa un total de ocho variables reales. Cabe recalcar que ninguna de ellas es geográfica, por lo que los municipios productores de cacao en tierras de temporal se agrupan únicamente conforme a su desempeño productivo, sin importar su ubicación geográfica. En este sentido, se genera una clasificación transversal que generalmente no es regional.

c) Municipios guerrerenses

La producción de cacao en tierras de temporal presenta rasgos dramáticamente distintos entre los diez municipios del estado de Guerrero y los 38 municipios de Tabasco y Chiapas. Esto se ilustra en la tabla 10.2, donde el rendimiento y el precio medio rural real registrados en Guerrero representan aproximadamente el 196% y 14%, respectivamente, del valor típico alcanzado por los municipios de Tabasco y Chiapas.

Tabla 10.2 Comparativo de resultados por estado

Variable	Unidad	Municipio promedio 2010-2013	
		Tabasco y Chiapas	Guerrero
<i>Rend</i>	t / ha	0.45	0.88
<i>PMR</i>	pesos constantes / t	36,951	5,297

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP

Dichas diferencias relativas a la producción de cacao son tan marcadas y contradictorias que resulta preferible aislar a los municipios guerrerenses en dos conglomerados propios, destinando los cuatro conglomerados restantes a una clasificación mixta para Tabasco y Chiapas.

d) Variables independientes

El modelo de conglomerados es eficaz cuando se basa en variables enteramente independientes entre sí, por lo que es importante depurar los insumos anteriores hasta seleccionar el mayor número posible de variables independientes.

En la tabla 10.2 se aprecian relaciones exactas entre algunas variables, mientras que en las tablas 10.3 y 10.4 se puede afirmar que dos variables presentan una interdependencia clara siempre que el correspondiente valor absoluto del coeficiente de correlación lineal de Pearson alcance un valor mayor o igual a 70%.

En este sentido, las variables superficie sembrada (SS), superficie cosechada (SC), valor de producción (Valor) y rendimiento en valor real (\$Rend) se vuelven redundantes, ya que el volumen de producción (Volumen) representa a las primeras tres, mientras que el rendimiento (Rend) representa a la cuarta.

Entre las variables restantes no aparece otra redundancia visible, luego se considera que las cuatro son independientes entre sí. Finalmente, no hay forma de extraer cinco variables independientes de las ocho variables originales: el máximo es cuatro.

De este modo, las siguientes cuatro variables pueden considerarse adecuadas para desarrollar el modelo:

- Porcentaje de la superficie sembrada que resulta cosechada (% SC)
- Volumen de producción (Volumen)
- Rendimiento (Rend)
- Precio medio rural real (PMR).

Tabla 10.3 Coeficientes de correlación lineal de Pearson (sólo Tabasco y Chiapas)

Variable	SS	SC	% SC	Volumen	Rend	PMR	\$Rend	Valor
SS	100.00							
SC	100.00	100.00						
% SC	23.11	23.19	100.00					
Volumen	99.78	99.78	23.33	100.00				
Rend	-19.45	-19.46	14.56	-17.41	100.00			
PMR	36.74	36.78	14.82	36.75	2.61	100.00		
\$Rend	-0.02	0.00	20.36	1.73	86.44	51.94	100.00	
Valor	99.76	99.76	22.88	99.93	-17.15	37.99	2.59	100.00

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP

Tabla 10.4 Coeficientes de correlación lineal de Pearson (sólo Guerrero)

Variable	SS	SC	% SC	Volumen	Rend	PMR	\$Rend	Valor
SS	100.00							
SC	100.00	100.00						
% SC	19.47	20.07	100.00					
Volumen	99.82	99.82	19.40	100.00				
Rend	-22.15	-22.35	-35.89	-17.58	100.00			
PMR	33.44	33.19	-33.78	36.64	48.62	100.00		
\$Rend	-9.53	-9.76	-39.07	-4.80	97.31	67.41	100.00	
Valor	99.73	99.73	19.30	99.99	-16.59	37.49	-3.73	100.00

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP

e) Hipercubo unitario

El modelo de conglomerados funciona con mayor eficacia cuando la distribución de las variables involucradas es lo más uniforme posible, para lo cual:

- % SC es topada inferiormente por el percentil P02 (sólo Tabasco y Chiapas)
- Volumen es sustituida por Vol, que es el logaritmo natural de su valor para todo municipio de Tabasco, Chiapas y Guerrero
- Rend es topada superiormente por el percentil P95 (sólo Tabasco y Chiapas)
- PMR es topada inferiormente por el percentil P05 (sólo Tabasco y Chiapas).

Finalmente, cada una de las cuatro variables es estandarizada para insertar al universo de 48 municipios en el cubo unitario del espacio euclidiano de dimensión cuatro. Es decir, a cada una de ellas se aplica un simple cambio de escala mediante el cual el valor mínimo y el máximo se transforman en los números cero y uno, respectivamente.

Con estas transformaciones, los 48 municipios por clasificar se encuentran distribuidos de una manera relativamente uniforme en el hipercubo unitario del espacio euclidiano de dimensión cuatro, cuyas coordenadas a partir de este momento se expresarán en porcentaje.

Así, la distancia entre dos municipios dados está dada por la distancia euclidiana entre los puntos correspondientes (Shmueli et al., 2010), que es la raíz cuadrada de la suma de las cuatro diferencias entre sus componentes elevadas al cuadrado.

De este modo, la distancia entre dos municipios sólo puede ser pequeña cuando el desempeño de ambos municipios es similar, simultáneamente, en porcentaje de tierras sembradas que resultan cosechadas, volumen de producción, rendimiento y precio medio rural real. De lo contrario, la distancia entre dos municipios productores de cacao resulta mediana o grande.

f) Semillas

Entre los 48 municipios por clasificar, se eligen seis que distan entre sí lo más posible: dos en Guerrero y cuatro en Tabasco y Chiapas.

Por ejemplo, para el caso de Tabasco y Chiapas se elige al municipio de máxima producción de cacao durante 2010-2013, que es Comalcalco, ubicado en el distrito tabasqueño de Cárdenas. Después se escoge al municipio tabasqueño o chiapaneco más distante de Comalcalco, que es el de Jalapa, ubicado en el distrito Villahermosa del estado de Tabasco. Este procedimiento continúa hasta obtener cuatro municipios que ofrecen diferencias grandes entre sí, conforme al algoritmo divisorio de tipo jerárquico que se describe en la literatura de los modelos de conglomerados (Johnson & Wichern, 2002). Lo mismo se hace con los municipios guerrerenses.

De esta manera, se eligen las siguientes seis semillas, cuyas características extremas son fundamentales para generar una segmentación exitosa.

Tabla 10.5 Distancia entre las semillas

No.	Estado	Semilla	1	2	3	4	5	6
1	Tabasco	Comalcalco	0.00					
2	Chiapas	Tuxtla Chico	59.32	0.00				
3	Chiapas	Salto de Agua	95.89	44.28	0.00			
4	Tabasco	Jalapa	126.48	104.06	126.90	0.00		
5	Guerrero	Tecoanapa	40.08	33.22	62.66	128.30	0.00	
6	Guerrero	Cuajinicuilapa	144.43	87.59	74.69	103.45	119.54	0.00

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP

Así, dentro del hipercubo unitario, las seis semillas elegidas se encuentran relativamente apartadas unas de otras, como se documenta en el Tabla 10.5. Esto sirve para generar conglomerados de municipios que contrastan entre sí como productores de cacao.

g) Conglomerados

La clasificación definitiva es simple. En Tabasco y Chiapas, se tienen cuatro semillas y 38 municipios por clasificar: basta asignar cada uno a la semilla más cercana. En caso de empate, puede definirse una regla adicional (como integrarse al conglomerado más pequeño), pero para el caso del cacao esto no es necesario porque no se dan empates. En el caso de Guerrero se tienen dos semillas para clasificar diez municipios, entonces basta asignar cada municipio uno a la semilla más cercana. Nuevamente, la información sobre el cacao no genera empate alguno y la clasificación termina.

La idea central aquí es que los municipios que más se parecen a una determinada semilla se parecerán entre sí, de tal modo que cada conglomerado contendrá municipios similares. Al mismo tiempo, dado que las semillas se eligen lo más distintas posible entre sí, los municipios de diferentes conglomerados diferirán considerablemente entre sí.

Esta línea heurística es necesaria dada la imposibilidad práctica de calcular todas las segmentaciones posibles con el fin de elegir la óptima con respecto a una métrica dada (Jain, 2010; Johnson & Wichern, 2002).

De este modo, se obtienen seis conglomerados en total: uno alrededor de cada semilla. Algunos municipios pueden parecerse notablemente a la semilla del conglomerado, pero cabe recalcar que no siempre es así. En un conglomerado puede haber municipios que se parezcan poco a la semilla, pero el punto es que se parecen aún menos a las demás semillas.

10.2 Resultados

a) Conglomerados productivos

En la tabla 10.6 se sintetiza la clasificación de los principales 48 municipios productores de cacao en tierras de temporal. Para cada conglomerado, se listan los municipios que lo componen, de menor a mayor distancia de la semilla. Esto es: cada lista comienza en la propia semilla, seguida del municipio que más se parece a ella y terminando con el municipio que menos se le parece. En algunos casos, como los municipios de Xochistlahuaca en Guerrero (perteneciente al Conglomerado No. 5) y Francisco León en Chiapas (del Conglomerado No. 3), el lector puede decidir que un municipio difiere tanto del resto que se podría considerar aparte.

Tabla 10.6 Conglomerados

Conglomerado	No. municipios	Semilla	Municipio	Estado	Distancia a la semilla	
1	10	Comalcalco	Comalcalco	Tabasco	0.00	
			Cunduacán		8.54	
			Cárdenas		9.10	
			Huimanguillo		22.83	
			Pichucalco	Chiapas	23.59	
			Jalpa de Méndez	Tabasco	25.87	
			Paraíso		32.07	
			Ostuacán	Chiapas	33.01	
			Juárez		37.25	
			Tecpatán		48.66	
2	16	Tuxtla Chico	Tuxtla Chico	Chiapas	0.00	
			Tuzantán		14.62	
			Acapetahua		14.95	
			Huixtla		15.04	
			Huehuetán		15.62	
			Villa Comaltitlán		16.83	
			Mapastepec		19.35	
			Acacoyagua		23.90	
			Escuintla		31.71	
			Tumbalá		32.56	
			Sunuapa		46.08	
			Ixtacomitán		49.44	
			Nacajuca		Tabasco	52.94
			Ixtapangajoya		Chiapas	54.39
			Reforma	78.63		
			Solosuchiapa	84.11		

3	7	Salto de Agua	Salto de Agua	Chiapas	0.00
			Mazatán		29.67
			Metapa		42.06
			Frontera Hidalgo		47.18
			Maravilla Tenejapa		62.55
			Palenque		69.75
			Francisco León		110.40
4	5	Jalapa	Jalapa	Tabasco	0.00
			Tacotalpa		51.95
			Teapa		56.59
			Centro		59.56
		Suchiate	Chiapas	69.08	
5	6	Tecoanapa	Tecoanapa	Guerrero	0.00
			Ayutla de Los Libres		13.16
			Ometepec		38.52
			Florencio Villarreal		56.80
			San Marcos		85.90
			Xochistlahuaca		130.43
6	4	Cuajinicuilapa	Cuajinicuilapa	Guerrero	0.00
			San Luis Acatlán		55.15
			Marquelia		70.91
			Igualapa		84.03

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP

En la segunda columna de la tabla 10.6 se aprecia que cada uno de los conglomerados obtenidos posee un número distinto de elementos: siendo el Conglomerado No. 2 el más numeroso de todos, con 16 municipios.

b) Características

La tabla 10.7 revela diferencias claras entre los seis conglomerados. Resulta útil considerarlas con respecto al valor promedio o típico para los 48 municipios, representado en la última columna.

Tabla 10.7 Valores promedio por conglomerado

Variable	Conglomerados 2010-2013						Municipio típico
	1	2	3	4	5	6	
SS	4,752.40	583.76	233.96	150.89	37.00	2.94	1,239.38
SC	4,743.50	581.70	223.79	150.83	36.92	2.94	1,235.34
% SC	99.60	98.66	94.01	98.72	99.24	100.00	98.37
Volumen	1,966.81	247.28	104.94	101.43	32.16	2.53	522.28
Rend	0.41	0.42	0.45	0.69	0.89	0.88	0.55
PMR real	42,026.81	37,350.77	29,061.69	41,036.38	5,354.72	5,209.47	30,822.09
\$Rend real	17,184.79	15,458.72	12,936.57	28,592.83	4,757.74	4,570.24	14,573.65
Valor real	82.87	8.96	2.94	4.32	0.17	0.01	21.15

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP

A pesar de que la segmentación obtenida no incluyó coordenada geográfica alguna, el cultivo del cacao presenta resultados regionales particularmente interesantes, ya que la ubicación geográfica de los seis conglomerados productivos se traduce en zonas compuestas por municipios que en su mayoría son contiguos.

En lo relativo al sexto conglomerado, cabe señalar que la ubicación específica de Marquelia es un municipio guerrerense de creación relativamente reciente (año 2002), por lo que su localización exacta puede resultar menos inmediata para el lector.

c) Producción marginal

Para el lector puede ser útil conocer los diez municipios cuya producción de cacao fue considerada marginal en el presente análisis. En la tabla se reproduce la lista en orden alfabético y por estado: son los municipios que entre 2010 y 2013 registraron cacao sembrado en alguna superficie de temporal, pero obtuvieron de él un solo año de cosecha o ninguno.

Tabla 10.8 Municipios de producción marginal 2010-2013

Municipio	Estado	Municipio	Estado
Marqués de Comillas	Chiapas	San Juan Comaltepec	Oaxaca
Ayotzintepec	Oaxaca	San Juan Cotzocón	
Cosolapa		San Juan Petlapa	
San Felipe Usila		Santa María Jacatepec	
San Juan Bautista Valle Nacional		Santiago Choápam	

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP

10.3 Conclusiones

La producción de cacao durante 2010-2013 se realizó principalmente en los estados de Tabasco, Chiapas y Guerrero, mientras que se tiene evidencia de una producción marginal ubicada casi enteramente en Oaxaca. Por medio de un algoritmo divisorio de tipo jerárquico, el desempeño de los principales 48 municipios productores de cacao se agrupó en seis conglomerados que revelan importantes semejanzas internas y diferencias externas.

Aunque cada conglomerado pertenece a uno o dos estados, cabe recalcar que la realidad de la producción de cacao rebasa el tradicional desglose estatal: tanto en Tabasco como en Chiapas y Guerrero los resultados anteriores demuestran que existe más de un modo de producir, con logros y dificultades que comparten los municipios que conforman cada conglomerado. Ésta es la razón de ser del presente análisis (Shmueli et al., 2010).

a) Retos y oportunidades

El punto esencial de la presente investigación es observar los distintos retos y oportunidades por conglomerado que enfrenta el cultivo del cacao en tierras de temporal de México. Cabe recalcar que algunos puntos podrían enriquecerse considerablemente con información sobre la variedad de cacao cultivada, el tipo de suelo empleado, la calidad del producto obtenido, la forma de comercialización y el destino final, incluyendo su posible exportación.

Como el lector podrá apreciar, el primer conglomerado abarca municipios contiguos del oeste de Tabasco y noroeste de Chiapas. Presenta rasgos notables: su volumen de producción es el más alto de todos y el precio medio rural que obtienen sus productores también es el más elevado. Dado que en sus municipios típicamente se cosecha el 99.60% de la superficie sembrada, se deduce que sus tierras se encuentran esencialmente en producción y sin registrar pérdidas totales. Si bien su precio de comercialización sugiere que la calidad de su producto puede ser la más alta, este grupo de municipios presenta el rendimiento más bajo de todos, con un promedio de 0.41 toneladas por hectárea cosechada. Mientras no pierda la calidad que lo distingue, este conglomerado podría beneficiarse de la experiencia de los demás municipios para mejorar sus niveles de rendimiento. En este sentido, las diferencias con los municipios de Guerrero pueden ser demasiado grandes, pero el cuarto conglomerado se encuentra en tierras cercanas: podría aprender de él técnicas viables para elevar el rendimiento.

El segundo conglomerado ocupa el segundo lugar en volumen de producción, pero no genera más que la octava parte de lo que cosecha el primero. Se parece bastante al primer conglomerado porque cosecha el 98.66% de la superficie sembrada y registra el segundo rendimiento más bajo de todos con 0.42 toneladas por hectárea cosechada. Pero su precio medio rural real es el tercero de todos. Para mejorar su desempeño, tendría sentido que analizara cómo el primer conglomerado posee mayor superficie sembrada y cómo los conglomerados primero y cuarto obtienen mejor precio real de comercialización. De los conglomerados cuatro, cinco y seis, también podría aprender maneras de aumentar su rendimiento sin perder la calidad actual de su producto.

Con un volumen de producción similar, siguen los conglomerados tercero y cuarto, que por lo demás difieren mucho entre sí. El tercero parece ser el único que posiblemente incluya tierras nuevas y en desarrollo (o pérdidas totales), ya que en promedio cosecha el 94.01% de las hectáreas sembradas, mientras que el cuarto con un valor de 98.72% parece excluir estas posibilidades.

Con un precio medio rural real y un rendimiento 53.33% y 41.20% mayores, respectivamente, el cuarto conglomerado presenta grandes ventajas sobre el tercero.

Finalmente, los municipios productores guerrerenses que fueron aislados desde el inicio presentan los contrastes más notables con la producción de cacao en Tabasco y Chiapas. Con mucho, su volumen de producción y su precio medio rural real son los más bajos, mientras que su nivel de rendimiento (entre 0.88 y 0.89 toneladas por hectárea) es entre 28% y 117% mayor que el de los demás. En síntesis, los conglomerados quinto y sexto parecen ser la antítesis del primero, excepto en su porcentaje casi igual a 100% de tierras en producción que no parecen registrar hectáreas en desarrollo y no parecen sufrir pérdidas totales.

b) Otras consideraciones

El presente artículo obedece a un esfuerzo por aplicar ciencias básicas para generar resultados en materia de productividad y sustentabilidad que puedan apoyar a los tomadores de decisiones de la agricultura en México.

Concretamente, lo que interesa aquí es promover el uso del algoritmo divisorio de carácter jerárquico para generar conglomerados productivos. A modo de ejemplo, se aplicó dicha técnica de la estadística multivariada al ejemplo del cacao cultivado en México de 2010 a 2013. Naturalmente, sobre el cacao habría mucho más que decir, por ejemplo en cuanto a las variedades que se cultivan de él en Tabasco, Chiapas y Guerrero, así como acerca de la calidad del producto y las circunstancias de comercialización de cada municipio. Esto requiere bases de datos adicionales que se podrían integrar al presente estudio para enriquecerlo.

Cabe recalcar que los conglomerados productivos propuestos aquí se generaron sin tomar en cuenta la ubicación geográfica de los municipios por clasificar, con lo cual los conglomerados pudieron haberse dispersado libremente (como ocurre con otros cultivos perennes, como el nopal verdura en tierras de riego). Sin embargo, la naturaleza de los segmentos obtenidos demuestra que la realidad productiva del cacao está profundamente ligada a la realidad regional, con matices relevantes por explorar en cada conglomerado.

10.4 Referencias

Índices de Precios, INPC Índice General. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Consultado el 8 de octubre de 2014 en: www.inegi.org.mx

Jain, A., “Data clustering: 50 years beyond K-means”, *Pattern Recognition Letters* 31 (2010), pp. 651-666

Johnson, R. y Wichern, D., *Applied Multivariate Statistics*, New Jersey EUA, Prentice Hall, 2002, 767 pp.

Producción agropecuaria, producción anual. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Consultado el 8 de octubre de 2014 en: www.siap.gob.mx

Shmueli, G., Patel, N. y Bruce, P., *Data Mining for Business Intelligence*, New Jersey EUA, Wiley, 2010, 404 pp.

La teoría difusa en la modelación de sistemas agrícolas

SALAZAR-MORENO, Raquel y LÓPEZ-CRUZ, Irineo Lorenzo

R. Salazar y I. López

Posgrado en ingeniería Agrícola y Uso integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México.
raquels60@hotmail.com

D. Sepúlveda, R. Salazar, F. Pérez y J. Rocha (eds.) Ciencias Químicas y Matemáticas-©ECORFAN, Texcoco de Mora-México, 2015

11 Introducción

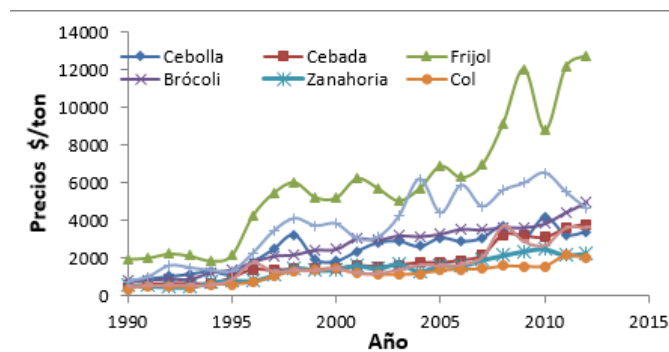
Debido a la necesidad de optimizar el manejo del agua en la agricultura, se han realizado muchos estudios aplicados a Distritos de Riego. Ortega et al. (2009) propuso un modelo para optimización de recursos en el Distrito de Riego 005 localizado en Chihuahua, el autor utilizó un modelo de programación lineal para maximizar el beneficio sujeto a restricciones de agua y superficie, y encontró cuatro patrones de cultivo que maximizaban el beneficio.

Florencio et al. (2002) modela escenarios con programación lineal en el Distrito de Riego Alto Río Lerma para estimar el valor económico del agua, encontró que el precio del agua puede variar entre 0.54 y 2.28 pesos/ m³ para el agua superficial, y entre 0.66 y 1.25 para el agua subterránea, precios que son mucho más elevados que los actuales.

Otro enfoque que también se ha utilizado en distritos de riego en México es el análisis multiobjetivo para ayudar a la toma de decisiones. Sánchez et al.(2006) aplicó teoría multiobjetivo al Distrito de Riego 017 utilizando el criterio: productividad del agua para el riego, incrementar la eficiencia en la conducción, incremento en la eficiencia global. Los autores concluyeron que esta herramienta es muy útil cuando tenemos objetivos conflictivos relacionados con el manejo del agua. Salazar et al., (2005) aplicó toma de decisiones con múltiples objetivos considerando factores económicos y ambientales encontrando una solución compromiso para minimizar el daño ambiental en el Distrito de Riego Alto Río Lerma y al mismo tiempo incrementar los beneficios económicos. También, Salazar et al., (2010) trata el problema de distribución del agua entre la agricultura, industria y uso doméstico en el valle de México, se proponen tres escenarios de política y dos órdenes de prioridad, la decisión final dependerá del tomador de decisiones final. Bournaris et al.(2009) aborda el problema de planificación de una región de riego en el norte de Grecia, las funciones objetivo es el margen de ganancia, el uso de fertilizantes y minimización de la mano de obra, y compara tres métodos el modelo de programación matemática multicriterio simple, programación lineal y el modelo difuso de multicriterio de programación matemática, el autor concluye que el último modelo es el más confiable para la planificación agrícola en diferentes regiones.

En cualquier problema de planificación del riego existe incertidumbre en diferentes variables tales como la precipitación, que determina la cantidad de agua superficial disponible para el riego, y también existe incertidumbre en los precios que los productores obtendrán de la venta de sus cosechas. La Figura 11 muestra la tendencia de precios de los principales cultivos agrícolas en el DR011 durante el periodo 1990-2013, algunos productos muestran mayor variabilidad como el frijol y jitomate.

Figura 11 Tendencia de precios de los principales cultivos en el DR 011



Para este tipo de situaciones de incertidumbre en los precios, los modelos difusos han sido utilizados con éxito.

La lógica difusa incorpora una manera alternativa de pensamiento, lo cual permite modelar sistemas complejos utilizando altos niveles de abstracción que se originan a través del conocimiento y experiencia. Este tipo de modelación permite expresar este conocimiento con conceptos subjetivos que son mapeados a rangos numéricos. La teoría difusa provee el soporte matemático para capturar incertidumbres asociadas con procesos humanos cognitivos

Un subconjunto A de un conjunto X puede ser definido como un conjunto de pares ordenados, cada uno con el primer elemento de X, y el segundo elemento en el intervalo [0, 1], hace un mapeo $\mu_A : X \rightarrow [0, 1]$, cero indica que el elemento no es miembro del conjunto y valores entre cero y uno indica diferentes grados de membresía.

Un conjunto difuso A se llama número difuso trapezoidal con intervalo de tolerancia [a, b], a la izquierda $a-\alpha$ y la derecha $b+\beta$ y tiene la forma descrita en la Figura 11.1, en la misma figura se define el número triangular:

Figura 11.1

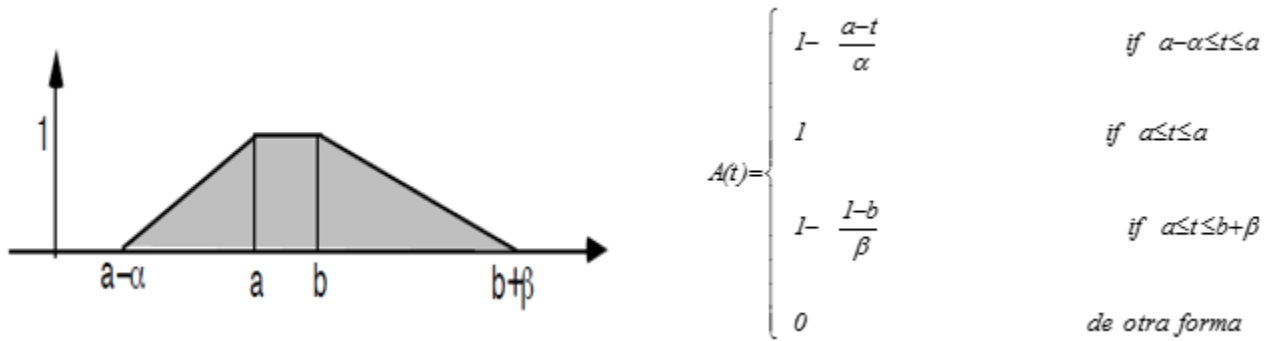
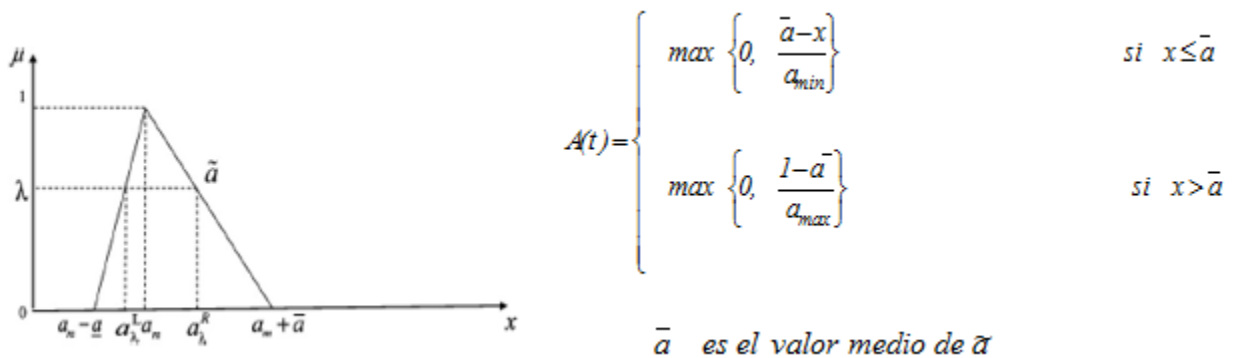


Figura 11.2 Numero Fuzzy Trapezoidal (arriba), triangular (abajo)



La toma de decisiones en la planificación agrícola frecuentemente presenta información con comportamiento difuso (no determinístico). Este tipo de información pueden ser los rendimientos de los cultivos, el precio de los productos e insumos (Xieting et al 2010).

Los coeficientes de ganancia en la producción agrícola también dependen de factores inciertos, el análisis estocástico puede ser el modelo más natural que surge en estos casos con los precios como variables aleatorias. Sin embargo, las funciones de densidad de probabilidad de las variables aleatorias pueden ser difíciles de obtener. Un enfoque alternativo fue propuesto por Itoh (2003) que se refiere a encontrar el valor mínimo de la maximización de las ganancias totales, sujeto a las distribuciones de probabilidad de los coeficientes de ganancias, los cuales fueron tratados como vectores aleatorios discretos. Garg and Raj (2010) mejoró el modelo de Itoh aplicando Programación Lineal Difusa multiobjetivo al mismo problema, y concluyó que los resultados obtenidos en su algoritmo son claramente superiores a los del enfoque utilizado por Itoh al mismo problema debido a que este enfoque es libre de cualquier valor arbitrario del parámetro “d”.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo de Programación Lineal Difusa Multiobjetivo, para encontrar el patrón de cultivos óptimo para la situación específica de incertidumbre en los precios de los productos agrícolas sembrados en el DR 011.

11.1 Metodología

El Distrito de Riego Alto Rio Lerma (DR 011) tiene 112, 772 hectáreas bajo riego de las cuales 77, 697 hectáreas se riegan con agua superficial, 7,421 hectáreas son regadas con pozos oficiales y 27,654 hectáreas de pozos particulares. Los principales cultivos otoño-invierno son trigo, frijol, brócoli y cebada los cuales requieren de 4 a 5 riegos. Los cultivos de primavera-verano son: sorgo, maíz, frijol y brócoli, los cuales requieren uno o dos riegos y esperan por la lluvia. En 1999, el agua disponible superficial era de 872 MMC (millones de metros cúbicos) y la disponibilidad de agua subterránea de 330 MMC, con reducción en la disponibilidad de 10 % cada año (Pérez et al., 2011). Sin embargo, La Comisión Nacional del Agua (CNA) reporta que para el periodo 2013-2014, la disponibilidad del agua sería de 800 MMC para el riego de 46, 000 hectáreas en el ciclo otoño-invierno, y 77,000 hectáreas in primavera y 2º cultivos (Domínguez, 2013).

En la tabla 11 se presentan los principales cultivos en el Distrito de Riego 011 durante el periodo 1998-2015, para las estaciones: Otoño-Invierno, Primavera-Verano y Segundos Cultivos que se siembran después de la cosecha de los cultivos de invierno o primavera.

Tabla 11 Requerimientos de agua del cultivo para diferentes fuentes de agua

	Cultivo	Min area (has)	Req anual CWR (m3)	Cultivos regados Sup(S) y Subt(G)		Cultivo	Min area (has)	Req anual CWR (m3)	Cultivos regados Sup(S) y Subt(G)
	Cebolla	256	7860	G		Cebolla	9	5590	G
O	Cebada	2082	7870	S	P	Cebada	0	6500	S
T	Frijol	29	6950	S	R	Frijol	199	5150	S
O	Brócoli	1057	9400	G	I	Brócoli	104	6870	G
	Zanahoria	79	7000	G		Zanahoria	22	7150	G
I	Coliflor	273	9400	G	V	Maiz	161	6410	S
N	Jitomate	93	3700	G	E	Jitomate	54	6200	G
V	Trigo	8902	5800	S	R	Sorgo	313	8200	S
2º	Frijol	0	16670	S		Trigo	288	5800	S
Cult	Maiz	0	6410	S		MA Mínima área, Cultivos regados por agua superficial (S) y Agua subterránea (G). Requerimiento anual de agua (CWR)			
	Sorgo	415	2200	S					

En la tabla 11.1 se presenta la información de precios, rendimientos de los principales cultivos en el DR 011, se presentan 10 escenarios de precios de los cultivos tomando como año base 2009.

Tabla 11.1 Escenario de precios, rendimiento, y costo de producción en el DR 011 año 2009

	Cultivo	Escenarios de precios \$/ton										Rend Ton/ha	Costos \$/ha
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
I	Cebolla	909	1246	1548	1966	2957	2719	2966	3805	4222	3416	32.3	2736
N	Cebada	686	818	786	1560	1634	1847	1959	3320	3146	3835	4.24	1694
V	Frijol	2426	2667	2202	5490	5958	5909	6456	9327	8873	12790	1.1	1985
I	Brócoli	987	1083	1445	2616	3104	3271	3645	3717	3889	4984	13.1	26338
E	Zanahoria	698	591	862	1488	1524	1357	1646	2199	2530	2276	25.5	15000
R	Col	440	572	675	1530	1195	1230	1459	1625	1603	2046	33.6	15000
N	Jitomate	953	1898	1572	4032	3248	6407	6027	5712	6599	4645	32.7	13030
O	Trigo	619	724	708	1542	1263	1712	1718	3746	2721	3619	5.3	1771
P	Cebolla	909	1246	1548	1966	2957	2719	2966	3805	4222	3416	32.3	2736
R	Cebada	686	818	786	1560	1634	1847	1959	3320	3146	3835	4.24	1694
I	Frijol	2426	2667	2202	5490	5958	5909	6456	9327	8873	12790	1.1	1985
M	Brócoli	987	1083	1445	2616	3104	3271	3645	3717	3889	4984	13.1	26338
A	Zanahoria	698	591	862	1488	1524	1357	1646	2199	2530	2276	25.5	15000
V	Maiz	744	896	760	1585	1560	1732	2060	2868	2844	4021	7.38	8174
E	Jitomate	953	1898	1572	4032	3248	6407	6027	5712	6599	4645	32.7	13030
R	Sorgo	416	517	471	1105	1242	1371	1604	2352	2292	3422	3	603
A	Trigo	619	724	708	1542	1263	1712	1718	3746	2721	3619	5.3	1771
2nd	Frijol	2426	2667	2202	5490	5958	5909	6456	9327	8873	12790	1.1	1985
CULT	Maiz	744	896	760	1585	1560	1732	2060	2868	2844	4021	7.38	8174
	Sorgo	416	517	471	1105	1242	1371	1604	2352	2292	3422	3	603

Utilizando el enfoque propuesto por Garg and Raj (2010), aplicado al DR 011 y suponiendo incertidumbre en los precios, se plantea a continuación el modelo de programación lineal difusa multiobjetivo, suponiendo K predicciones en los precios, primero ignoramos la incertidumbre y construimos un modelo determinístico.

Para cada predicción de precios tenemos la siguiente función objetivo.

El objetivo se plantea de la siguiente manera:

$$z_k = \sum_{j=1}^n [(Y_j P_j^{(k)} - C_j)] * X_j \quad (1)$$

Donde:

z_k = beneficio neto en pesos(\$)

n = número de cultivos

Y_j = rendimiento cultivo j

$P_j^{(k)}$ = precio predicho del cultivo j en escenario k (pesos/ton)

C_j = costo de producción del cultivo j (peso/ha)

X_j = variable de decisión, área del cultivo j (ha)

Las restricciones son:

a). Cultivos de otoño- invierno requieren de mayor cantidad de agua para riego de allí que el agua durante este periodo es limitada

$$\sum_{j=1}^w X_j \leq A_w \quad (2)$$

b). El área limitada por los cultivos de primavera verano

$$\sum_{j=w+1}^n X_j \leq A_s \quad (A_s > A_w) \quad (3)$$

c). La disponibilidad anual del agua está limitada

$$\sum_{j=1}^w CWR_j X_j \leq WA \quad (4)$$

donde

CWR_j = requerimiento de agua del cultivo j por año

d). Algunos cultivos necesitan ser regadas por agua subterránea (G) y algunos por agua superficial (S) . Se agregan dos restricciones al modelo:

$$\sum_{j \in G} CWR_j X_j \leq WA_G \quad (5)$$

$$\sum_{j \in S} CWR_j X_j \leq WA_S \quad (6)$$

e). Cada cultivo requiere de un mínimo de área sembrada

$$X_j \geq X_j^{min} \quad (7)$$

Aplicando el modelo introducido por Garg and Raj tenemos que identificar primero los límites superiores e inferiores de cada objetivo. El límite superior e inferior se selecciona como el máximo (z_k^*) y mínimo (z_{k^*}) valor del objetivo que se obtienen utilizando el método Simplex. Dado que todos los objetivos y restricciones son lineales se elige la siguiente función de membresía:

$$\mu(z_k) = \begin{cases} \frac{z_k - z_{k^*}}{z_k^* - z_{k^*}} & \text{if } z_{k^*} \leq z_k \leq z_k^* \\ 0 & \text{if } z_k < z_{k^*} \end{cases} \quad (8)$$

El modelo multiobjetivo puede ser reemplazado maximizando el valor mínimo de la función de membresía $\alpha = \min_k \mu(z_k(x))$

El replanteamiento del problema es el siguiente:

$$\max \alpha \quad (9)$$

Sujeto a

$$\frac{\sum_{j=1}^n a_j^{(k)} X_j - z_{k^*}}{z_k^* - z_{k^*}} \geq \alpha \quad (k = 1, 2, \dots, M) \quad (10)$$

1. Donde

$$2. a_j^{(k)} = Y_j P_j^{(k)} - C_j \quad (11)$$

3. Note que (10) también es lineal y por lo tanto se puede escribir como:

$$4. \sum_{j=1}^n a_j^{(k)} X_j - \alpha(z_k^* - z_{k^*}) \geq z_{k^*} \quad (k = 1, 2, \dots, M) \quad (12)$$

5. En resumen el modelo lineal difuso multiobjetivo con k funciones objetivo, una para cada precio, la ecuación 12 genera 10 restricciones adicionales una por cada escenario de precio, se puede replantar como un modelo de programación lineal de la siguiente manera:

Max α

Sujeto a

$$\sum_{j=1}^W X_j \leq A_W$$

$$\sum_{j=W+1}^n X_j \leq A_S \quad (A_S > A_W)$$

$$\sum_{j=1}^W CWR_j X_j \leq WA$$

$$\sum_{j \in G} CWR_j X_j \leq WA_G$$

$$\sum_{j \in S} CWR_j X_j \leq WA_S$$

$$X_j \geq X_j^{\min}$$

$$6. \quad \sum_{j=1}^n a_j^{(k)} X_j - \alpha(z_k^* - z_{k*}) \geq z_{k*} \quad (k = 1, \dots, M) \quad (13)$$

En el modelo anterior, las variables de decisión son $X_j (1 \leq j \leq n)$ y se agrega una variable más que es α .

11.2 Resultados

Cada escenario de precio de la tabla 11.1 tiene un diferente objetivo a ser maximizado.

Utilizando programación lineal se obtuvo el máximo valor de cada objetivo y los valores correspondientes del resto de los objetivos, lo cual se muestra en la tabla 11.2.

Tabla 11.2 Ganancia para diez escenarios de precios en millones de pesos

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
Z1	1054		1842	2691	3738	3651	3949	5705	5808	5232
Z2	915	2368	1885	5874	4626	9495	8941	9156	10153	7549
Z3	1054	2274	2055	5231	4739	8227	7935	8633	9464	7285
Z4	915	2368	1885	5874	4626	9495	8941	9156	10153	7549
Z5	1039	2259	2038	5156	4755	8168	7898	8344	9413	7141
Z6	915	2368	1885	5874	4626	9495	8941	9156	10153	7549
Z7	915	2368	1885	5874	4626	9495	8941	9156	10153	7549
Z8	915	2368	1885	5874	4626	9495	8941	9156	10153	7549
Z9	696	2179	1648	5723	4543	9354	8925	8891	10162	7763
Z10	696	2179	1648	5723	4543	9354	8925	8891	10162	7763
Zmax-Zmin	358	875	407	3182	1016	5843	4992	3451	4354	2530

En la tabla 11.3, los valores en la diagonal representan el máximo de cada uno de los objetivos; sin embargo, podemos notar que cuando el objetivo 1 se maximiza también el objetivo 3 tiene el mismo valor y lo mismo se puede argumentar para el resto de las columnas.

Una descripción más detallada se encuentra en el Cuadro 4, en donde cada columna representa el padrón óptimo de cultivos para cada objetivo que fue maximizado. Durante la estación Otoño-Invierno se cambia el área cultivada de jitomate y trigo, de acuerdo al escenario de precios, el resto de los cultivos permanece con la misma área. En el ciclo primavera-verano la cebolla, sorgo, maíz, jitomate y trigo presentan variación en el área sembrada, de acuerdo al escenario de precios. La situación más drástica ocurre en la cebada, para este cultivo solo el escenario 5 puede ser factible, en el resto de los escenarios la recomendación es cero áreas sembradas para este cultivo, lo cual demuestra su baja rentabilidad.

Finalmente, el análisis de los segundos cultivos muestra que el maíz presenta las variaciones más drásticas, solo los escenarios de precios 9 y 10 son favorables para este cultivo.

Tabla 11.3 Escenarios óptimos del patrón de cultivos para maximización de ganancias

	Cultivo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Difuso
I	Cebolla	256	256	256	256	256	256	256	256	256	256	260
N	Cebada	2082	2082	2082	2082	2082	2082	2082	2082	2082	2082	2080
V	Frijol	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	30
I	brócoli	1057	1057	1057	1057	1057	1057	1057	1057	1057	1057	1060
E	zanahoria	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	80
R	Col	273	273	273	273	273	273	273	273	273	273	270
N	jitomate	93	33322	33322	33322	33322	33322	33322	33322	33322	33322	33320
O	Trigo	35967	8902	8902	8902	8902	8902	8902	8902	8902	8902	8900
P	cebolla	35668	9	13673	9	13673	9	9	9	9	9	10
R	cebada	0	0	0	0	50771	0	0	0	0	0	0
I	Frijol	199	199	199	199	199	199	199	199	199	199	200
M	brócoli	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	100
A	zanahoria	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	20
V	Maíz	161	161	161	161	161	161	161	161	26218	26218	34080
E	jitomate	54	12374	54	12374	54	12374	12374	12374	12374	12374	50
R	sorgo	313	313	313	313	313	313	313	313	313	313	310
A	Trigo	35228	52403	51059	52403	288	52403	52403	52403	288	288	30810
2nd	Frijol	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CULT	maíz	0	0	0	0	0	0	0	0	26057	26057	0
	sorgo	415	415	415	415	415	415	415	415	415	415	420
	Max Z *	1054	2368	2055	5874	4755	9495	8941	9156	10162	7763	4820

*beneficio neto en pesos mexicanos

La última columna del cuadro 4 presenta el resultado obtenido aplicando programación lineal difusa multiobjetivo, que representa el padrón de cultivos óptimo bajo incertidumbre y representa el mejor resultado que los productores pueden esperar bajo incertidumbre de precios, este resultado fue obtenido minimizando la máxima pérdida.

Los escenarios de 6-10 presentan resultados similares, hasta antes del renglón 14, en donde está el maíz de primavera. Asimismo, el área dedicada a trigo y maíz se incrementa sustancialmente en el ciclo Primavera- Verano.

El último renglón despliega el máximo ingreso neto para cada escenario incluyendo el escenario de programación lineal difusa multiobjetivo. El máximo ingreso neto se obtiene en el escenario 9, dado que el jitomate es uno de los cultivos más redituables, alcanzando el precio máximo en este escenario. Otra observación es que el máximo ingreso neto de los agricultores puede variar entre 1,054 a 10,162 millones de pesos, lo cual representa un rango grande de ingresos de 9,108 millones de pesos. El máximo ingreso neto obtenido en el modelo difuso multiobjetivo es de 4,820 millones pesos, no es tan elevado como el escenario 9, pero es el beneficio que los productores pueden esperar bajo incertidumbre distribuyendo la superficie disponible de manera óptima.

En la tabla 11.4 reporta el mejor uso de la superficie disponible bajo un escenario de incertidumbre de precios. Los cultivos más importantes son jitomate y trigo, en el ciclo otoño-invierno, así como maíz y trigo en el ciclo primavera- verano, y en segundos cultivos únicamente el sorgo es redituable.

Tabla 11.4 Resultados de un modelo de planificación con ganancias optimas bajo incertidumbre de precios

OTOÑO-INVIERNO									
Cultivos	Cebolla	Cebada	Frijol	Brócoli	Zanahoria	Coliflor	Jitomate	Trigo	
Has	260	2080	30	1060	80	270	33320	8900	
PRIMAVERA-VERANO									
Cultivos	Cebolla	Cebada	Frijol	Brócoli	Zanahoria	Maíz	Jitomate	Sorgo	Trigo
Has	10	0	200	100	20	34080	50	310	30810
2nd CULTIVOS									
Cultivos	Frijol	Maíz	Sorgo						
Has	0	0	420						

11.3 Conclusiones

En la agricultura se presenta un gran número de incertidumbres relacionadas con el clima y precios de los productos, aunque en algunas ocasiones están relacionadas. En este trabajo se aborda el problema cuando el productor se enfrenta a una gran incertidumbre en los precios, se construyeron 10 escenarios de precios basados en los registros de 1990-2013 y llevados a precios del 2009. Aunque existen varios enfoques para tratar este tipo de problemas, la teoría difusa se ha utilizado con éxito en trabajos anteriores.

En particular se aplicó programación lineal difusa multiobjetivo para resolver el problema de maximización de ganancias en el Distrito de Riego Alto Rio Lerma (011) con incertidumbre en los precios. Debido a que existen varios métodos difusos se eligió el método propuesto por Garg and Raj (2010), que utiliza una variable adicional α para convertir el problema multiobjetivo en un problema lineal con un solo objetivo.

Aplicando la metodología anterior, se encontró que los escenarios 6 y 9 fueron los más redituables, sin embargo hay una baja oportunidad de que el agricultor obtenga estos precios. Para invierno los cultivos más redituables fueron el jitomate y trigo, mientras que en primavera son el maíz, trigo, y de los segundos cultivos el sorgo es el más redituable.

La planificación de la producción agrícola es una tarea difícil debido a que los productores tienen que enfrentar factores incontrolables. De ahí que necesitamos distribuir la superficie disponible en un ambiente menos riesgoso. El enfoque que aquí se estudia provee una solución compromiso o la mejor solución que los agricultores pueden obtener para maximizar el mínimo valor de las ganancias totales dados los precios aleatorios. El área total ocupada por los cultivos de las estaciones fueron 112, 000 hectáreas, con una ganancia de 4820 millones de pesos.

11.4 Referencias

- Bournaris, T., Papathanasiou, J., Moulogianni, C., Manos, B. (2009). A Fuzzy Multicriteria Mathematical Programming model for planning agricultural regions. *NEW MEDIT N.* 4/2009.
- Domínguez C. (2013). Asignan 800 Mm³ al Estado. *Periodico Correo.* Guadalajara Jal, México/Noviembre. 29, 2013.
<https://www.google.com.mx/#q=Cuca+Dom%C3%ADnguez+%2FNoviembre+29%2C+2013>.
- Florencio, C. V., A. R. Valdivia, and C. A. Scott. (2002). Productividad del agua en el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma. *Agrociencia.* 36-004:483-493.
- Garg A., Raj, S.S. (2010). Optimization under uncertainty in agricultural production planning. Department of Mathematics, Banaras Hindu University INDIA.
- Itoh, T., Ishiib, H., and Nanseki, T. (2003). A model of crop planning under uncertainty in agricultural management. *Int. J. Production Economics* 81–82: 555–558.
- Ortega G, D., Mejía, S.E., Palacios, V.E., Pimentel, L.R., and García, E.A. (2009). Model for the Optimization of Resources for an Irrigation District. *Terra Latinoamericana* 27: 219-226.
- Salazar, M. R., Stone, J., Yakowitz, D., Slack, D. (2005). Multicriteria Analysis in an Irrigation District in Mexico. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* ASCE Nov/Dec 2005: 514-524.
- Salazar, M. R., Szidarovszky, F., López, C.I., Rojano, A.A. (2010). Multiobjective Linear Model Optimize Water Distribution in Mexican Valley. *J Optim Theory Appl* 144: 557-573. DOI 10.1007/s10957-009-9608-2.
- Sánchez C.I., Macías R.H., Heilman, P., González C.G., Mendoza M. S., Inzunza

M.A.,and Estrada A.J. (2006). Planeación multiobjetivo en los distritos de riego en México. Aplicación de un sistema de auxilio para la toma de decisiones. Ingeniería Hidráulica en México, XXI (3): 101-111.

Xieting, Z, Shaozhong, K., Fusheng, L., Zhangc, L.,Ping, G. (2010). Fuzzy multi-objective linear programming applying to crop area planning. Agricultural Water Management 98 (2010) 134–142.

Apéndice A Consejo Editor Universidad Autónoma Chapingo

PORTILLO-VÁZQUEZ, Marcos, PhD.
SANTOS-MELGOZA, David Martín, PhD.
PÉREZ-SÁNCHEZ, Sandra Laura, PhD.
SANTOS-MELGOZA, David Martín, PhD.
Universidad Autónoma Chapingo

TAVERA-CORTÉS, María Elena, PhD.
Instituto Politécnico Nacional

BRAVO-BENÍTEZ, Ernesto, PhD.
*Instituto de Investigaciones Económicas -
UNAM*

LUGO-ESPINOSA, Oziel, PhD.
MENDOZA-ONTIVEROS, Martha Marivel,
PhD
Universidad Autónoma del Estado de México

GARZA-BUENO, Laura Elena, PhD.
MARTÍNEZ-DAMIÁN, Miguel Angel, PhD.
*Instituto de Socioeconomía Estadística e
Informática (ISEI) -Colegio de postgraduados*

Apéndice B Consejo Editor ECORFAN

BERENJEII, Bidisha, PhD.

Amity University, India

PERALTA-FERRIZ, Cecilia, PhD.

Washington University, E.U.A

YAN-TSAI, Jeng, PhD.

Tamkang University, Taiwan

MIRANDA-TORRADO, Fernando, PhD.

*Universidad de Santiago de Compostela,
España*

PALACIO, Juan, PhD.

University of St. Gallen, Suiza

DAVID-FELDMAN, German, PhD.

*Johann Wolfgang Goethe Universität,
Alemania*

GUZMÁN-SALA, Andrés, PhD.

Université de Perpignan, Francia

VARGAS-HERNÁNDEZ, José, PhD.

Keele University, Inglaterra

AZIZ-POSWAL, Bilal. PhD.

University of the Punjab, Pakistan

HIRA, Anil, PhD.

Simon Fraser University, Canada

VILLASANTE, Sebastian, PhD.

Royal Swedish Academy of Sciences, Suecia

NAVARRO-FRÓMETA, Enrique, PhD.

*Instituto Azerbaidzhan de Petróleo y Química
Azizbekov, Rusia*

BELTRÁN-MORALES, Luis Felipe, PhD.

Universidad de Concepción, Chile

ARAUJO-BURGOS, Tania, PhD.

*Universita Degli Studi Di Napoli Federico II,
Italia*

PIRES-FERREIRA, Marão José, PhD.
Federal University of Maranhão, Brasil

RAÚL-CHAPARRO, Germán, PhD.
Universidad Central, Colombia

GANDICA-DE ROA, Elizabeth, PhD.
Universidad Católica del Uruguay, Montevideo

QUINTANILLA-CÓNDOR, Cerapio, PhD.
Universidad Nacional de Huancavelica, Peru

GARCÍA-ESPINOSA, Cecilia, PhD.
*Universidad Península de Santa Elena,
Ecuador*

ALVAREZ-ECHEVERRÍA, Francisco, PhD.
University José Matías Delgado, El Salvador.

GUZMÁN-HURTADO, Juan, PhD.
*Universidad Real y Pontifica de San Francisco
Xavier, Bolivia*

TUTOR-SÁNCHEZ, Joaquín PhD.
Universidad de la Habana, Cuba.

NUÑEZ-SELLES, Alberto, PhD.
*Universidad Evangelica Nacional, Republica
Dominicana*

ESCOBEDO-BONILLA, Cesar Marcial, PhD.
Universidad de Gante, Belgica

ARMADO-MATUTE, Arnaldo José, PhD.
Universidad de Carabobo, Venezuela

Apéndice C Comité Arbitral ECORFAN

JALIRI-CASTELLÓN, Carla Konradis, MsC.
Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier

GÓMEZ-MONGE, Rodrigo, PhD.
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

SALAMANCA-COTS, Maria Rosa, PhD.
Universidad Anahuac.

VITE-TORRES, Manuel, PhD.
Instituto Politécnico Nacional

ISLAS-RIVERA, Víctor Manuel, PhD.
Instituto Mexicano del Transporte

VILLALBA-PADILLA, Fátima Irina, PhD.
Escuela Superior de Economía ESE-IPN

ESCALETA-CHÁVEZ, Milka Elena, MsC.
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

VALDIVIA-ALTAMIRANO, William
Fernando, PhD.
Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo

COBOS-CAMPOS, Amalia Patricia, PhD.
Universidad Autónoma de Chihuahua

BELTRAN-MIRANDA, Claudia Patricia, PhD.
Universidad de Guadalajara

LINAREZ-PLACENCIA, Gildardo, PhD.
Universidad Tecnológica de San Luis Rio Colorado

VÁZQUEZ-OLARRA, Glafira, PhD.
Universidad Politécnica de Pénjamo

LOPEZ-URETA, Luz Cecilia, PhD.
Instituto Tecnológico Superior de Zapopan

CERVANTES-ROSAS, María de los Ángeles
PhD.
Universidad de Occidente.

GALAVIZ-RODRÍGUEZ, José Víctor, PhD.
Universidad Tecnológica de Tlaxcala

ORDÓÑEZ-GUTIÉRREZ, Sergio Adrián,
PhD.
Universidad Nacional Autónoma de México

RUIZ-AGUILAR, Graciela M.L., PhD.
Universidad de Guanajuato

GONZÁLEZ-GAXIOLA, Oswaldo, PhD.
Universidad Autónoma Metropolitana

GAVIRA-DURÓN, Nora, PhD.
Universidad Autónoma Metropolitana

ROCHA-RANGEL, Enrique, PhD.
Universidad Politécnica de Victoria

SANTILLÁN-NÚÑEZ, María Aída, PhD.
Universidad de Occidente

JIMÉNEZ-LÓPEZ, Victor Samuel, MsC.
Universidad Tecnológica Regional del Sur

ROVIROSA-HERNANDEZ, Ma. de Jesús,
PhD.
Universidad de Veracruz

CÓRDOVA-RANGEL, Arturo, PhD.
Universidad Politécnica de Aguascalientes

ÁLVAREZ-ECHEVERRÍA, Francisco
Antonio, MsC.
Universidad Nacional Autónoma de México

ACOSTA-NAVARRETE, María Susana, PhD.
*Universidad Tecnológica del Suroeste de
Guanajuato*

PELAYO-MACIEL, Jorge, PhD.
Universidad de Guadalajara

GUADARRAMA-GÓMEZ, Irma, MsC.
Universidad Tecnológica de la Riviera Maya

CASTILLO-DIEGO, Teresa Ivonne, PhD.
Universidad Tecnológica de la Mixteca

CASTRO-ENCISO, Salvador Fernando, PhD.
Universidad Latina

LIÑAN-CABELLO, Marco Agustin, PhD.
Universidad de Colima

MANJARREZ-LÓPEZ, Juan Carlos, PhD.
Universidad Tecnológica de Puebla

IBARRA-ZAVALA, Darío Gualupe, PhD.
Universidad Nacional Autónoma de México

MARTÍNEZ-GARCÍA, Miguel Ángel. PhD.
Escuela Superior de Economía

TREJO-GARCÍA, José Carlos, PhD.
Instituto Politécnico Nacional

KLAUCK, Deise, MsC.
Universidade Federal de Santa Catarina

