

**Informe final\* del Proyecto HH009**  
**Dinámica del flujo bidimensional y propiedades sortivas del humedal RAMSAR-Pátzcuaro**

**Responsable:** M en C. Martha Beatriz Rendón López  
**Institución:** Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo  
Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales  
Departamento de Ecología Acuática  
**Dirección:** Av. San Juanito Itzicuario s/n, San Juanito Itzicuario, Morelia, Mich, 58330, México  
**Teléfono/Fax:** 01 443 3272350 fax: 01 443 3272351  
**Fecha de inicio:** Enero 29, 2010.  
**Fecha de término:** Septiembre 21, 2015.  
**Principales resultados:** Hojas de cálculo, fotografías, informe final.  
**Forma de citar\*\* el informe final y otros resultados:** Rendón López, M. B. 2015. Dinámica del flujo bidimensional y propiedades sortivas del humedal RAMSAR-Pátzcuaro. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales. **Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No.HH009.** México D.F.

**Resumen:**

La pérdida y degradación de los humedales ha ocasionado la disminución de los beneficios y funciones que proveen. Una función fundamental, de los humedales es facilitar el ingreso de agua, debido a que durante las etapas húmedas contribuyen a infiltrar el agua superficial e incrementan los niveles del agua subterránea; sin embargo, durante la temporada de sequía el agua subterránea es la que mantiene la humedad de estos. El humedal sur del Lago de Pátzcuaro actualmente no está bajo ningún programa de conservación ni con un plan de manejo, y se ha detectado un deterioro progresivo por la presión de las actividades antropogénicas de la zona. Actualmente, al no identificarse la zona de recarga del humedal, ni conocer la importancia de la misma, se ha incurrido en la creación de numerosas norias que han disminuido el ingreso de agua a este ecosistema y como resultado la zona sur del lago ha perdido profundidad y por lo tanto eficiencia en la funcionalidad del humedal. Una forma de recuperar estos ecosistemas es por medio de la restauración ecológica. Este trabajo está orientado a establecer la zona de recarga y su interacción con el lago de Pátzcuaro, orientado a un ordenamiento en el uso sustentable de la zona RAMSAR 1447 y ofrecer alternativas de manejo del mismo para mejorar las condiciones tanto del humedal, como del lago y crear una oportunidad de ingreso económico a las comunidades establecidas en su ribera.

- 
- \* El presente documento no necesariamente contiene los principales resultados del proyecto correspondiente o la descripción de los mismos. Los proyectos apoyados por la CONABIO así como información adicional sobre ellos, pueden consultarse en [www.conabio.gob.mx](http://www.conabio.gob.mx)
  - \*\* El usuario tiene la obligación, de conformidad con el artículo 57 de la LFDA, de citar a los autores de obras individuales, así como a los compiladores. De manera que deberán citarse todos los responsables de los proyectos, que proveyeron datos, así como a la CONABIO como depositaria, compiladora y proveedora de la información. En su caso, el usuario deberá obtener del proveedor la información complementaria sobre la autoría específica de los datos.



COMISIÓN NACIONAL PARA EL CONOCIMIENTO Y USO DE LA BIODIVERSIDAD.  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES SOBRE LOS RECURSOS NATURALES DE LA  
UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO

# Dinámica del flujo bidimensional y propiedades sortivas del humedal RAMSAR-Pátzcuaro.

INFORME FINAL DEL PROYECTO CONABIO HH009/09



RESPONSABLE TÉCNICO: DRA. GLORIA LARIZA AYALA RAMÍREZ  
30 DE ABRIL DE 2015

## Contenido

I.- Objetivos .....	5
I.1 Objetivo General .....	5
I.2 Objetivos particulares .....	5
1. Zona de recarga y morfometría del humedal. ....	6
1.1 Topografía de la microcuenca .....	6
1.2 Tipo de suelo de la microcuenca.....	9
1.3 Hidrología de la microcuenca .....	11
1.4 Morfo-batimetría del humedal .....	13
1.5 Modelo hidrodinámico.....	16
1.5.1 Frecuencia de viento.....	16
1.5.2 Velocidad del viento.....	16
1.5.3 Longitud de viento.....	18
2. Disponibilidad de agua .....	22
2.1 Precipitación y evaporación. ....	22
2.2 Evapotranspiración.....	23
2.3 Escorrentía.....	28
2.4 Agua subsuperficial. ....	32
2.5 Almacenamiento de agua en el humedal.....	34
2.6 Tiempo de retención hídrica.....	35
2.7 Balance de agua. ....	38
3. Clima local y escenarios de cambio climático. ....	47
3.1 Clima local.....	47
3.2 Escenarios climáticos para el humedal.....	56
3.2.1 Métodos .....	57
3.2.2 Resultados.....	58
4. Composición fisicoquímica del agua y sedimentos .....	71
4.1 Calidad del agua .....	71
4.2 Variables en Sedimentos.....	83
5. Composición iónica.....	89
6.- Deterioro hídrico del humedal.....	91
6.1 Clasificación funcional del humedal.....	92
5.2 Estado trófico del humedal.....	98

7. Capacidad sortiva .....	104
7.1 Análisis de sortividad anual.....	105
7.2 Análisis de sortividad temporal (sequía y lluvia).....	110
8. Flujo de agua .....	117
9. Manejo del humedal .....	125
9.1 Organización.....	128
9.2 Estrategias y líneas de acción .....	133
9.2.1 Zona de restauración.....	133
9.2.2 Zona de protección.....	135
9.2.3 Zona de aprovechamiento sustentable .....	138
9.2.4 Zona de uso público.....	139
9.3. Modelo para el desarrollo sustentable del humedal .....	141
9.3.1. Programa de investigación .....	142
9.3.2. Programa de educación ambiental.....	143
9.3.3. Programa agroecológico .....	144
9.3.4. Transferencia de tecnología apropiada .....	145
9.3.5. Programa de organización social.....	146
9.3.6. Programa de desarrollo urbano .....	147
9.3.7. Aprovechamiento de los recursos ecosistémicos del humedal.....	148
9.3.8. Restauración y Saneamiento .....	149
9.3.9. Programa de protección.....	150
9.3.10. Programa Artesanal.....	151
9.3.11 Inspección y Vigilancia .....	152
9.3.12 Diversificación productiva.....	153
9.4. Mecanismos de instrumentación.....	154
9.5. Fuentes de financiamiento .....	158



## **I.- Objetivos**

### **I.1 Objetivo General**

*Evaluar el flujo bidimensional hídrico, intercambio iónico y características sortivas del humedal RAMSAR-Pátzcuaro para su rehabilitación.*

### **I.2 Objetivos particulares**

1. Delimitar la zona de recarga y morfometría del humedal.
2. Evaluar disponibilidad de agua (infiltrada y escorrentía) del humedal.
3. Establecer el microclima local y escenarios de efectos de cambio climático.
4. Determinar la composición fisicoquímica del agua de infiltración y escorrentía.
5. Establecer la composición iónica del agua en el humedal.
6. Establecer el grado de deterioro hídrico del humedal y del lago.
7. Determinar la capacidad sortiva del humedal
8. Desarrollar modelos bidimensionales de flujo de agua.
9. Propuesta de manejo para su restauración y conservación.

# 1. Zona de recarga y morfometría del humedal.

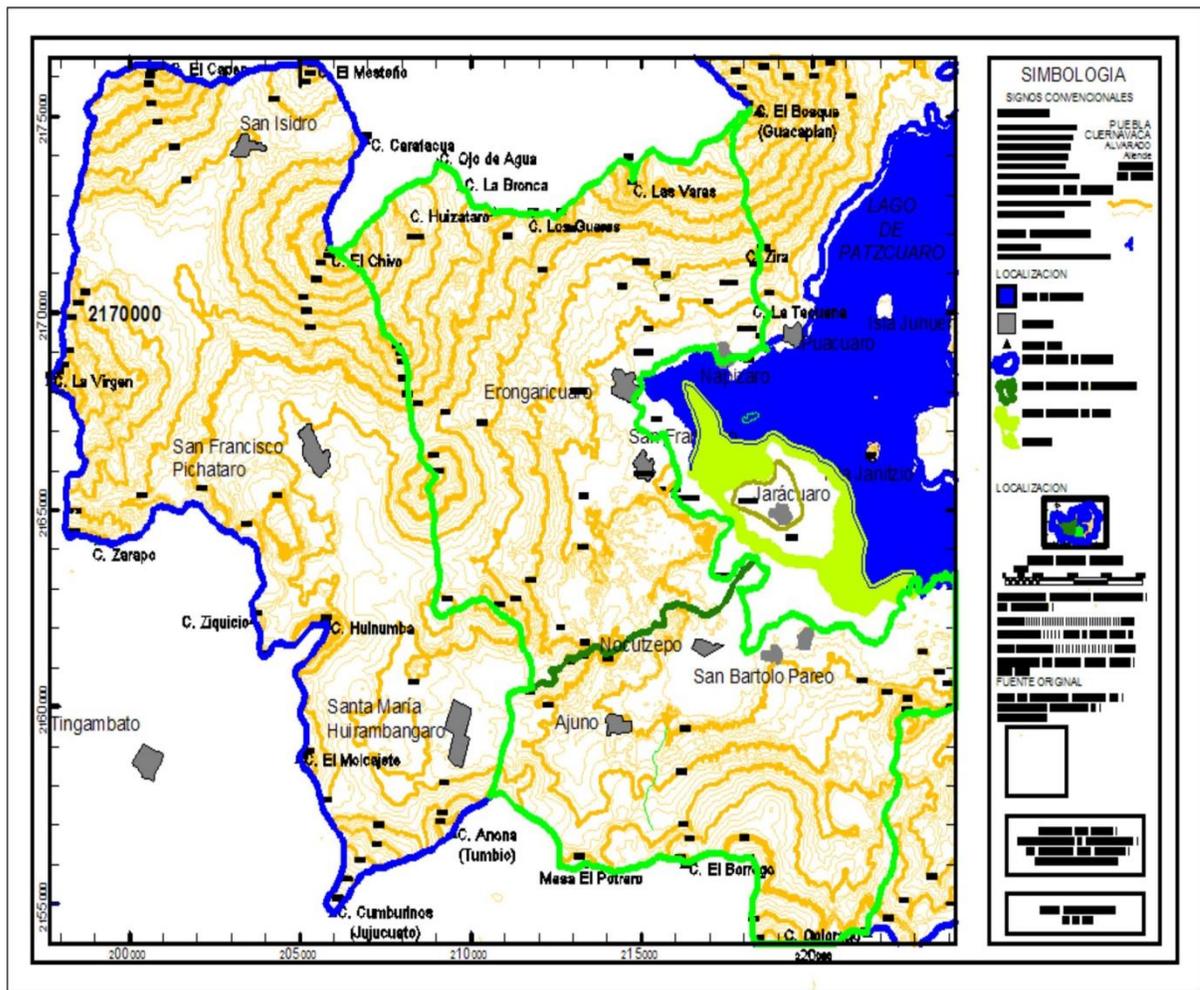
## 1.1 Topografía de la microcuenca

La cuenca del lago de Pátzcuaro se encuentra situada en el sur de la Altiplanicie Mexicana, la zona lacustre forma parte del Eje Neovolcánico Transversal, también conocido como Cinturón Volcánico Transmexicano, esta zona se encuentra situada entre dos grandes depresiones, por donde fluyen hacia el oeste las aguas del río Lerma y al sur las aguas del río Balsas, ambas desembocan al océano Pacífico.

Es una cuenca de tipo endorreico, es decir, que no presenta salida directa o indirecta hacia el mar, se formó de una depresión tectónica que se extiende sobre una superficie de 929 km<sup>2</sup>, y está dividida en ocho subcuencas de drenaje: Tzurumútaró, Pátzcuaro, Ajuno, Erongarícuaro, Napízaro, San Andrés Tziróndaro y Quiroga. El lago de Pátzcuaro presenta una extensión de 130 km<sup>2</sup>, en territorio perteneciente a los municipios de Quiroga, Tzintzuntzan, Pátzcuaro y Erongarícuaro, de los cuales 90.34 km<sup>2</sup> son de aguas abiertas, 25.21 km<sup>2</sup> se encuentran cubiertos de vegetación acuática y 2.85 km<sup>2</sup> corresponden a la superficie insular (Gómez-Tagle Chávez et al., 2002). Alrededor del lago se han establecido aproximadamente 25 comunidades ribereñas de origen Purépecha, quienes son los usuarios directos de sus aguas y tierras (Chacón, 1991; Garduño, 2000; Garduño, 2002 e Israde *et al.*, 2005).

El humedal del presente estudio se localiza en el sur del lago de Pátzcuaro, constituye parte del litoral del lago, desde el conjunto insular Urandén de Morelos hasta Napízaro, entre las zonas que comprenden el seno de Erongarícuaro y el seno de Ihuatzio de acuerdo a la zonación establecida por De Buen (1941 y 1941a).

Al Sur del lago de Pátzcuaro se encuentran una serie de volcanes de tipo monogenético, derrames de lava, levantamientos de secuencias lacustres, depósitos de avalanchas y planicies que son el resultado de las regresiones del lago. Lo que hace posible distinguir dos tipos de formaciones topográficas en las inmediaciones del humedal, mismas que delimitan las dos subcuencas que hidrológicamente inciden sobre él. (Figura. 1.1).



**Figura 1.1.** Mapa topográfico de la microcuenca que recarga el humedal sur de Pátzcuaro.

La primera de ellas, la subcuenca de Ajuno, ubicada hacia el Sureste del humedal, tomando en cuenta el ecosistema terrestre y siguiendo una dirección Sur Norte en las cercanías de los poblados de Tzentzenguaro, Santa Ana Chapitiro y San Pedro además de las inmediaciones del conjunto de islas de Urandén de Morelos, Urandén de Morales y Carián, el humedal se encuentra rodeado por una serie de antiguos volcanes de los que destaca el volcán de “El Estribo”(2400 msnm), en donde la pendiente es más abrupta(lo que corresponde a las faldas del volcán) en una menor distancia (3 km) hacia el humedal seguido de una planicie con lomas de material volcánico que alcanzan hasta los 60.0 m de altura, originadas por el depósito de una avalancha.

Estas pequeñas lomas favorecieron la formación de las islas antes mencionadas, y de los montículos en donde se ubican las localidades de Tzetzinguaro, Huecorio, La Tzipecua y el actual muelle de San Pedrito. Cabe destacar que en esta zona no existe una superficie agrícola considerable (Tabla 1.1).

La segunda zona, (o subcuenca de Erongarícuaro) que es una de las vertientes más largas, se ubica en la parte Suroeste del humedal, desde el área de lo que fue anteriormente la isla de Jarácuaro, pasando por los poblados de, Arocutín, Uricho, la cabecera municipal: Erongarícuaro, hasta Napízaro. En esta segunda zona se incluyen también las localidades de Tócuaro, Nocutzepo y San Bartolo. Siguiendo un perfil altitudinal en dirección Oeste – Este, el humedal está precedido, a una mayor distancia (6 km), por conos volcánicos entre los que destaca el volcán “La Taza” (2300 msnm), se continua con una unidad geológica denominada “malpaís”, seguida de un extenso valle de terrenos agrícolas que cubre la mayor superficie de esta zona el cual presenta pendientes suaves (Tabla 1.1). Derivado de la modificación del litoral y zonas de anegamiento, por las actividades agropecuarias, acumulación progresiva de azolve, aunado a las variaciones de nivel en el lago, se ha ocasionado la pérdida de profundidad y la consolidación de los sedimentos lo que unió la isla de Jarácuaro con tierra firme, la continuación de este proceso ha provocado la disminución en la profundidad de la columna de agua y el azolve continua avanzando y está uniendo la isla de Jarácuaro con la isla de Janitzio. En la tabla 1.2 se presenta la descripción de la red hidrológica en las subcuencas mediante la clasificación fotogeológica del drenaje (Guerra, 1980).

**Tabla 1.1.** Características morfométricas de las subcuencas de Erongarícuaro y Ajuno, Michoacán, México.

VARIABLES	SUBCUENCAS	
	Ajuno	Erongarícuaro
Área total (ha)	10,337.01	22,996.96
Perímetro (m)	61102.97	130096.1
Amplitud media (m)	89916.75	10402.27
Longitud (m)	31161.84	31161
Pendiente (%)	12.64	5.73

**Tabla 1.2.** Características del sistema de escurrimientos de las subcuencas que influyen el humedal de Pátzcuaro, Michoacán, México. (Gómez-Tagle, 1997)

<b>SUBCUENCA</b>	<b>AJUNO</b>	<b>ERONGARÍCUARO</b>
<b>CONFIGURACIÓN</b>	Radial semidendrítica.	Radial dendrítica
<b>TEXTURA</b>	Tosca o gruesa	Media a fina
<b>UNIDAD</b>	90% continua 10% discontinua	95% continua 5% discontinua
<b>UNIFORMIDAD</b>	Erosión laminar	Erosión en cárcavas
<b>DENSIDAD</b>	0.55	0.97
<b>RELACIÓN DE BIFURCACIÓN</b>	7.00	9.65

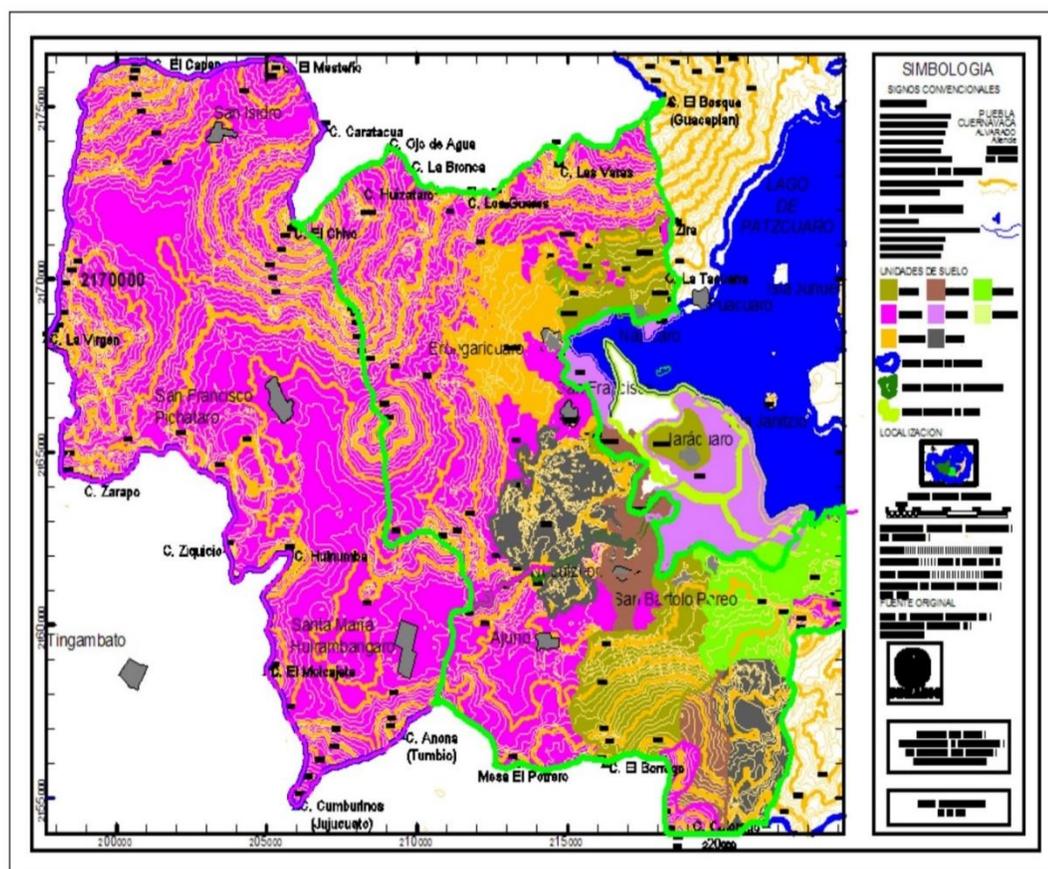
## 1.2 Tipo de suelo de la microcuenca

Los tipos de suelo se encuentran asociados con el origen volcánico de la región y éstos son representados en su mayoría por Andosoles y Luvisoles. Los suelos Andosoles son originados a partir de cenizas volcánicas, con un alto contenido de fósforo y son muy susceptibles a la erosión. Los suelos Luvisoles son también localizados en regiones volcánicas, son de color rojizo, ricos en arcilla, ácidos y al igual que los Andosoles muy susceptibles a la erosión. El humedal sur del lago de Pátzcuaro se encuentra influenciado por suelos de tipo Luvisol y Gleysol, éste último es el componente primario de la ribera del lago y en consecuencia del humedal (Gómez-Tagle, 1997).

Gómez-Tagle (1997) determinó que el uso del suelo es agrícola en un 40.80%, forestal en un 29.98%, el 14.70% corresponde a matorral y ganadero, y finalmente los poblados y el lago ocupan el 14.52% de la cuenca. El humedal sur se encuentra rodeado por una zona de uso de suelo agrícola y una pequeña área forestal (70ha).

La cuenca ha perdido hasta un 12% del potencial productivo de sus tierras por el mal manejo y la erosión. Más aún, por las mismas causas se encuentra en riesgo de perder hasta un 30% en los siguientes diez años. La intensidad de erosión varía en un rango de 0.0 a 98 ton/ha/año, presentando extremos hasta de 450 ton/ha/año y zonas de derrumbe de miles de toneladas, además partiendo de tierras abandonadas se ha generado una sucesión vegetal que compite con la permanencia de pinares y encinares, que es una de las formas naturales con más posibilidades económicas del área (Gómez-Tagle, 1997). (Figura 1.2).

En el humedal se ha identificado que del total del área (7.07Km<sup>2</sup>), 1.52km<sup>2</sup> es utilizado para el desarrollo de actividades agropecuarias, 1.42Km<sup>2</sup> es un área de asentamiento humano tipo rural y el 4.13Km<sup>2</sup> aún permanece vegetación acuática y semiacuática característica de ecosistemas acuáticos de tipo humedal



**Figura 1.2.** Mapa edafológico de la microcuenca del humedal sur de Pátzcuaro.

### 1.3 Hidrología de la microcuenca

El relieve accidentado del Cinturón Volcánico Transmexicano ha dado origen a tres grandes vertientes en el Estado de Michoacán (Norte, Centro y Sur), las cuales han formado cuatro regiones hidrológicas, la Región Hidrológica de la Costa de Michoacán (No. 17) localizada en la porción sur del Estado, la región Hidrológica del río Balsas (No. 18) localizada en la porción Central y la Región Hidrológica Lerma-Chapala-Santiago (No. 12) localizada en la porción norte de Michoacán, en donde se incluye las regiones lacustres de Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén. La cuenca del lago de Pátzcuaro colinda al Oriente con la cuenca del Río Grande de Morelia, al poniente con la del Río Lerma y al sur con la cuenca del lago de Zirahuén.

La cuenca del lago de Pátzcuaro es un sistema endorreico y su patrón de drenaje no se integra completamente al vaso lacustre debido al aprovechamiento de los escurrimientos superficiales en los diferentes sistemas de irrigación, y al proceso de infiltración del agua hacia el subsuelo que existe principalmente en la zonas de derrames de lava ubicadas en el sur y en el norte de este cuerpo de agua y que son ampliamente conocidas como “malpaís”. El patrón de drenaje se caracteriza por ser de tipo dendrítico en donde la mayoría de las corrientes superficiales convergen eventualmente en el lago, aunque en los conos volcánicos se identifica un tipo de drenaje superficial radial centrípeto y la mayor parte de sus escurrimientos son temporales.

El lago no cuenta con efluentes ni con tributarios importantes; es alimentado ocasionalmente, durante la época de lluvias, por arroyos temporales superficiales como son los arroyos de Santa Fé y Soto en el norte. Por el suroeste recibe las aguas del río San Gregorio que proviene de la cuenca del lago de Zirahuén como suministro de agua potable. Por el extremo oriental recibe las aguas de descargas agrícolas del canal de Chapultepec (Figura 1.3). La densidad de corrientes varía entre 0.55 y 1.43; de acuerdo con el índice de Gravelius. Se observa que su circularidad oscila entre los valores de 1.24 y 1.60 lo que indica que su forma es oval y que a la vez influye directamente en el tiempo de concentración del agua.

Por lo tanto, las entradas de agua al vaso lacustre se derivan exclusivamente de la lluvia estacional y de la infiltración, por lo que las variaciones de nivel son continuas (De Buen, 1944c; Gorenstein y Pollard, 1983, Chacón et al, 1991).

La precipitación pluvial permite que el lago reciba un total de 1,000 Mm<sup>3</sup> anuales, de los cuales 800 Mm<sup>3</sup> se pierden por el proceso de evapotranspiración; esto significa que existe un aporte real al lago de 200 Mm<sup>3</sup> (Barrera-Bassols, 1986). Sin embargo, la Comisión Nacional del Agua ha estimado el lago recibe un volumen medio anual de 111 Mm<sup>3</sup> (CNA, 2001).



**Figura 1.3.** Mapa hidrológico del humedal sur de Pátzcuaro.

#### 1.4 Morfo-batimetría del humedal

Se observa que la mayor parte de la ribera sur del lago, en comparación con la zona de aguas abiertas, es muy somera y de pendiente suave con un valor promedio de 1.38%, la presencia excesiva de la vegetación genera severas limitaciones para la navegación, la pesca y los movimientos del agua en superficie, particularmente en el área que corresponde a Erongarícuaro.

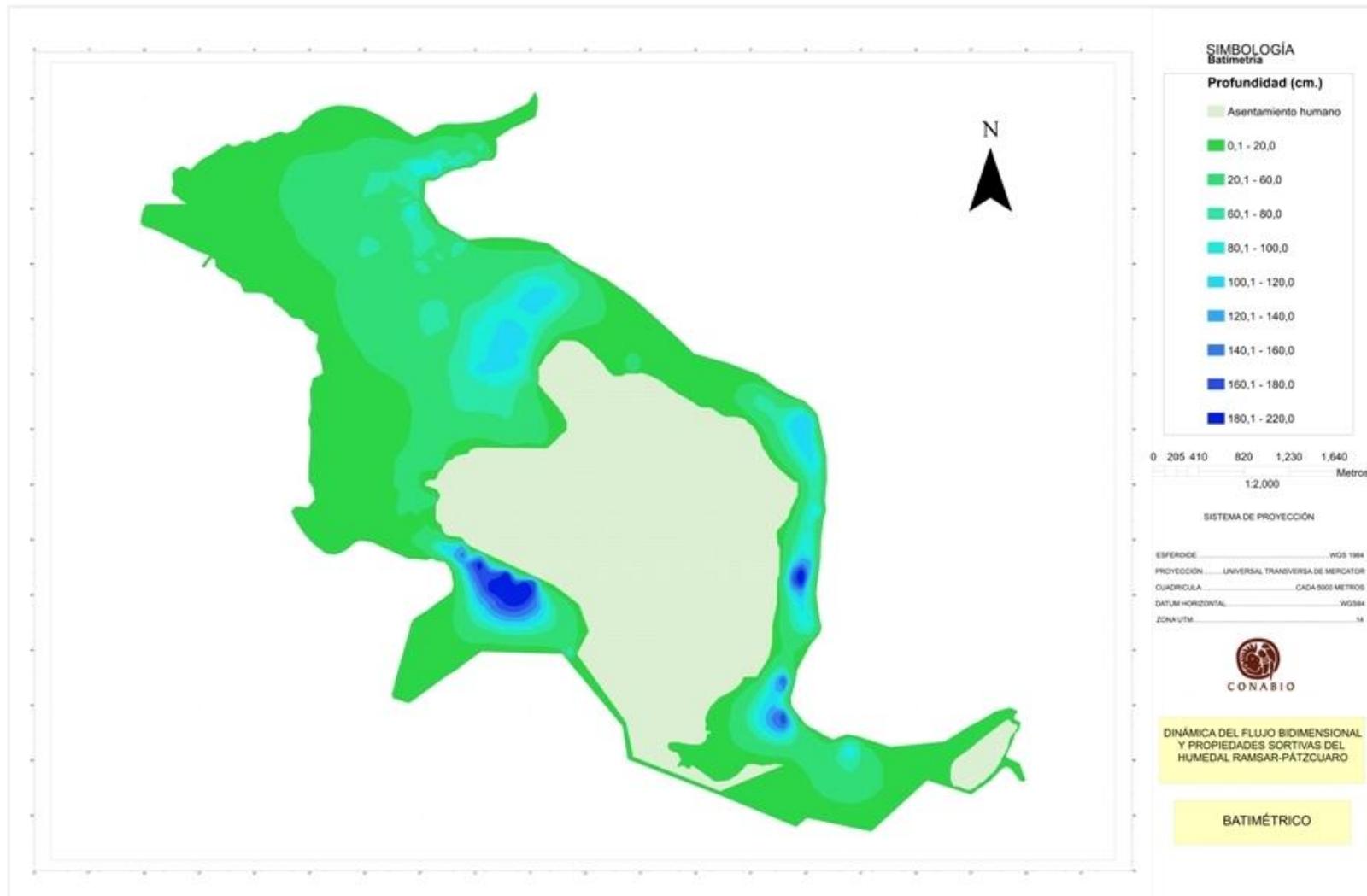
Comparando con un estudio morfométrico anterior (Chacón *et al*, 1988) se observa que la isolínea de 1.0 m se encuentra recorrida hasta lo que fue la isolínea de 3.0 m, mostrando un aparente desplazamiento de la ribera sur hacia el norte. Esta somerización es más evidente en la zona periférica de la ex isla de Jarácuaro y que ahora forma parte de un conjunto insular de tierra firme.

La profundidad que domina el humedal por su extensión (48%) son 0.20 m en un área de 690.15 ha. Existen algunas profundidades mayores derivadas de las actividades de dragado y corte de la vegetación acuática. Estos valores oscilan entre 1.90 y 2.78 m, usualmente durante todo el ciclo anual los canales de navegación mantuvieron una columna de agua de 2.0m en promedio, superando a los registrados para el humedal y área limnética del sur del lago de Pátzcuaro (Figura 1.4). De la misma manera, se observó que existe una distancia máxima de 540 metros entre la isla de Janitzio y la isla de Jarácuaro en donde las profundidades 1 m de profundidad.

La estimación planimétrica digital de las isolíneas, sugiere que en la zona sur del lago de Pátzcuaro posee una extensión de 2,104.29 ha con profundidades menores a 1.0 m. Se estima un área de humedal de 14018.08 ha, en donde se registró una profundidad promedio de 1.00 m, con un volumen de agua estimado de 639Mm<sup>3</sup> (Tabla 1.2)

**Tabla 1.2** Parámetros morfométricos del humedal

VARIABLES	VALOR	COORDENADA	
		INICIO	FIN
Área total (ha)(incluida las islas)	2,104.29		
Área del humedal (ha)(A)	1,418.08		
Área insular (ha)	686.20		
Área Jarácuaro	686.19		
Área Urandén de Morelos (ha)	0.018		
Perímetro (m)	45,227.770		
Desarrollo de línea de costa	0.014		
Profundidad máxima (m)	2.200		
Profundidad mínima (m)	0.100		
Profundidad promedio (m)	1.00		
Profundidad relativa (%)	2.350		
Profundidad media (A/V)	451,074.81		
Desarrollo de volumen	2.96		
Volumen(m3) (V)	639,660,165.78		
Amplitud máxima (m)	3,454.63	216614.89- 2164894.28	218627.55- 2167702.07
Longitud máxima (m)	6,383.98	215235.84- 2168360.53	221137.16- 2165925.46
Longitud máxima efectiva (m)	8,681.71	215297.96- 2168385.38	221572.00- 2162384.67
Pendiente (%)	4.770		
Dirección del viento (°)	318 (NNE)		
Longitud máxima efectiva de viento (m)	3,454.63		
Origen del viento (°)	157 – 202 (S)		



**Figura 1.4** Mapa morfo-batimétrico del humedal sur de Pátzcuaro

## **1.5 Modelo hidrodinámico.**

### *1.5.1 Frecuencia de viento*

Como parte del conjunto de datos climáticos se obtuvieron los registros de velocidad y dirección de los vientos. Con ellos se determinó que en el área de estudio predominan los vientos del sur suroeste (SSO) procedentes del rumbo  $202.5^\circ$  con una frecuencia de 29.0% del total. El rumbo que sigue en frecuencia de ocurrencia es del viento procedente del sur (S) ( $180^\circ$ ) y una ocurrencia de 16.6%. El viento procedente del sur sureste (SSE) con un rumbo de origen de  $157.5^\circ$  representa el 12.7% del total de datos. Sumando la frecuencia de los vientos que proceden de estas tres direcciones existe un 58.3% de incidencia de vientos de la región sur de la cuenca con dirección hacia el norte (Figura 1.5.).

### *1.5.2 Velocidad del viento*

El promedio estimado de la velocidad del viento fue de 2.7 m/s con un máximo de 22.5 m/s. El promedio de velocidad máxima fue de 10.31 m/s, mientras que el máximo registrado fue de 59.5 m/s, durante un periodo de fuertes vientos que se presentaron desde las 11:00 horas del 01 de marzo y que concluyó el día 03 de marzo a las 20:00 horas del año 2010.

La distribución de frecuencias de la velocidad del viento se presenta en la figura 1.6. Como ya se mencionó la mayor incidencia del viento procedió de la dirección sur suroeste (SSO) a una velocidad promedio de 14.76 m/s, la cual es considerada como un viento fuerte de acuerdo a las actuales escalas convencionales de clasificación de los vientos. La fuerza del viento S y SE es comparativamente menor con valores promedio de 8.61 y 7.88 m/s respectivamente. Los vientos procedentes del norte presentan una frecuencia de 11.8% con una velocidad promedio de 13.28 m/s. Estos vientos ocurrieron de manera esporádica y eventualmente sus altos valores fueron puntuales y se consideran como ráfagas ocasionales de viento.

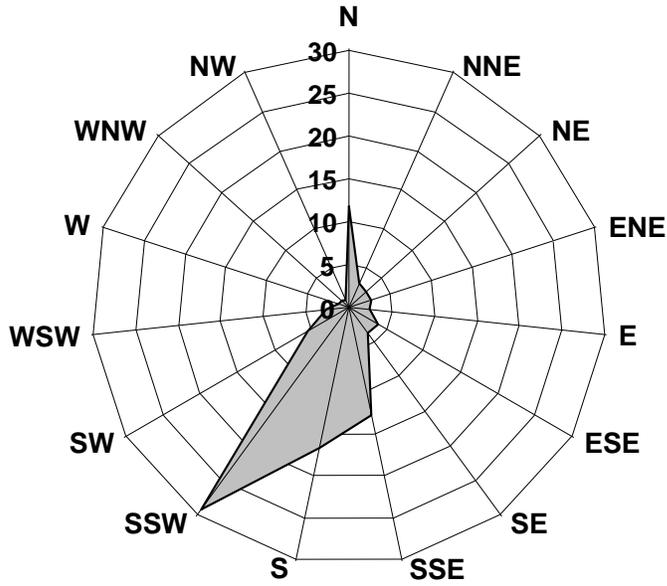


Figura 1.5 Frecuencia de la incidencia del viento (%).

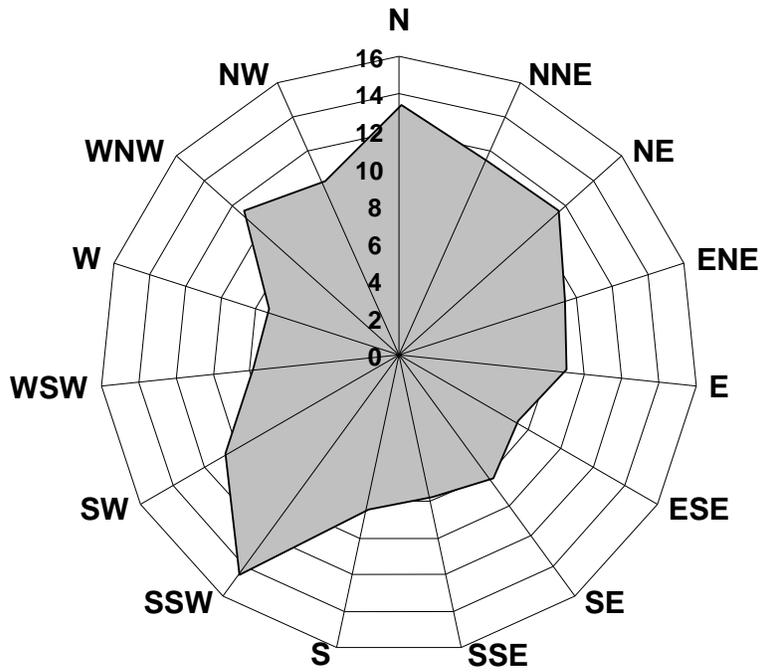


Figura 1.6. Frecuencia de la velocidad de viento

Por lo tanto, los vientos dominantes en la cuenca del lago de Pátzcuaro y de manera particular en la zona de estudio son los que proceden del sur suroeste (SSW), del sur (S) y del sur sureste (SSE), lo cuales se manifiestan con mayor permanencia y velocidad.

El análisis de hidrodinámica del humedal muestra datos de velocidad y dirección de viento, resultando en una predominan los vientos del Nornoroeste (NNE) y del sureste con una velocidad máxima de 8.0m/s (Tabla 1.3).

### 1.5.3 Longitud de viento

Derivado del estudio morfométrico se estimó que la longitud máxima efectiva de viento es de 3.5 Km. en dirección noroeste (318°). Tomando en consideración que los vientos dominantes proceden del sur, el humedal es un área protegida durante la mayor parte del año por los volcanes que lo anteceden y la corta distancia que recorren los vientos sobre la superficie del agua en el sitio de estudio, es decir, una amplitud máxima de igual longitud. (Figura 1.7).

**Tabla 1.3.** Registros de velocidad y dirección del viento preliminares en la zona del humedal sur del lago de Pátzcuaro.

Velocidad	Dirección	Velocidad	Dirección
1.6	NNE	3.2	NNE
0.0	NNE	1.6	NNW
3.9	NNE	1.6	NE
7	N	4.8	NNE
4.1	NNE	4.8	N
1.6	NNE	4.8	NNE
0.0	SE	8.0	N
1.6	NNE	6.4	NNW
3.3	NNE	4.8	N
1.6	NNE	3.2	N
1.6	NNE	3.2	W
3.2	NNE	4.8	WNW
8.0	NNE	4.8	N
8.0	N	3.2	NNE
1.6	NNE	6.4	WNW
1.6	NNE	0.0	SW

La generación de corrientes superficiales en el humedal sur del lago de Pátzcuaro se encuentra limitada por la baja incidencia de vientos intensos asociada a la pendiente suave del terreno, y sobre todo a la extensión de la vegetación acuática presente.

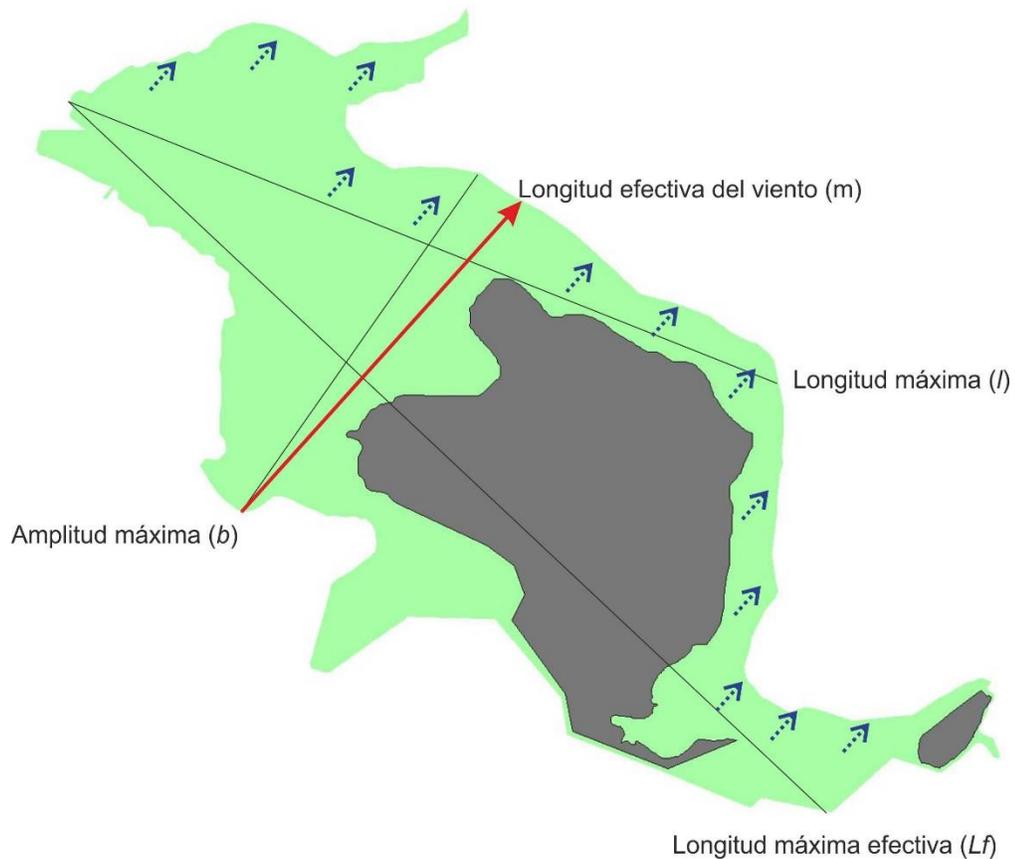
Los resultados de *hidrodinámica* en el área de estudio indican el dominio de corrientes conocidas como deriva superficial. Este tipo de movimiento se genera por la acción del viento sobre la superficie del agua y su intensidad depende de la velocidad, su duración y la distancia sobre la cual el viento ejerce su fuerza sin obstáculos en la superficie del agua (Bhowmik y Stall, 1978) (Figura 1.7).

La velocidad de la deriva superficial que se genera en la zona de estudio presentó un intervalo de 0.00 como mínimo y 16.6 cm/s como máximo.

El grado de asociación entre la deriva superficial generada con respecto a la velocidad del viento registrada en el campo durante el seguimiento de veletas se presenta en la Figura 1.8. Esta asociación, que no es directamente proporcional, registró para este estudio un coeficiente de correlación de 0.839 ( $P < 0.001$ ). Como puede observarse existe un incremento proporcional en la velocidad de la deriva superficial con respecto a la velocidad del viento.

Sin embargo, a medida que se alcanzan máximos en la velocidad del viento la curva de asociación entre estos dos parámetros alcanza una tendencia asintótica. Es decir, que la deriva superficial no se incrementa en velocidad a pesar del aumento en la velocidad y fuerza de arrastre del viento. Lo anterior sugiere que la distancia a la cual el viento ejerce su fuerza así como su duración pueden ser variables limitantes en la generación de corrientes superficiales.

La corriente superficial en los sitios de muestreo indica un estancamiento hídrico en el sistema natural con velocidades de corriente mínimas de 0.0 a 0.11 cm/s, con un valor promedio de 0.04 cm/s.



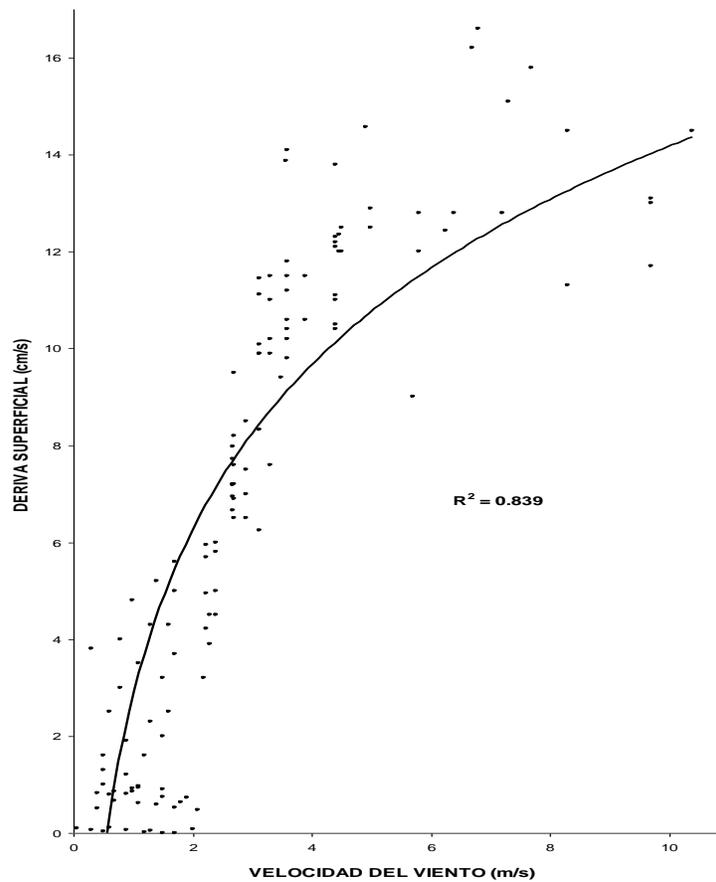
**Figura 1.7** Modelo de Hidrodinámica del humedal

En el humedal existen canales de navegación en los que se registraron velocidades mayores en el flujo de agua con un intervalo de 0.62 a 0.97 cm/s y un valor promedio de 0.82 cm/s. En aguas abiertas se registró una velocidad promedio de 0.54 cm/s.

Los registros en campo de velocidad del viento indican una velocidad promedio de 3.0 m/s con un máximo de 10.4 m/s. La desviación estándar de grupo de registros fue de 2.1 m/s. La fuerza de arrastre del viento en la generación de corrientes de deriva superficial fue de un valor promedio de 2.25% de eficiencia con un valor máximo de 12.6% y una desviación estándar de 1.4%.

Con la poca velocidad de la corriente del agua, se presenta una mayor colonización de plantas acuáticas lo que intensifica el estancamiento hidráulico de la zona, que a su vez repercute esencialmente en el aumento de temperatura y en consecuencia en el proceso de evaporación del agua

Finalmente este proceso se intensifica con la presencia del camino que comunica a lo que anteriormente fue la isla de Jarácuaro con tierra firme. La presencia del piedraplén y del puente con limitada comunicación hidráulica entre el seno Erongarícuaro y el resto de la ribera sur ha pronunciado los efectos del estancamiento. En este sentido el estancamiento hidráulico es menor en las zonas de las islas de Urandén de Morelos, Urandén Morales, así como los litorales de Tzetzénguaro, Huecorio, San Pedro Pareo.



**Figura 1.9** Asociación entre velocidad del viento y la corriente superficial ( $R^2= 0.839$ ;  $P<0.001$ )

## **2. Disponibilidad de agua**

Entre los servicios ecosistémicos que ofrecen los humedales, la regulación hídrica, es probablemente uno de los más importantes (MEA, 2005; Zedler y Kercher 2005; Mitsch y Gosselink, 2007; Elton et al, 2011; Vidal y González-Abreu, 2013). Esto se debe a tres características hidrológicas del humedal: el hidropериодо, almacenamiento y el tiempo de retención, que participan en la reducción de la velocidad de las escorrentías, promueven la recarga de agua subterránea y mantienen el nivel de agua en los ecosistemas acuáticos subyacentes (Howard-Williams, 1985; Junk, 2002; U.S. EPA, 2008; Cherry, 2011; Acreman y Holden, 2013).

En este capítulo se analiza la dinámica de los componentes hidrológicos (precipitación, evapotranspiración, escorrentía y agua subsuperficial) que determinan la variación anual del agua en el humedal, y establecen una aproximación al balance hídrico durante un periodo anual que va del mes de octubre de 2012 a septiembre de 2013.

### **2.1 Precipitación y evaporación.**

En la Figura 2.1 se presenta la evolución mensual de la precipitación, en donde se puede observar dos periodos bien definidos: uno seco desde octubre a mayo (sequía) y otro húmedo desde junio a septiembre (lluvias).

La precipitación acumulada durante este año fue de 1954.80mm, con un máximo de 1011.60mm en septiembre de 2013 y un mínimo de 2.4mm en diciembre de 2012.

Durante el periodo de sequía la precipitación mensual osciló entre 2.4mm y 65mm (Tabla 2.1). Acumulando un total 268.2 mm, que representa el 13.71% de la precipitación total acumulada.

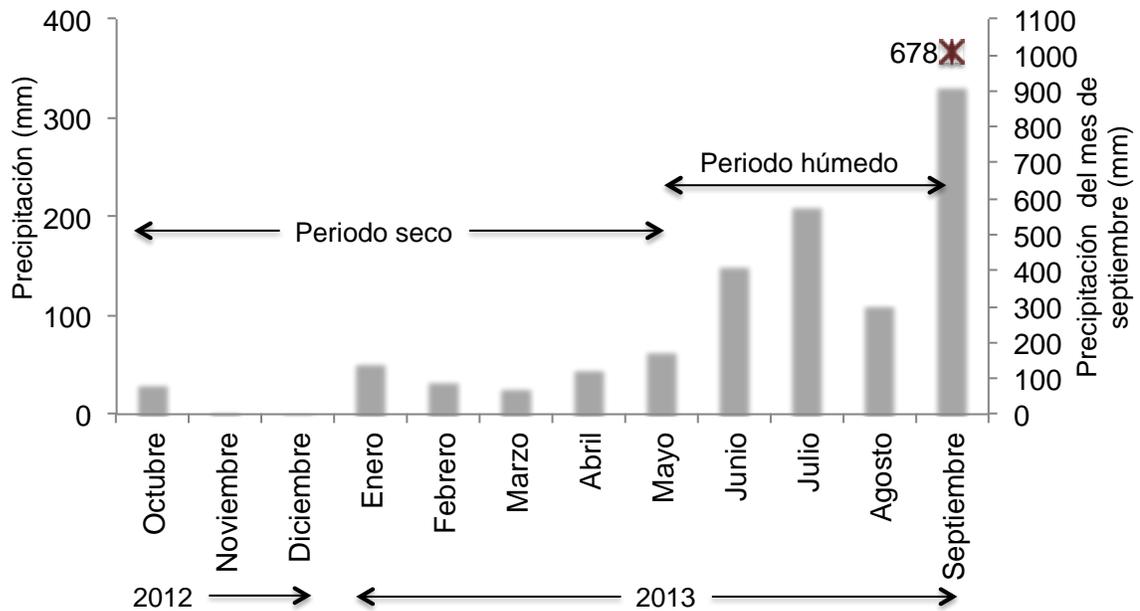
En el periodo húmedo los registros de precipitación se encuentran en el rango entre 151.2mm (junio) y 1011.6mm (septiembre), acumulándose 1686.6mm, mismos que representan el 86.28% del total de la precipitación. Sin embargo, en este periodo, el 59.98% del volumen de agua aportada por precipitación corresponde al mes de septiembre, acumulándose en tan solo cuatro días 678mm, equivalente al 67% de la precipitación total del mes de septiembre (Figura 2.1).

La pérdida de agua por evaporación en el humedal durante el ciclo anual estudiado, fue de 1240.16mm, con un máximo de 171.20mm en el mes de junio y un mínimo de 52.72mm en el mes de diciembre. En sequía se registró una evaporación total de 634.39mm (51.15%), y durante el periodo húmedo se acumuló una pérdida de agua por evaporación de 605.77mm (48.85%).

Estos resultados indican que la evaporación (E) domina durante nueve meses del año y que, en tan solo tres meses, la precipitación (P) sobrepasa la evaporación (P=212.1mm y E=153.65mm en julio, P=311.7 y E= 170.89 en agosto y P= 111.6 con E= 110.03 en septiembre) (Figura 2.2).

## **2.2 Evapotranspiración.**

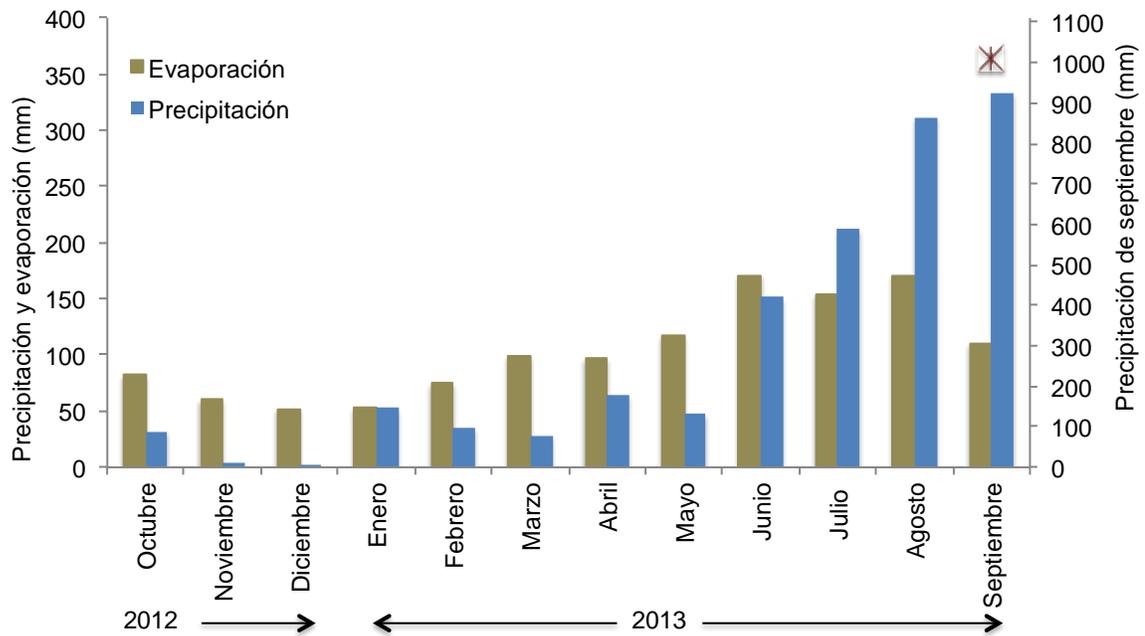
La pérdida total de agua por evapotranspiración se estimó en 1068.78mm, dentro de un rango de 51.81mm a 145.87mm (Tabla 2.1). Durante el periodo de sequía la evapotranspiración total fue de 606.35mm que representa el 57.0% del total anual. El valor máximo, en este periodo, se registró durante el mes de enero (100.23mm). Durante el periodo húmedo, la evapotranspiración fue de 462.43mm que es el 43.0% del total anual estimado, siendo en el mes de agosto cuando se registró el valor máximo (145.87mm).



**Figura 2.1.** Evolución de la precipitación mensual durante el periodo de estudio en el humedal Sur de Pátzcuaro. Se muestra en la gráfica el valor máximo de precipitación del mes de septiembre.

**Tabal 2.1.** Valores de las variables climáticas en el humedal sur de Pátzcuaro, durante el periodo de estudio (P=Precipitación, Ev=Evaporación, ET=Evapotranspiración).

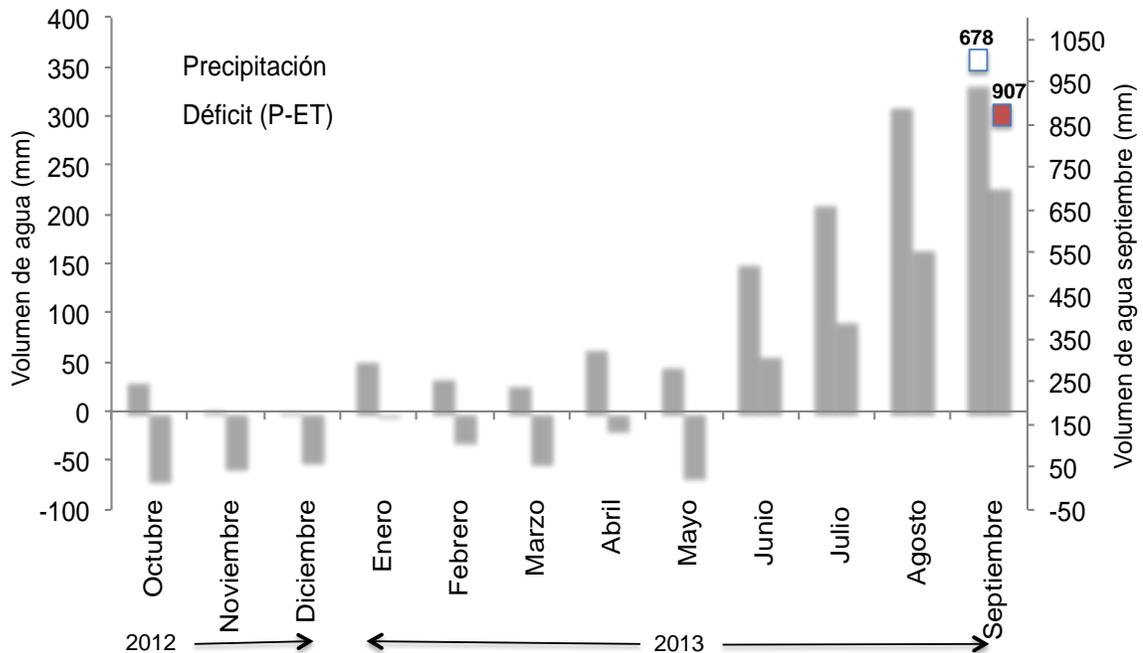
Mes	P (mm)	Ev (mm)	ET (mm)	Déficit (P-ET) (mm)
Octubre	32.20	81.86	100.25	-68.05
Noviembre	3.90	60.34	59.52	-55.62
Diciembre	2.40	51.72	51.81	-49.41
<b>Sequía</b> Enero	53.40	52.95	56.08	-2.68
Febrero	35.30	74.48	64.44	-29.14
Marzo	28.30	98.88	79.26	-50.96
Abril	65.00	97.01	81.93	-16.93
Mayo	47.70	117.15	113.07	-65.37
<b>Húmedo</b> Junio	151.20	171.20	93.08	58.12
Julio	212.10	153.65	119.32	92.78
Agosto	311.70	170.89	145.87	165.83
Septiembre	1011.60	110.03	104.16	907.44
<b>Total acumulado</b>	<b>1954.80</b>	<b>1240.16</b>	<b>1068.78</b>	
<b>Valor máximo</b>	<b>1011.60</b>	<b>171.20</b>	<b>145.87</b>	
<b>Valor mínimo</b>	<b>2.40</b>	<b>51.72</b>	<b>51.81</b>	



**Figura 2.2.** Evolución mensual de la precipitación y evaporación en el humedal sur de Pátzcuaro. \* valor máximo de precipitación del mes de septiembre.

La deducción de la evapotranspiración de la precipitación (P-ET) presenta un déficit durante ocho meses, cuyos valores fueron en un rango entre -2.68 y -68.05mm (Tabla 3.1). Por el contrario, la precipitación supera a la evapotranspiración cuatro meses, en un rango entre 58.12 y 907.44mm. Nuevamente en septiembre se registró un patrón atípico, con una ganancia de 907.44mm que representa el 74.13% del total del agua que se conserva en el humedal (Figura. 2.3).

Adicionalmente se realizó el procesamiento de datos para el periodo del 2000 al 2012, en los primeros seis años (2000 a 2005) se registró una pérdida de agua de 2102.77 en 6 meses (Noviembre a Abril) y en el periodo de mayo a octubre (6 meses) hubo una ganancia de agua de 2364.29. El resultado para este periodo fue un superávit hídrico (SAH) de 261.52 (Figura 2.4)



**Figura 2.3.** Evolución mensual del déficit (P-ET) y precipitación en el humedal sur de Pátzcuaro. Se muestra los máximos del mes de septiembre.

En el periodo del 2006 al 2011, se incremento el periodo de pérdida de volumen de agua de Octubre a Mayo (8 meses) con 632.30 y de junio a septiembre (4 meses) aunque hubo ganancia de agua, el volumen fue mucho menor que en el periodo 2000-2005 (295.97), por lo que en este periodo se considera que hubo un déficit hídrico (DH) de -336.33, es decir, se registró un mayor volumen de pérdida en un periodo más prolongado, que la ganancia de agua que tuvo el humedal (Figura 2.4).

Finalmente en el año del 2012 se registró de octubre a mayo (ocho meses) una pérdida de agua de 553.4, y en cuatro meses (Junio-septiembre) se registró una ganancia de 439.93, lo que significa en el 2012 existió un SAH de 113.48, sin embargo, este volumen sólo representa el 43% del volumen ganado en el periodo 2000-2005 (Figura 2.4).

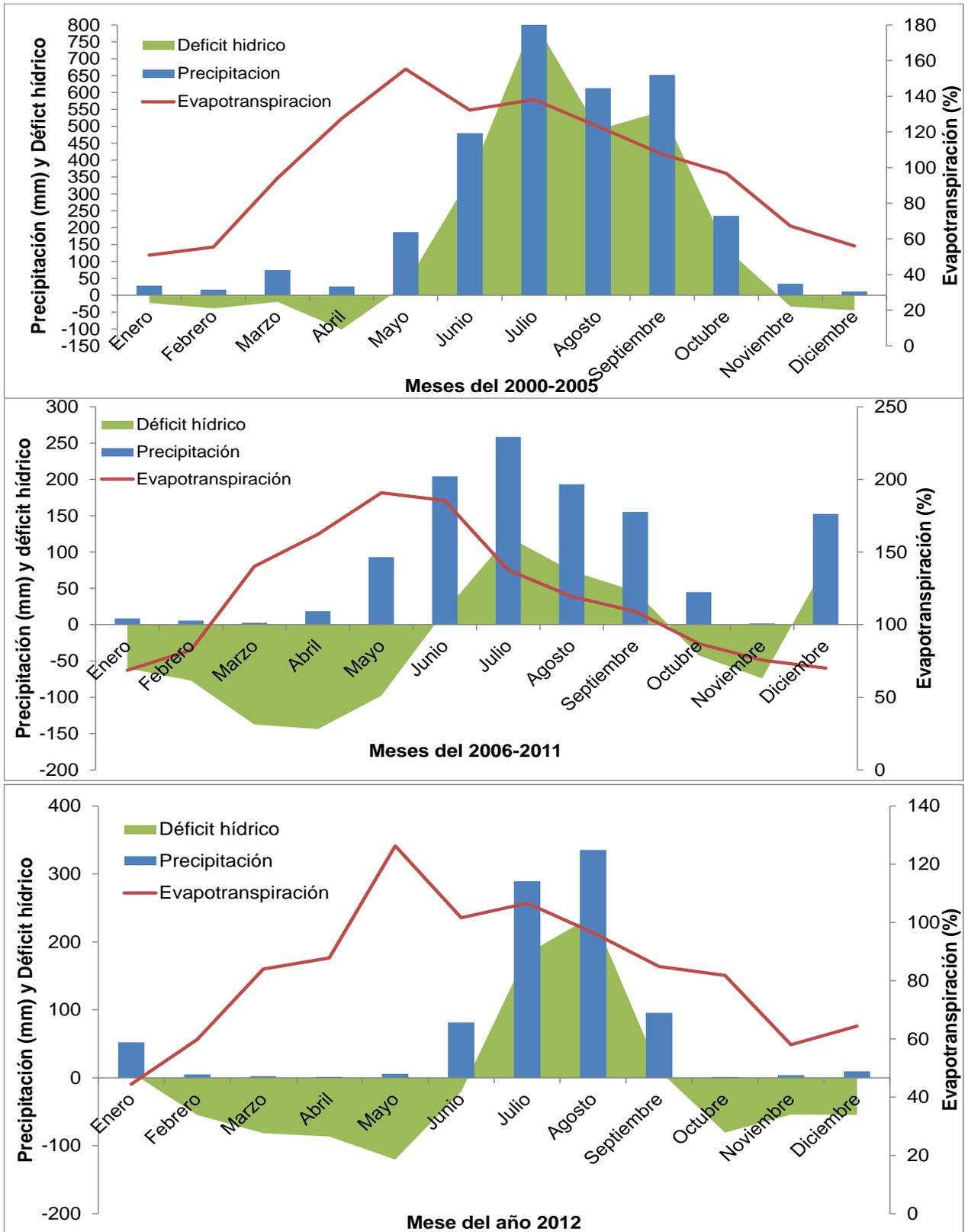
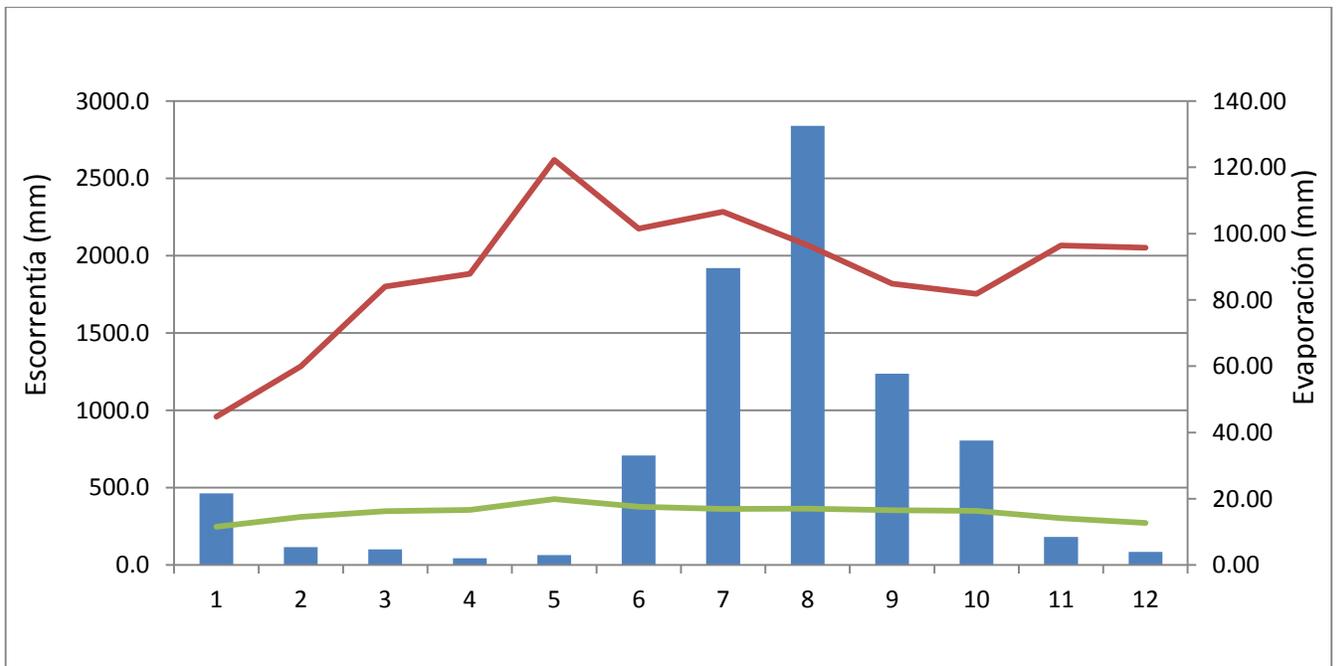


Figura 2.4. Déficit hídrico en el humedal sur de Pátzcuaro (2000 al 2012)

### 2.3 Escorrentía.

La escorrentía juega un papel fundamental en el mantenimiento de la saturación hídrica del humedal. Y esta a su vez depende de la variación de la temperatura y la evaporación. En la figura 2.5 podemos observar que mientras más se incrementa la tasa de evaporación la escorrentía disminuye, lo cual coincide con los meses del año en que la lluvia es ausente. Al momento en que se declara el periodo de lluvias, la temperatura disminuye por la circulación de la atmósfera y las precipitaciones, lo cual incrementa las escorrentías y disminuye la evaporación.

Los datos de escorrentía de entrada indican un aporte acumulado anual en el humedal de  $5.90\text{Mm}^3$ . Durante el periodo de sequía se acumularon  $0.83\text{Mm}^3$ , lo que equivale al 14% del total anual. El valor máximo de escorrentía durante este periodo se registró en el mes de abril ( $0.20\text{Mm}^3$ ) (Tabla 2.2).



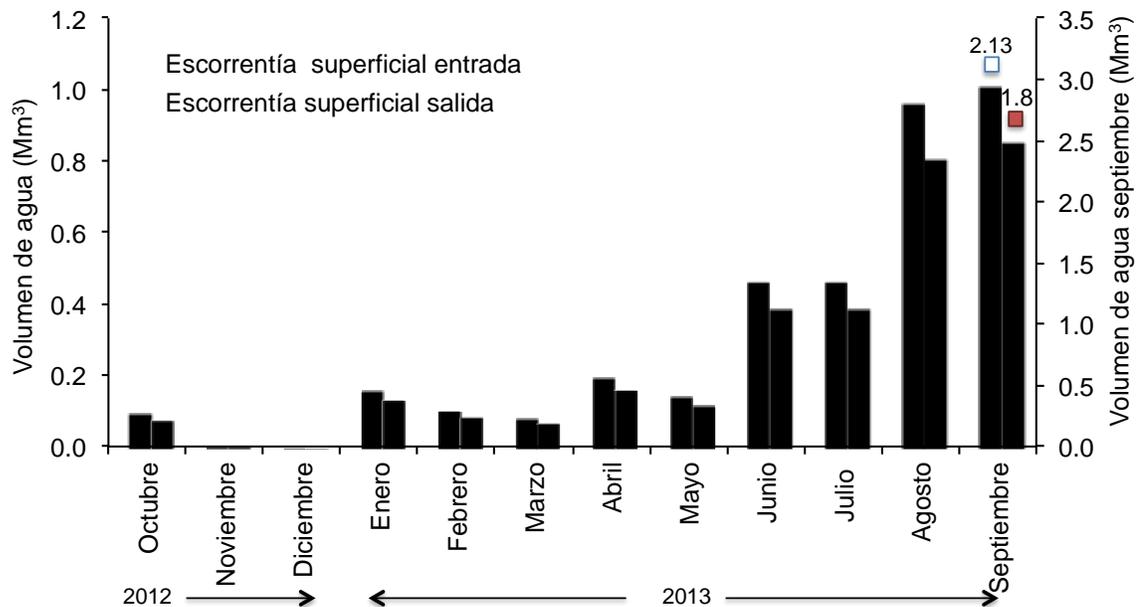
**Figura 2.5.** Comportamiento de la escorrentía (barras), la evaporación (línea verde) y la precipitación (línea roja).

**Tabla 2.2.** Principales componentes hídricos en el humedal sur de Pátzcuaro, durante el periodo de estudio. (P =Precipitación, E<sub>e</sub>=Escorrentía entrada, ET=Evapotranspiración, E<sub>s</sub>=Escorrentía salida, Alm=Almacenamiento).

	Mes	P (Mm <sup>3</sup> )	E <sub>e</sub> (Mm <sup>3</sup> )	ET (Mm <sup>3</sup> )	E <sub>s</sub> (Mm <sup>3</sup> )	Alm (Mm <sup>3</sup> )
<b>Sequía</b>	Octubre	0.23	0.10	0.71	0.08	1.36
	Noviembre	0.03	0.01	0.42	0.01	0.53
	Diciembre	0.02	0.01	0.37	0.01	0.45
	Enero	0.38	0.17	0.40	0.14	1.47
	Febrero	0.25	0.11	0.46	0.09	1.16
	Marzo	0.20	0.09	0.56	0.07	1.16
	Abril	0.46	0.20	0.58	0.17	1.89
<b>Húmedo</b>	Mayo	0.34	0.15	0.80	0.12	1.81
	Junio	1.07	0.47	0.66	0.39	2.66
	Julio	1.50	0.47	0.84	0.39	3.23
	Agosto	2.21	0.97	1.03	0.81	4.39
	Septiembre	7.16	3.15	0.74	2.64	8.36
<b>Total acumulado</b>		<b>13.83</b>	<b>5.90</b>	<b>7.56</b>	<b>4.95</b>	
<b>Valor máximo</b>		<b>7.16</b>	<b>3.15</b>	<b>1.03</b>	<b>2.64</b>	
<b>Valor mínimo</b>		<b>0.02</b>	<b>0.01</b>	<b>0.37</b>	<b>0.01</b>	

Durante el periodo húmedo la escorrentía total de entrada (E<sub>s</sub>) fue de 5.06Mm<sup>3</sup>, que representa el 86% del total anual. El valor máximo durante este periodo se registró en el mes de septiembre (3.15Mm<sup>3</sup>), equivalente al 62.25% del agua de escorrentía de este periodo y al 53.39% del total anual. Sin embargo, en este mes se acumularon 2.13 Mm<sup>3</sup> (67.62% del mes de septiembre) en un intervalo de cuatro días, lo que representa el 42.10% del total anual de escorrentía (Tabla 2.2).

La escorrentía total de salida al lago (E<sub>s</sub>), fue de 4.95Mm<sup>3</sup>. El valor máximo se registró en el mes de septiembre (2.64Mm<sup>3</sup>) y el mínimo en los meses de noviembre y diciembre (0.01Mm<sup>3</sup>). Durante el periodo de sequía, la E<sub>s</sub> se estimó en 0.70Mm<sup>3</sup>, (14.14% del volumen anual), mientras que durante el periodo húmedo fue de 4.25Mm<sup>3</sup> (85.86% del volumen anual), del cual 2.64Mm<sup>3</sup> se aportaron en el mes de septiembre (62.12%) y tan solo en cuatro días de este mes se acumularon 1.78Mm<sup>3</sup> (67.42% del mes) (Tabla 2.2 y Figura 2.6). Entre el volumen de escorrentía superficial de entrada y salida anual existe una diferencia de 0.95Mm<sup>3</sup>.



**Figura 2.6.** Evolución mensual de la escoorrentía superficial de entrada y salida del humedal sur de Pátzcuaro.

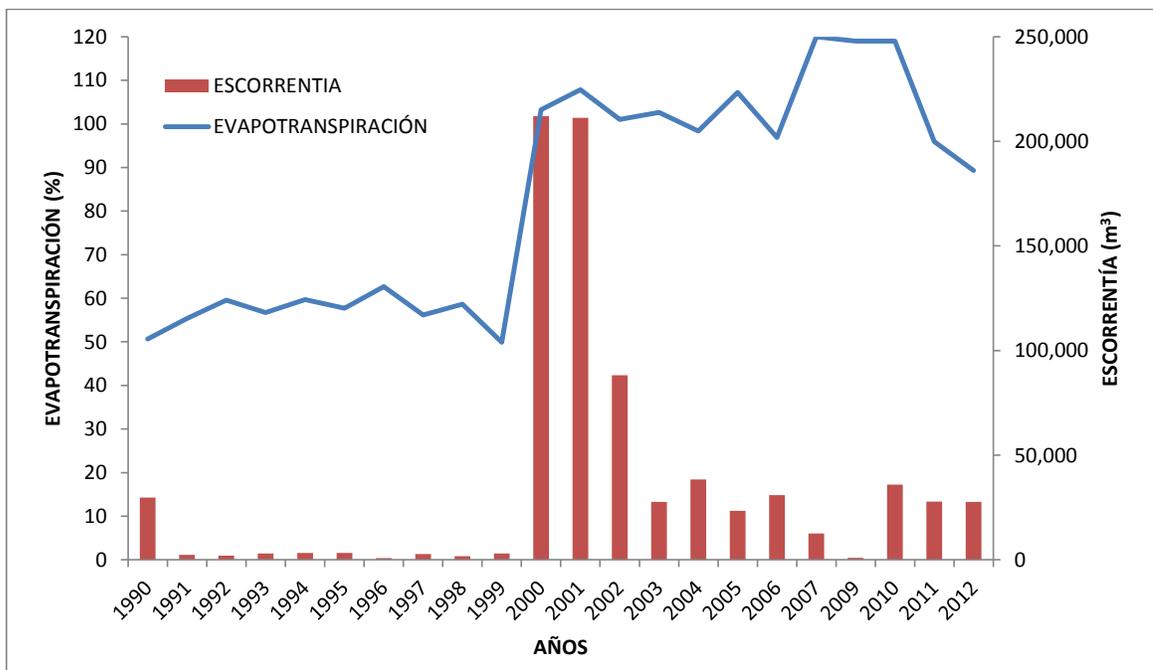
La escoorrentía, además de la precipitación, es otra fuente importante de aporte de agua para el humedal, éste parámetro, en el periodo de estudio, reporta un alto coeficiente de variación (CV) 168%, lo anterior debido a los años donde el aporte por escoorrentía fue alto como en los años 2000 y 2001 que registraron el valor máximo de 212,028.54m<sup>3</sup> y 211,310.77 m<sup>3</sup> respectivamente, y años con muy baja escoorrentía como 1996 y 2009 con valores de 871.36 m<sup>3</sup> y 934.05m<sup>3</sup>.

De 1990 a 1999 se registró el periodo de menor escoorrentía en el humedal con un evento aislado en el año 1990 cuyo flujo fue de 29,666.94m<sup>3</sup>, mientras que la evapotranspiración en este periodo se mantiene homogénea con 56.71±3.9%, el segundo periodo importante es del 2000 al 2007 registrándose en esos años las escoorrentías máximas (212,028.54m<sup>3</sup>), así mismo se hace evidente una tendencia al incremento de la evapotranspiración hasta 104.65% es decir, un aumento del 47.94%.

Por último se observa que del 2007 a la fecha ha habido una notable disminución en el aporte de agua en el humedal por escoorrentía con máximos de 35,960.79m<sup>3</sup>, es también en este periodo que se registraron los valores más altos de evapotranspiración (120%)

aumentando 15.35% más en un lapso de 5 años (Figura 2.7). Con lo anterior se ratifica que en los últimos años se ha perdido aporte de agua por precipitación y escorrentía y se ha incrementado la evapotranspiración que es una vía importante de pérdida de agua en el humedal.

Dado que todos los componentes hidrológicos analizados muestran una variación mensual, también lo es en el balance hídrico anual. En términos generales, durante el periodo de sequía, el volumen total de agua que entra al humedal se estimó en 8.41Mm<sup>3</sup> (40.57% del total anual), un volumen almacenado de 1.23Mm<sup>3</sup> (28.16% del total anual) y un volumen de salida de 7.97Mm<sup>3</sup> (42.43% del total anual). Durante el periodo húmedo el volumen de entrada se estimó en 12.31Mm<sup>3</sup> (59.43% del total anual), un volumen almacenado de 20.44Mm<sup>3</sup> (71.84%) y un volumen de salida de 18.77Mm<sup>3</sup> (57.57% del total anual).



**Figura 2.7.** Escorrentía y evapotranspiración en el humedal en un periodo de 22 años.

## 2.4 Agua subsuperficial.

La evolución diaria del nivel de la tabla de agua fue registrada en el mismo periodo (Octubre 2012 a Septiembre 2013) mediante piezómetros subsuperficiales, los cuales mostraron que no existe diferencia en el valor medio del nivel de agua registrado entre los piezómetros del transecto 1 (P1), y que esta diferencia es muy pequeña tanto para los piezómetros del transecto 2 (P2, 0.86cm) como para los del transecto 3 (P3 1.15cm) (Tabla 2.3).

En relación a la cantidad de agua aportada al humedal vía subsuperficial, se registró un volumen total anual de 1.01Mm<sup>3</sup>, en un rango entre 0.02 Mm<sup>3</sup> (noviembre y diciembre) y 0.18Mm<sup>3</sup> (septiembre). Durante el periodo de sequía se registró un volumen total de 0.36Mm<sup>3</sup> que ingresa por esta vía, lo que representa el 35.0% del total anual, siendo abril el mes que registró el máximo de entrada de agua subsuperficial (0.09Mm<sup>3</sup>).

Durante el periodo húmedo, se registraron 0.65Mm<sup>3</sup> de ingreso subsuperficial de agua equivalente al 65.0% del total anual. Los meses de mayor aporte fueron agosto (0.16Mm<sup>3</sup>) y septiembre (0.18Mm<sup>3</sup>), que conjuntamente representan el 34% del agua subsuperficial entrante en dicho periodo. (Tabla 2.4).

**Tabla 2.3.** Variación del nivel de la tabla de agua en el humedal sur de Pátzcuaro.

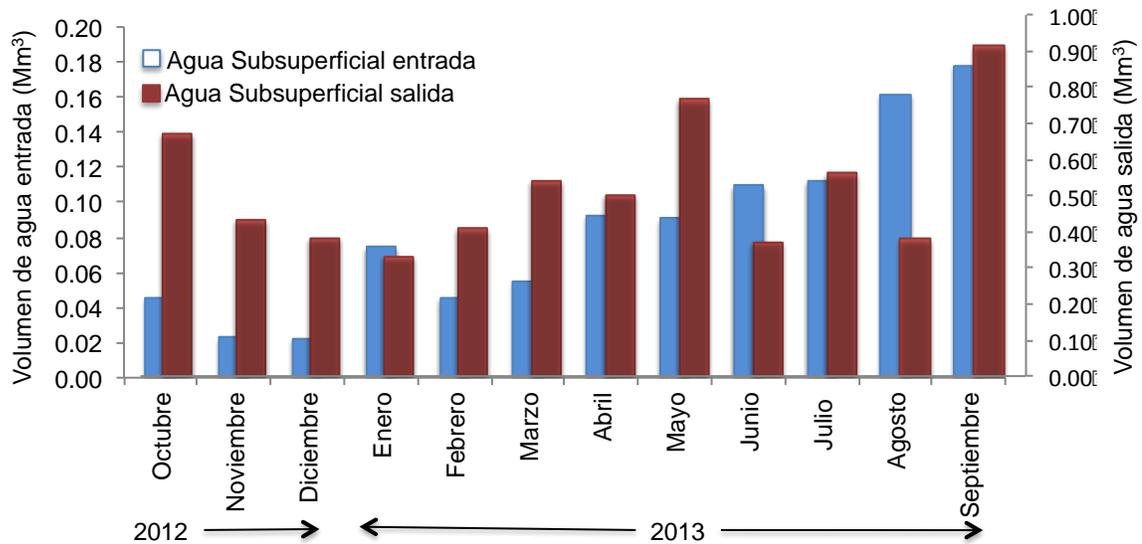
<b>Piezómetro</b>	<b>Promedio (cm)</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Máximo (cm)</b>	<b>Mínimo (cm)</b>	<b>Coefficiente Variación (%)</b>
<b>P1</b>	16.03	1.19	17.28	13.15	7.46
<b>P2</b>	16.03	1.15	17.52	13.92	7.20
<b>P3</b>	10.80	1.05	12.28	8.92	9.71

**Tabla 2.4.** Valores de entradas ( $S_e$ ) y salidas ( $S_s$ ) de agua subsuperficial y Almacenamiento útil (Alm U) y Recarga (R), al humedal sur de Pátzcuaro, durante el periodo de estudio.

	Mes	$S_e$ (Mm <sup>3</sup> )	$S_s$ (Mm <sup>3</sup> )	Alm U (Mm <sup>3</sup> )	Recarga (Mm <sup>3</sup> )
<b>Sequía</b>	Octubre	0.05	0.67	-0.48	
	Noviembre	0.02	0.43	-0.39	
	Diciembre	0.02	0.38	-0.35	
	Enero	0.07	0.33	-0.02	
	Febrero	0.05	0.41	-0.21	
	Marzo	0.06	0.54	-0.36	
	Abril	0.09	0.50	-0.12	
<b>Húmedo</b>	Mayo	0.09	0.77	-0.46	
	Junio	0.11	0.37		0.41
	Julio	0.11	0.56		0.66
	Agosto	0.16	0.38		1.17
	Septiembre	0.18	0.92		6.42
<b>Total acumulado</b>		<b>1.01</b>	<b>6.27</b>		
<b>Valor máximo</b>		<b>0.18</b>	<b>0.92</b>		
<b>Valor mínimo</b>		<b>0.02</b>	<b>0.33</b>		

El almacenamiento útil (Alm U) del volumen de agua se registra en el periodo de sequía con un valor de 2.39Mm<sup>3</sup> (21.63% anual), mientras que la recarga (R) de volumen de agua se presenta en el periodo húmedo con 8.66Mm<sup>3</sup>. Durante este último periodo el aporte mayor se registró en el mes de septiembre (6.42Mm<sup>3</sup>) lo que representó el 78.0% de la recarga del acuífero (Tabla 2.4). Tan solo en cuatro días de intensas lluvias en éste mes, se estimó una recarga de 4.06Mm<sup>3</sup> (63.24% del volumen total del mes), lo que correspondió al 46.9% de la recarga total del periodo húmedo.

En cuanto a los volúmenes de agua subsuperficial de salida (Figura 2.8), durante el periodo de estudio se registró un total de 6.27Mm<sup>3</sup>, con un máximo de 0.92Mm<sup>3</sup> en septiembre. Durante el periodo seco se estimó un volumen de agua subsuperficial de salida de 3.27Mm<sup>3</sup> (52.21% del total), mientras que para el periodo húmedo se registró una salida de 3.0Mm<sup>3</sup>, es decir el 47.79% del volumen anual de agua subsuperficial de salida.



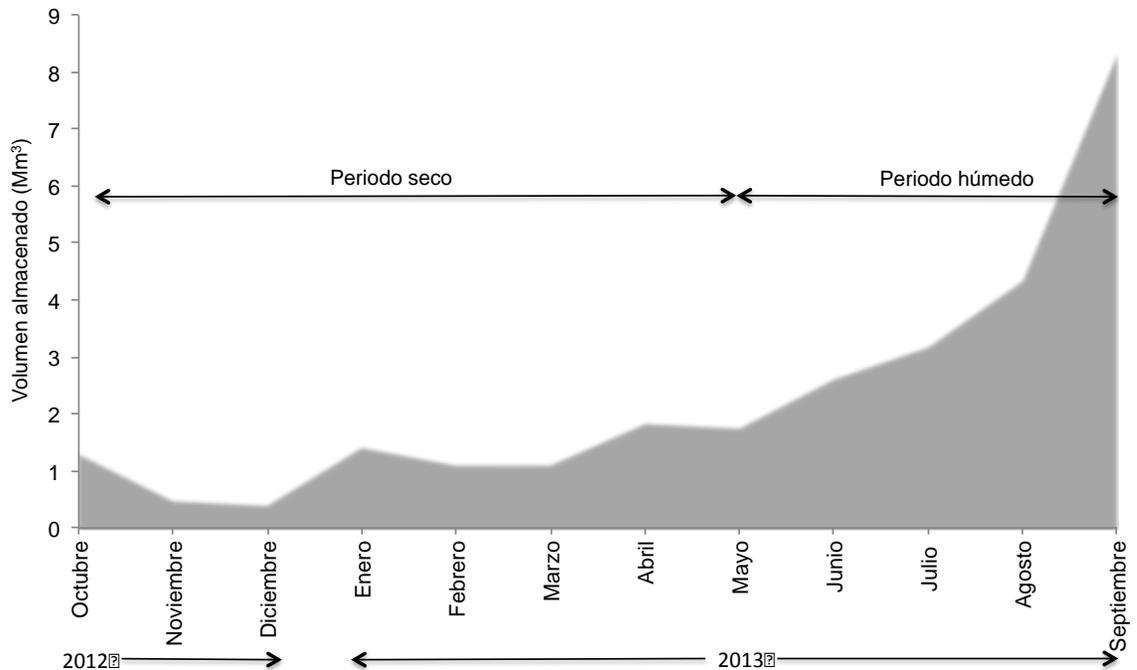
**Figura 2.8.** Evolución mensual del volumen de agua subsuperficial de entrada y de salida en el humedal sur de Pátzcuaro.

## 2.5 Almacenamiento de agua en el humedal.

El volumen de agua almacenado en el humedal osciló entre  $0.45 \text{ Mm}^3$  en (diciembre) y  $8.36 \text{ Mm}^3$  en (septiembre) con un promedio anual de  $2.37 \text{ Mm}^3$ . Existe una diferencia significativa en el volumen total de agua acumulada entre el periodo seco y húmedo ( $F=9.07$ ;  $p<0.01$ ).

Durante el periodo seco el volumen total almacenado fue de  $8.01 \text{ Mm}^3$ , con un máximo de  $1.89 \text{ Mm}^3$  en el mes de abril y un mínimo de  $0.45 \text{ Mm}^3$  en el mes de diciembre). El volumen almacenado en este periodo represento el 28.16% del total anual (Figura 2.9).

Durante el periodo húmedo se registró un volumen total almacenado de  $20.44 \text{ Mm}^3$  (71.84% total anual). En el mes de septiembre se registró el máximo volumen ( $8.36 \text{ Mm}^3$ ), que representa el 29.37% del total anual y el 40.88% del periodo húmedo (Figura 2.9).



**Figura 2.9.** Evolución mensual del volumen de agua almacenado durante el periodo de estudio en el humedal sur de Pátzcuaro.

## 2.6 Tiempo de retención hídrica.

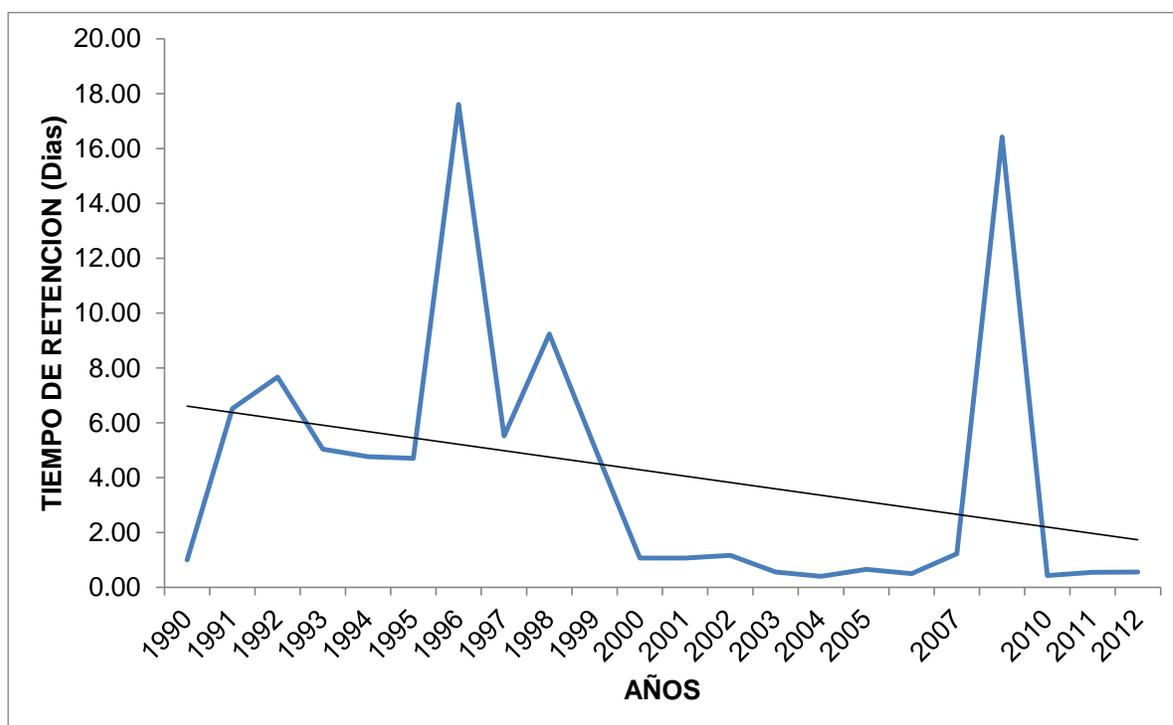
Finalmente como parte del estudio hídrico se determinó el tiempo de retención hídrica (TR). Como este parámetro implica tiempo y volumen de agua, el análisis se realizó con todos los datos históricos disponibles desde el año de 1990 y los obtenidos en el presente estudio.

El TR obtenido durante los años 1996 y 2009 fue de 17.6 y 16.42 días respectivamente, los años con menor TR fueron del 2003 al 2006 y 2011 y 2012 con un intervalo de 0.40 a 0.55 días (Tabla 2.5).

En los 22 años se observa una tendencia ( $R^2=0.48$ ) a disminuir la retención del volumen de agua entrante en el humedal, que de continuar así el humedal tendría más tiempo en el estiaje (Figura 2.10), ya que el mayor TR ocurre cuando existe un menor volumen del flujo de agua y si se considera en conjunto con la hidrodinámica del humedal resultara en un estancamiento y evaporación del agua.

Una análisis de regresión logarítmica ( $R^2=0.707$ ) muestra que cuando se registra un flujo mayor de los 2,000 L/s el tiempo de retención disminuye a un día, en este caso se interpreta como un proceso de lavado; el flujo pasa a través del humedal y descarga al lago de Pátzcuaro; sin embargo, al reducirse el flujo de agua por debajo de 400 L/s el TR aumenta hasta 17 días en el humedal, esto deriva en el mantenimiento del ecosistema húmedo durante un tiempo más prolongado pero con una baja columna de agua (Figura 2.11).

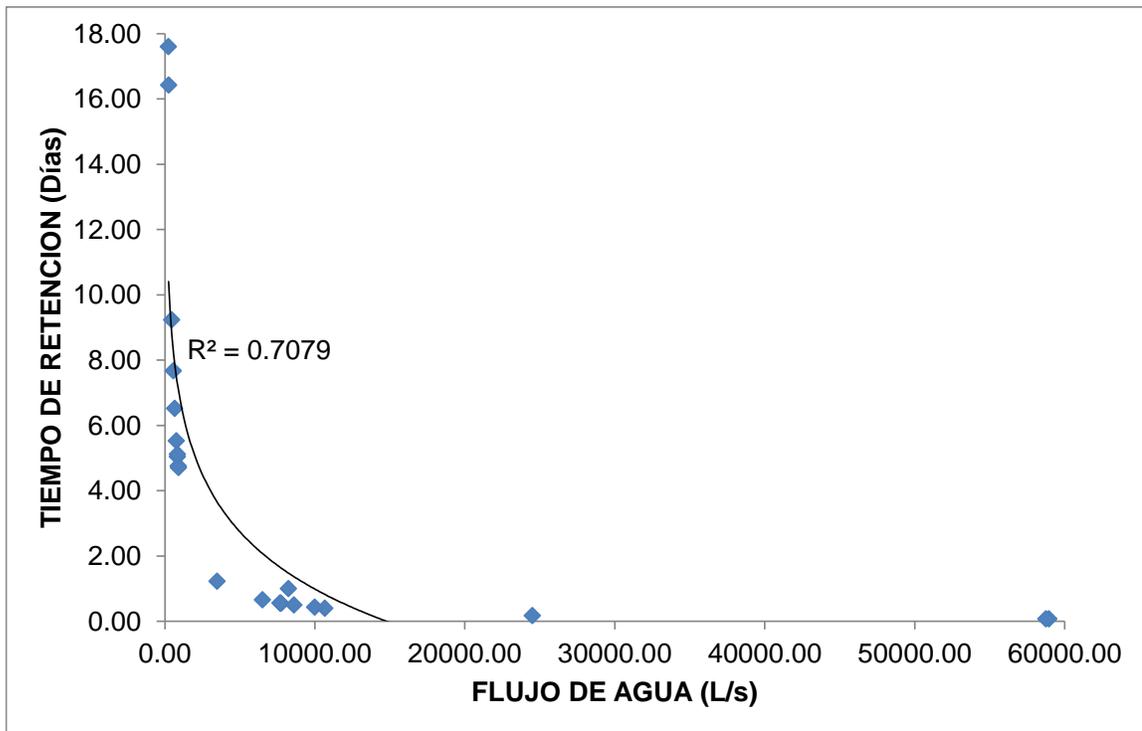
Finalmente, entre los 461.82 a 905.34 L/s de flujo de agua, se observa que existe una retención en un intervalo de tiempo de 3 a 7 días; lo que conserva al humedal con un volumen promedio de 2,464.67m<sup>3</sup>, y favorece una columna de agua mayor.



**Figura 2.10.** Tendencia de tiempo de retención en el humedal.

**Tabla 2.5.-** Volumen y tiempo de retención en el humedal.

<b>Años</b>	<b>Flujo (L/s)</b>	<b>Tiempo de retención (Días)</b>
<b>1990</b>	8,247.41	1.00
<b>1991</b>	654.39	6.51
<b>1992</b>	555.93	7.67
<b>1993</b>	846.09	5.04
<b>1994</b>	895.76	4.76
<b>1995</b>	905.34	4.71
<b>1996</b>	242.24	17.60
<b>1997</b>	772.02	5.52
<b>1998</b>	461.82	9.23
<b>1999</b>	833.02	5.12
<b>2000</b>	58,943.93	1.07
<b>2001</b>	58,744.39	1.07
<b>2002</b>	24,505.66	1.17
<b>2003</b>	7,690.09	0.55
<b>2004</b>	10,665.43	0.40
<b>2005</b>	6,514.37	0.65
<b>2006</b>	8,604.67	0.50
<b>2007</b>	3,480.21	1.22
<b>2009</b>	259.66	16.42
<b>2010</b>	9,997.10	0.43
<b>2011</b>	7,743.77	0.55
<b>2012</b>	7,692.60	0.55



**Figura 2.11.** Correlación entre flujo de agua y tiempo de retención en el humedal

## 2.7 Balance de agua.

La precipitación es el componente más importante como fuente de aporte de agua a los humedales. Tanto la cantidad de agua que entra por esta vía, como la pérdida por la evaporación dependerá de la altitud, latitud y orografía de los humedales (Mölg et al, 2009, Marvel y Bonfils, 2013). En el caso de los ecosistemas acuáticos tropicales, como el humedal sur de Pátzcuaro, la precipitación y la evaporación varían tanto a escala anual como interanual.

A escala anual, la variabilidad climática es resultado de la migración de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT=sistema productor de lluvias), considerada como la más importante fluctuación climática (Chacón-Torres y Múzquiz-Iribe, 1997; Bonebrake y Mastrandea, 2010), que establece en este territorio dos periodos bien definidos: uno de sequía (7 meses) de larga duración y otro húmedo (5 meses) de menor duración.

A diferencia de los humedales subtropicales con periodos cortos e irregulares de precipitación que provocan la desecación total del agua superficial del humedal (Neiff, 2001), los humedales tropicales presentan patrones climáticos cíclicos y no llegan a la desecación total (Bradbury, 2000).

Sin embargo, esta situación puede ser alterada por una fuerte presión antrópica (Chacón y Múzquiz-Iribe, 1997; Bischoff et al, 2004), lo que unido a la disminución de la precipitación y a los cambios de distribución de lluvia durante el año, los hace especialmente vulnerables a los efectos del cambio climático (Challenger, 1999; Bonebrake y Mastrandea, 2010).

El patrón de precipitación en el humedal sur de Pátzcuaro es similar al que se muestra en el sur de la región del Pacífico, en el suroccidente de la Amazonía y en algunas áreas del piedemonte llanero colombiano, afectados por anomalías en el régimen de lluvias, y que causan un fuerte impacto sobre los caudales de los ríos y cuerpos de agua (Poveda y Mesa 1993; Rivera & Pabón, 1993; Montealegre y Pabón, 2000). Este efecto es contrario a lo que se ha diagnosticado para el futuro climático de la zona templada de Europa donde será más seco el verano y más húmedo el invierno (Randall et al, 2007).

La evapotranspiración es el principal mecanismo de pérdida de agua de los ecosistemas acuáticos. Su variación depende de los flujos de calor continuos (temperatura), pero también de la magnitud del uso de suelo (Sellers et al, 1997; Daniels et al, 1999; Gudulas et al, 2013), que cambia la dinámica de los procesos hidrológicos en los ecosistemas (Finkelstein y Cowlins, 2011).

En el presente estudio la evapotranspiración predominó la mayor parte del año (8 meses), lo cual coincide con la tendencia de evaporación calculada para la cuenca del lago de Pátzcuaro, que es mayor que la precipitación, a excepción de la presencia de eventos climáticos como tormentas tropicales y huracanes (Chacón, 1993; Bradbury, 2000; González et al, 2010).

Así mismo se ha demostrado que la evapotranspiración continua durante todo el verano supera la cantidad de agua por precipitación (Boike et al, 2008), en el humedal sur de Pátzcuaro, la evapotranspiración supera con un poco más de la mitad (54.45%) a la precipitación.

La escorrentía superficial junto con la precipitación son las fuentes de entrada de agua más importantes en el balance de agua. La escorrentía superficial esta en función de la precipitación de la región, así como de las dimensiones de la cuenca de captación del humedal (Gasca y Ros, 2009; González et al, 2010; Acreman y Holden, 2013).

Por lo que a menor precipitación se registraran flujos de escorrentía superficial menores, siendo más sensible en eventos de lluvias atípicas expresándose con mayores volúmenes de escorrentía superficial (Shuster et al, 2005), en el humedal sur de Pátzcuaro se observó un evidente incremento de escorrentía en el mes de septiembre con presencia de lluvias por arriba de la normal climática.

En el caso de los humedales tropicales (como el de Pátzcuaro) la escorrentía superficial suele ser más abundante y tienden a retener el agua más eficientemente durante el periodo húmedo que en el periodo de sequía (Sigmon et al, 2013).

La escorrentía superficial tanto de entrada como de salida es difícil de cuantificar por falta de información disponible en los diferentes humedales, sin embargo se ha consensado que la influencia predominante de la escorrentía superficial se asocia más a continentes y regiones húmedas que a los continentes y regiones áridas (Fekete y Vörösmarty, 2002).

El humedal sur de Pátzcuaro se ha clasificado como un humedal dominado por el agua pluvial y se considera como un ecosistema de recarga natural indirecto (Acreman y Holden, 2013; Ruiz, 2003), característico de zonas de cota elevada, terrenos metamórficos ígneos y condiciones climáticas que no favorecen los caudales fluviales (Alcalá y Custodio, 2008; Tesón, 2011; Acreman y Holden, 2013).

Contrario a la creencia de que la escorrentía superficial era un componente insignificante en el modelo de balance hídrico y que el agua subterránea es el principal aporte para la cuenca lago de Pátzcuaro (Bernal-Brooks et al, 2002), en este trabajo la escorrentía superficial es el segundo componente más importante que aporta el 28.45% del agua anual al humedal. Lo cual coincide con la variación del volumen de agua debida a las escorrentías y manantiales en la parte sur de la cuenca del lago de Pátzcuaro (Bradbury, 2000; Tapia et al, 2000; Metcalfe et al, 2007).

Así como la precipitación tiene influencia sobre la escorrentía, la evapotranspiración ocasiona la pérdida del volumen de escorrentía superficial (LaBaugh et al, 1998), que por un lado se pierde por influencia de la evaporación asociada a cambios de la temperatura y a la transpiración asociada al cambio de uso de suelo (Elton et al, 2011). En este humedal se presenta mayor volumen de escorrentía superficial en áreas con vegetación característica de este tipo de ambientes, que en las zonas con un uso agrícola y/o pecuario.

La interacción entre la escorrentía superficial y el agua subsuperficial se presenta en un periodo corto, cuando ocurren lluvias discretas y estacionales, resultando en variaciones en el nivel de tabla de agua, pero en el caso de la presencia de grandes masas de agua superficial es menos importante esta relación en el proceso de recarga del acuífero (Beckers y Frind, 2000).

En los humedales tropicales (como el humedal sur de Pátzcuaro) el agua subsuperficial refleja una repuesta estacional (sequía y lluvias) recargando el acuífero en la temporada de mayor precipitación y con una menor pérdida de agua por evapotranspiración (Bischoff et al, 2004; Custodio et al, 2010; Daniels et al, 2000).

Chacón y Muzquiz (1997) establecen que el 8% de la precipitación total de la cuenca del lago de Pátzcuaro es incorporada por infiltración al agua subsuperficial convirtiéndose en la principal fuente de aporte de agua para el lago; caso contrario, a lo que sucede en el humedal ya que el porcentaje de agua de precipitación que se incorpora por infiltración es mayor (62.61%) que el de la cuenca, siendo por lo tanto el agua subsuperficial la de

mayor importancia en el proceso de recarga del acuífero para el mantenimiento del nivel de agua en el humedal.

El agua subsuperficial en el lago y el humedal funciona como una unidad, ya que el humedal recarga el acuífero y el lago recibe el agua proveniente de éste manifestando su salida en los manantiales subacuáticos cerca del litoral del humedal (Bischoff et al, 2004).

El almacenamiento presenta variaciones en el nivel de agua como resultado del régimen hidrológico de la cuenca, el humedal sur de Pátzcuaro varia su nivel de agua a lo largo del año y por ende su volumen de agua, el cual se reduce cuando la relación de la precipitación y evapotranspiración (P-ET) también disminuye (Nigel et al , 1999), y aumenta al aumentar la precipitación como se observa en verano, lo anterior coincide con las variaciones históricas de nivel de agua en Pátzcuaro, sin embargo el almacenamiento no sólo se debe a los cambios climáticos, también se atribuye a las alteraciones antrópicas que modifican el volumen de almacenamiento (O'Hara , 1993).

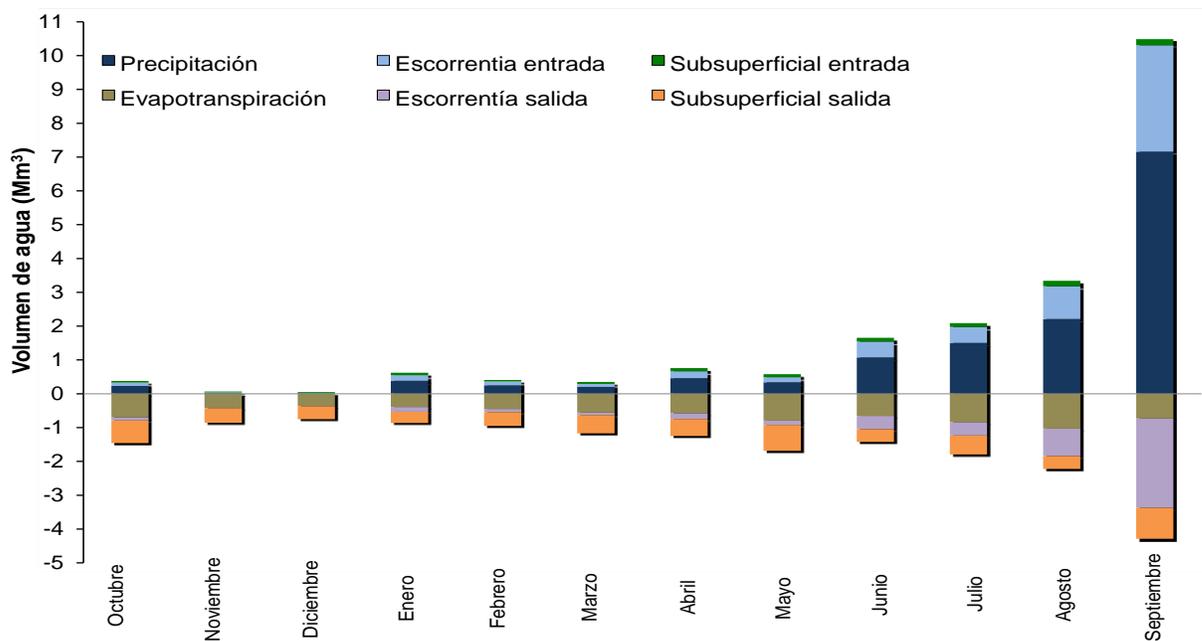
La extracción de agua para irrigación y uso doméstico ha sido la causa de la variación del volumen almacenado por estos ecosistemas, esta intervención en los humedales se ha reportado alrededor de todo el mundo y en diferentes ecosistemas acuáticos con pérdidas hasta del 40% del área del humedal (Kingsford, 2000, Blunden et al, 2011).

El área de inundación (almacenamiento) en el humedal varia su profundidad dependiendo de la cantidad de precipitación en las zonas más planas (aproximadamente hasta los 100cm de profundidad) y del volumen del escurrimiento superficial en las zonas más profundas (alrededor de 150cm a 220cm) (Sutcliffe y Parks, 1989).

El balance hídrico del humedal sur de Pátzcuaro, al igual que otros humedales, en el periodo húmedo las fuentes de ingreso (precipitación, agua superficial y subsuperficial) son mayores que el volumen de agua de las fuentes de egreso (evapotranspiración, agua superficial y subsuperficial), siendo la precipitación y escorrentía los componentes que dominan la dinámica hídrica del humedal

El humedal de acuerdo al balance hídrico estimado, recibe el 11.23% de la precipitación anual reportada para la cuenca del lago de Pátzcuaro, y el 4.68% de la escorrentía superficial total de la misma cuenca, mientras que la infiltración de agua en el humedal está representando el 9.01% de la infiltración total para el lago. En cuanto a las fuentes de salida la evapotranspiración representa el 31% de pérdida en la cuenca por este rubro hidrológico, lo anterior se debe a la presencia de mayor cobertura vegetal (Chacón-Torres y Múzquiz-Irribé, 1997; González et al, 2010; CNA, 2007).

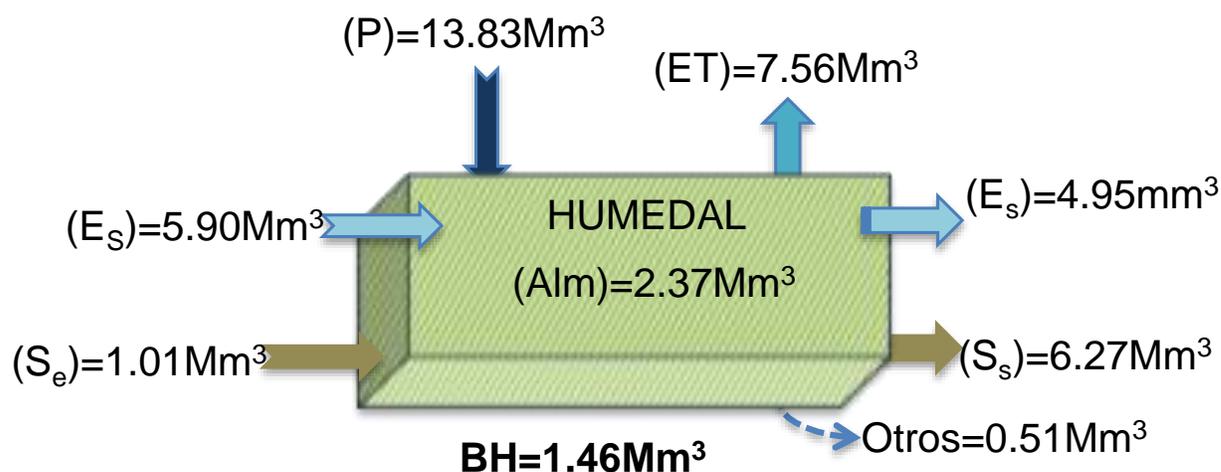
En la figura 2.12 se observa que el componente hidrológico que mayor cantidad de agua aporta al humedal es la precipitación ( $13.83\text{Mm}^3$ ), seguido de la escorrentía superficial ( $5.90\text{Mm}^3$ ), siendo ésta más evidente durante el periodo húmedo. La salida de agua más importante es por evapotranspiración ( $7.56\text{Mm}^3$ ), seguida por el agua subsuperficial ( $6.27\text{Mm}^3$ ), excepto en el mes de septiembre donde la escorrentía superficial de salida predomina sobre la evapotranspiración.



**Figura 2.12.** Evolución mensual de los distintos componentes hidrológicos del balance de agua, durante el periodo de estudio. Los valores negativos representan las pérdidas de agua (evapotranspiración, escorrentía superficial y subsuperficial de entrada) y los positivos las entradas (precipitación, escorrentía superficial y subsuperficial de salida)

El balance de agua anual estimado para el humedal sur de Pátzcuaro fue de 1.46 Mm<sup>3</sup> (Figura 2.13), siendo el volumen anual total de las entradas de agua de 23.30Mm<sup>3</sup>, y el de las salidas de 21.34Mm<sup>3</sup>, con un almacenamiento de agua promedio anual de 2.37Mm<sup>3</sup>. Adicionalmente, al modelo se le incorporó, como salida de agua, 0.51 Mm<sup>3</sup>, volumen estimado por extracción directa del humedal y en los pozos cercanos.

En el presente estudio, el mes de septiembre fue el más lluvioso desde 1941, superando los valores medios de precipitación de los últimos 11 años (CNA, 2013), incluso el valor más alto registrado en 1935 (1636mm) para la cuenca del lago de Pátzcuaro (Bradbury, 2000). Estas lluvias anormales están influenciadas por tormentas tropicales y/o huracanes, similares a los reportados en Cuba, donde la media anual de precipitación está fuertemente influenciada por la presencia de tormentas tropicales de notable capacidad pluvial (Blunden et al, 2011).



**Figura 2.13.** Balance hídrico anual en el Humedal sur de Pátzcuaro.

El balance de agua del humedal (1.46Mm<sup>3</sup>) es menor comparado al balance estimado para el lago (18.9 Mm<sup>3</sup>) esta diferencia está en función de tamaño del ecosistema, y la relación de la escorrentía superficial y el agua subsuperficial de ambos (Chacón, 1993; González-Sosa et al, 2010). Esta relación indica que para el balance de agua en el lago, el componente subsuperficial es el principal regulador del volumen de agua y en el balance de agua del humedal la relación entre la precipitación y escorrentía superficial indica que el principal componente de aporte de agua es la escorrentía superficial. En los dos casos la evaporación y evapotranspiración son el principal componente de pérdida de agua (Tovilla, De la Lanza, 2001; Bernal-Brooks, 2002).

Comparando el balance de agua del humedal con otros humedales (Tabla 2.6), se considera que el está en función del tamaño del humedal, los patrones estacionales e intraestacionales de precipitación, la relación de escorrentía superficial-subsuperficial y la evapotranspiración (Sutcliffe y Parks, 1989, Chacón et al 2002; CNA, 2007; Sampler et al 2007, Gasca y Ross, 2009; Schewrdtfer et al, 2014).

**Tabla 2.6.** Balance de agua de diferentes humedales. A=Área, P=Precipitación, E<sub>e</sub> y E<sub>s</sub>= escorrentía de entrada y salida, R=Recarga, ET=Evapotranspiración, Ev=Evaporación, S<sub>e</sub> y S<sub>s</sub>=Agua subsuperficial de entrada y salida, OS=Otras salidas, BH, Balance hídrico.

	Humedal sur Pátzcuaro	Humedal UK	Modelo para Humedal Españoles	Humedal Brasileño	Cuenca Lago Pátzcuaro	Humedal Cuitzeo	Cuenca L.Pátzcuaro	Lago Pátzcuaro	Modelo para Humedales Africanos
A	7.0742Km <sup>2</sup>	0.69Km <sup>2</sup>		150000Km <sup>2</sup>	803Km <sup>2</sup>	203.4Km <sup>2</sup>	803Km <sup>2</sup>	130Km <sup>2</sup>	
P	13.83Mm <sup>3</sup>	650mm	4.06Mm <sup>3</sup>	1500mm	123.4Mm <sup>3</sup>	675.7mm	123Mm <sup>3</sup>	84.54Mm <sup>3</sup>	425mm
E <sub>e</sub>	5.9Mm <sup>3</sup>		0.29Mm <sup>3</sup>	9.7-18.5mm		125.5Mm <sup>3</sup>		53.8Mm <sup>3</sup>	2-18m3 x10 <sup>9</sup>
S <sub>e</sub>	1.01Mm <sup>3</sup>		1.82Mm <sup>3</sup>		85.9Mm <sup>3</sup>				
R			1.89Mm <sup>3</sup>				62.9Mm <sup>3</sup>		
ET	7.56Mm <sup>3</sup>		4.59Mm <sup>3</sup>	1100-1600mm				25.75Mm <sup>3</sup>	
Ev					186.3Mm <sup>3</sup>	1783.6mm	123.3Mm <sup>3</sup>	74.05 Mm <sup>3</sup>	2100mm
E <sub>s</sub>	4.95Mm <sup>3</sup>		2.12Mm <sup>3</sup>	662-1104mm					2-6m3x10 <sup>9</sup>
S <sub>s</sub>	6.27Mm <sup>3</sup>	0.90m <sup>3</sup>		776-1104mm				9.25Mm <sup>3</sup>	
OS	0.51Mm <sup>3</sup>		2.89Mm <sup>3</sup>					10.3Mm <sup>3</sup>	
BH	1.45Mm <sup>3</sup>	-0.42m <sup>3</sup>	2.12Mm <sup>3</sup>	0	23Mm <sup>3</sup>	-1107.9mm	0.18Mm <sup>3</sup>	18.99Mm <sup>3</sup>	
Fuente	Actual.	Gazca y Ross, 2009	Sampler et al, 2007	Schwerdtfger et al, 2014	Bischoff, 2004	Chacon et al, 2002	Chacon y Muzquiz, 1997	Imta, 2007	Sutcliffe y Parks, 1989

Como se observa en la tabla anterior, los balances hídricos ya sea con modelos o sin ellos varían en su estimación dependiendo de la información disponible y en su mayoría se asume que el valor ya sea de entrada o salida, lo cual puede resultar en sobre o subestimación de estos balances. En presente estudio se cuenta con el mayor número de variables cuantitativamente lo cual acerca a una mejor estimación, sin embargo hay que considerar que el balance se realizó para un año donde se identificaron condiciones atípicas.

En conclusión el humedal presenta un periodo de estrés hídrico por ausencia del tirante de agua (seco) de 7 meses durante el año y un periodo de inundación (saturación de agua) de 5 meses. También se pudo establecer que este sistema depende en un 90% de las aguas de escorrentía, ya sea superficial o sub-superficial, para su subsistencia durante el periodo seco y el aporte de agua por parte del lago es casi nulo. Y es de esta manera en que genuinamente mantiene las características propias de los humedales.

### 3. Clima local y escenarios de cambio climático.

El clima del Altiplano Mexicano está determinado principalmente por la interacción de la circulación general de la atmósfera con el accidentado relieve de la región volcánica de México. Los registros históricos del clima sugieren que las variaciones regionales de precipitación de un año para otro están determinadas básicamente por cambios en la circulación de atmosférica la cual afecta a la mayor parte del país. En consecuencia, es de esperar que la cuenca del lago de Pátzcuaro se encuentre sujeta frecuentemente a grandes variaciones en la cantidad de lluvia recibida.

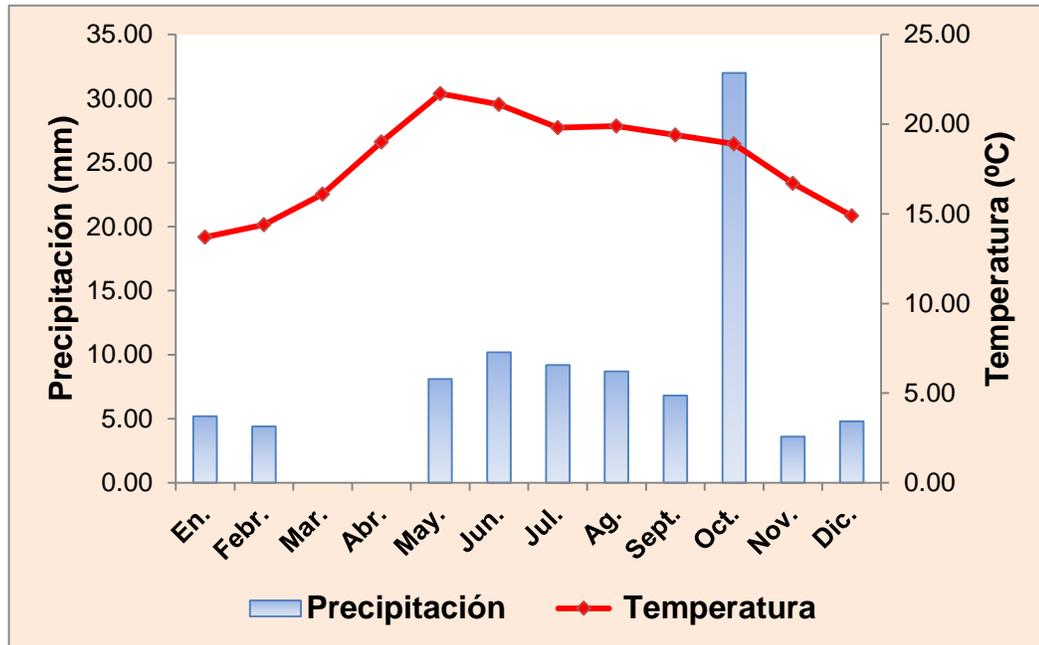
#### 3.1 Clima local

Con los datos de la normales climatológicas para los años 1971-2000 de la Estación 00016087 del Servicio Meteorológico Nacional en el Lago de Pátzcuaro, ubicada en la latitud 19°32'00" N y longitud 101°36'00" W a una altura de 2,035.00 msnm, y de acuerdo con los criterios propuestos por García (1988) se clasificó el clima de Pátzcuaro como:

#### **C (w2) (w) b i' g**

La fórmula anterior describe al más húmedo de los climas subhúmedos, con un régimen de lluvia de verano y un invierno seco. Presenta un cociente de precipitación/temperatura (P/T) mayor a 55.3 (55.68), porcentaje de precipitación invernal menor al 5% (4.03%) con respecto al total de la precipitación anual. La temperatura media anual es entre 12 y 18°C con un verano fresco y largo. Presenta poca oscilación térmica (6.6°), es decir, mayor de 5°C y entre 5-7°C. Finalmente presenta una marcha anual de la temperatura tipo Ganges con el mes más caliente durante el solsticio de verano.

En la figura 3.1 se presenta el comportamiento anual de la temperatura y de la precipitación obtenidas para el presente estudio con los datos de la estación climática del INIRENA ubicada en las inmediaciones del humedal.



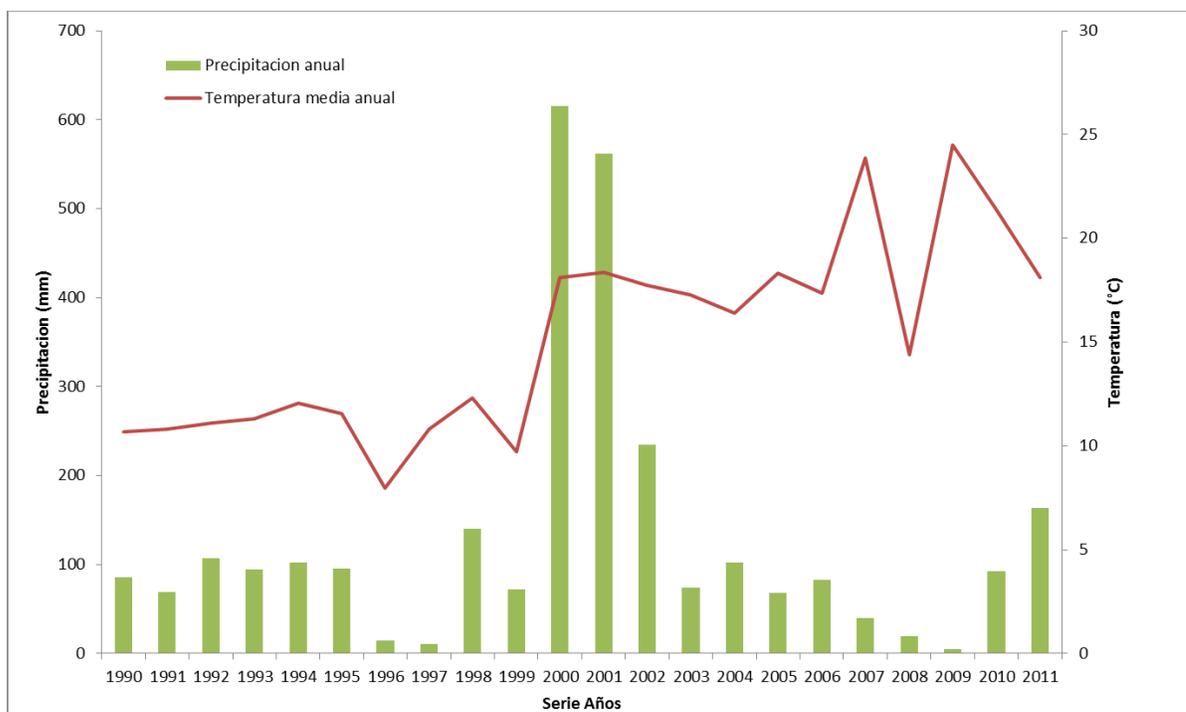
**Figura 3.1.** Climograma promedio anual en el humedal Ramsar- Pátzcuaro

Los registros históricos de los parámetros meteorológicos, durante los años 1999 a 2011, indican una temperatura máxima de 28.3°C registrada en el año 2000, la mínima fue de 8°C en el año 1996, mientras que la humedad relativa no registra una diferencia apreciable en el periodo 2000 al 2011, y durante la década de los 90's no solía registrarse este parámetro (Tabla 3.1).

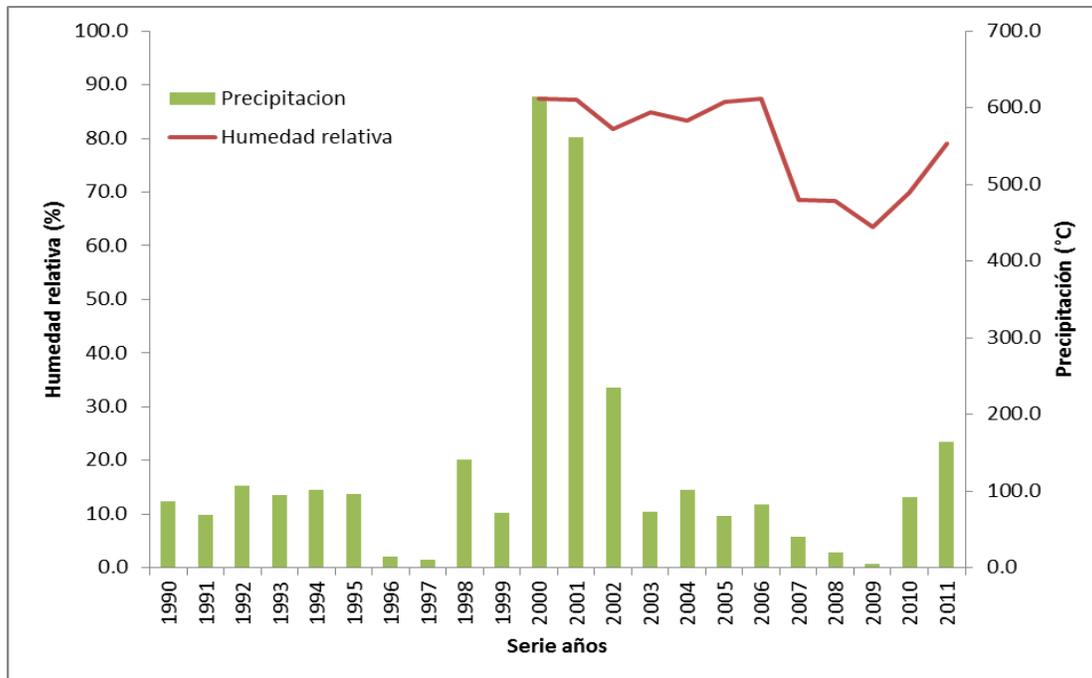
El año más seco fue el 2009 con 5mm y la precipitación más alta se registró en el año 2000 con 615mm, y los años más cálidos fueron registrados en el 2007 con una temperatura promedio de 24°C y 2009 con 25°C (Figura 3.2). En lo que se refiere a la humedad relativa, se observa que durante los años 2000 y 2001 se registraron los meses más húmedos, se ha ido reduciendo progresivamente hasta el 2009 (Figura 3.3).

**Tabla 3.1.** Datos climáticos desde 1990 al 2011 de la estación climática d Pátzcuaro  
(Fuente: CNA) y del INIRENA 2010-2011.

Años	Temperatura media (°C)	Temperatura maxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Humedad relativa (%)	Precipitación total mensual (mm)	Evaporación (mm)
1990.0	10.7	26.3	7.0	ND	86.0	ND
1991.0	10.8	26.7	6.3	ND	68.7	100.5
1992.0	11.1	26.3	7.1	ND	106.9	118.3
1993.0	11.3	24.0	8.1	ND	94.3	128.7
1994.0	12.1	24.4	8.6	ND	101.8	140.8
1995.0	11.6	23.8	8.7	ND	95.6	132.9
1996.0	8.0	26.1	5.6	ND	14.2	106.8
1997.0	10.8	23.2	8.1	ND	10.3	133.0
1998.0	12.3	26.6	10.6	ND	140.5	168.5
1999.0	9.7	27.9	8.0	ND	71.8	ND
2000.0	18.1	28.3	7.9	87.4	615.0	ND
2001.0	18.4	28.2	8.6	87.2	561.8	ND
2002.0	17.7	27.5	7.9	81.7	234.4	ND
2003.0	17.3	26.6	7.9	84.8	73.5	ND
2004.0	16.4	24.8	8.1	83.4	102.0	ND
2005.0	18.3	28.1	8.6	86.9	68.0	ND
2006.0	17.4	27.0	7.7	87.3	82.3	ND
2007.0	23.9	16.1	8.0	68.4	39.9	82.4
2008.0	14.4	23.8	6.2	68.4	19.8	83.9
2009.0	24.5	3.9	13.8	63.5	5.0	84.9
2010.0	21.4	15.4	13.0	70.0	92.4	79.2
2011.0	18.1	22.5	9.5	79.0	163.8	82.6



**Figura. 3.2** Temperatura promedio y precipitación para un periodo de 20 años en la zona de Pátzcuaro, Michoacán.



**Figura 3.3.** Precipitación y humedad relativa en Pátzcuaro durante 22 años.

Se realizó un análisis de estadística descriptiva para la temperatura promedio anual, sin embargo debido a que en los años 1992, 1996, 1998 y 2009, los registros de temperatura obtenidos abarcan menos de la mitad del ciclo anual se decidió no considerarlos en dicho análisis, pues sobreestimaría los resultados. Una vez hecha la modificación y exceptuando los años ya mencionados, se observa que dentro del periodo de 1990- 2012 la temperatura máxima se registró en el año 2010 (28.04°C) y la mínima en el año 1999 (4.3°C). El promedio anual de temperatura por década registra un intervalo de 9.73°C a 12.30°C de 1990 a 1999, y durante el periodo de 2000 a 2012 se encontró una temperatura promedio anual entre los 14.39°C a 23.87°C. Se observa claramente un incremento en las temperaturas anuales de esta segunda década. Sin embargo, no se reportan Coeficientes de Variación (CV) en la temperatura ambiental del Humedal por arriba del 50%, (Tabla 3.2).

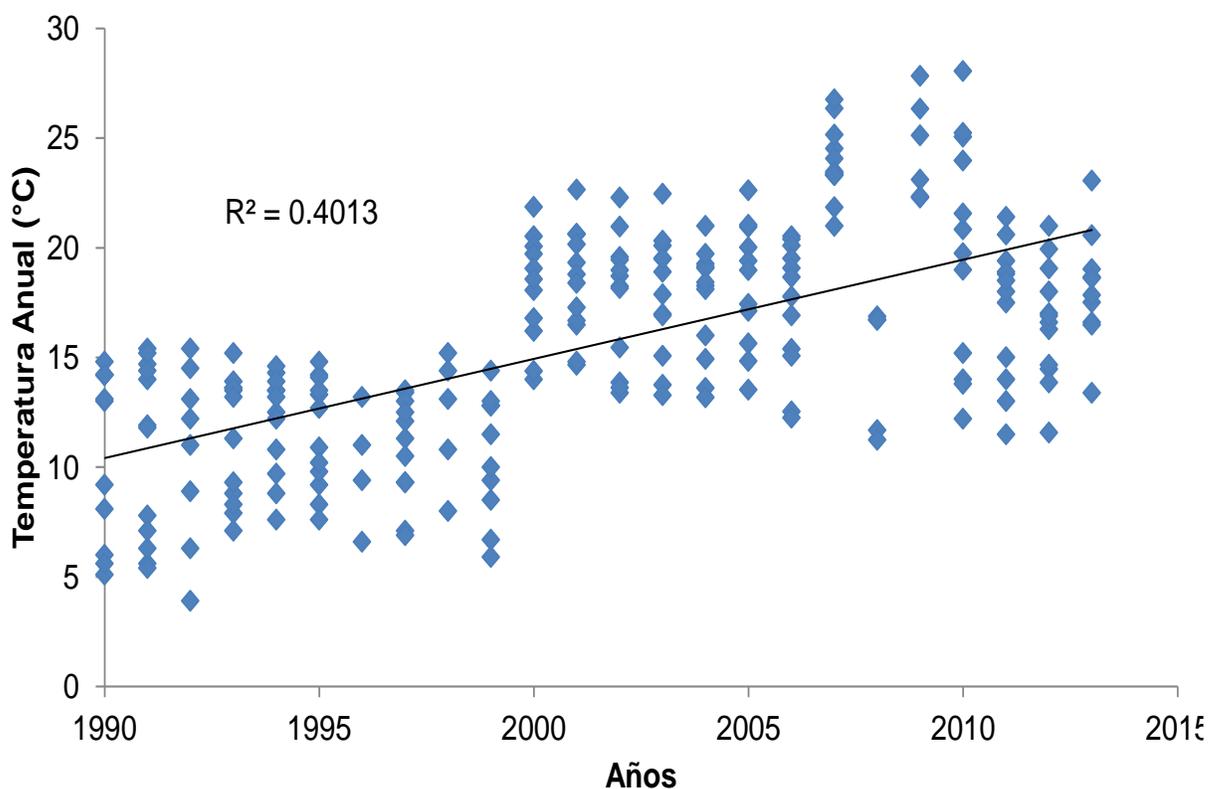
**Tabla 3.2.** Estadística descriptiva de temperatura anual (1990 a 2012) en el humedal.

AÑO	N	Promedio anual	Desv.Est.	C.V	Mínimo	Máximo
1990	11	10.68	3.91	36.63	5.10	14.80
1991	12	10.80	4.05	37.48	5.40	15.40
1992	5	11.08	3.97	35.81	3.90	15.40
1993	12	11.30	2.85	25.22	7.10	15.20
1994	12	12.05	2.30	19.09	7.60	14.60
1995	12	11.55	2.50	21.73	7.60	14.80
1996	5	7.96	3.41	42.84	4.60	13.20
1997	11	10.80	2.39	22.13	6.90	13.50
1998	5	12.30	2.92	23.77	8.00	15.20
1999	12	9.73	3.66	37.62	4.30	14.40
2000	11	18.10	2.52	13.93	14.00	21.86
2001	12	18.37	2.46	13.42	14.66	22.65
2002	12	17.72	2.96	16.70	13.38	22.28
2003	12	17.28	4.29	24.82	5.97	22.46
2004	12	16.42	4.48	27.29	7.28	21.00
2005	11	18.32	2.85	15.60	13.53	22.61
2006	12	17.35	2.93	16.91	12.25	20.51
2007	12	23.87	1.65	6.95	20.99	26.76
2008	10	14.39	2.24	15.60	11.24	16.87
2009	6	24.50	2.29	9.37	22.29	27.83
2010	12	19.89	5.18	26.07	12.20	28.04
2011	12	16.20	2.64	16.34	11.50	19.50
2012	12	15.99	2.11	13.22	11.57	19.94

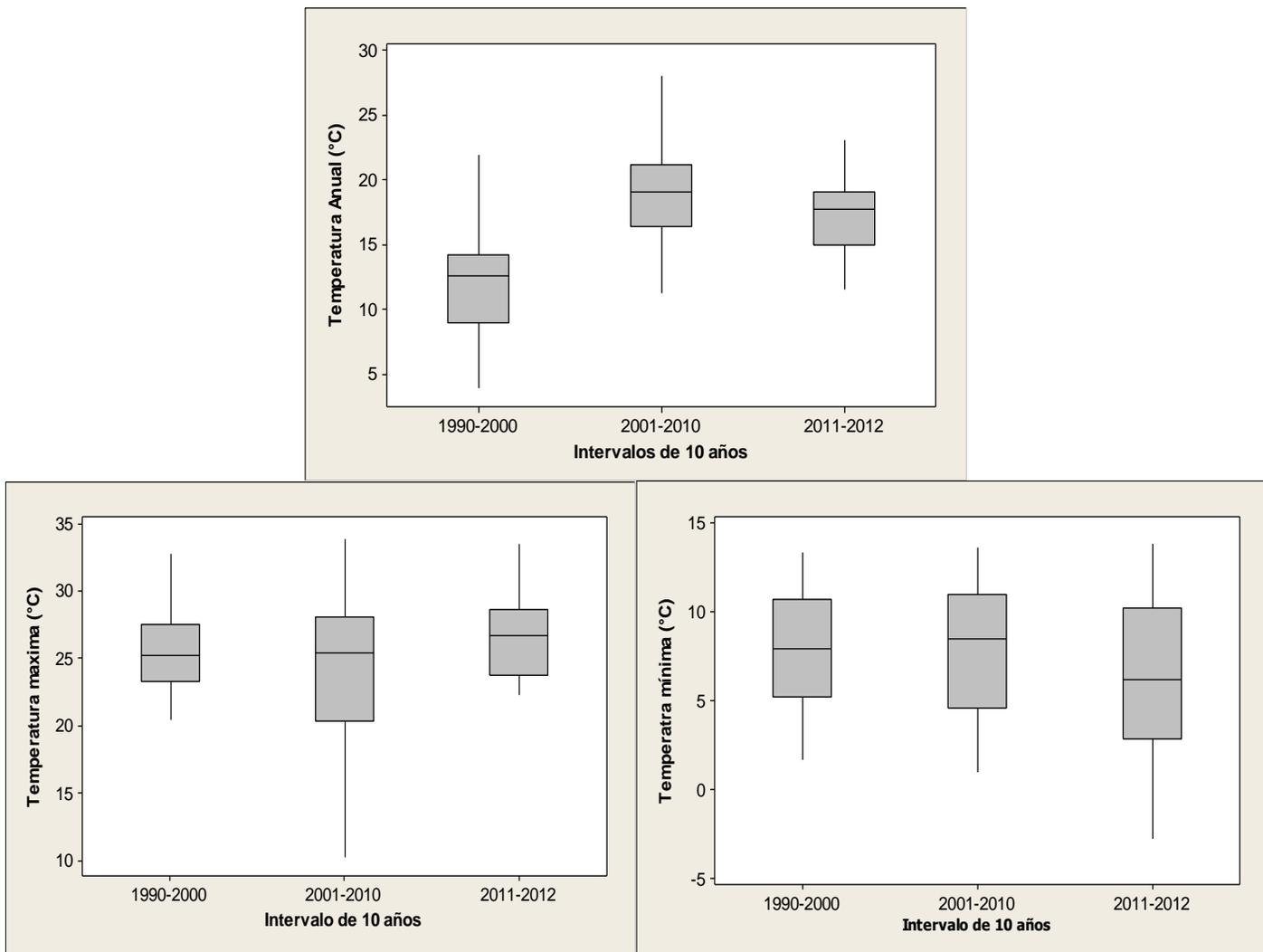
Un análisis de regresión ( $R^2=0.40$ ) de la temperatura anual de 1990 a 2012, se observó una tendencia al incremento de éstas (Figura 3.4), y se evidenció un aumento de  $0.33^{\circ}\text{C}$  en la región de Pátzcuaro.

Mediante un análisis de tendencia central (Box Plot) en grupos de datos de 10 años y el último de dos; se puede observar que la temperatura anual en los tres grupos tiene la misma variabilidad, sin embargo el grupo del periodo del 2001 al 2010 presenta una mediana mayor equivalente a  $19.^{\circ}\text{C}$  con un cuartil superior de  $21.16^{\circ}\text{C}$  y cuartil inferior de  $16.36^{\circ}\text{C}$ , el periodo de 1990 al 2000 se registró con la menor de las medias ( $12.6^{\circ}\text{C}$ ) con un cuartil superior de  $14.2^{\circ}\text{C}$  y el inferior de  $8.9^{\circ}\text{C}$  (Figura 3.5).

A pesar de que en el periodo del 2011 al 2012 se observa una media anual menor que en la década inmediata anterior, en el análisis de temperatura máxima se puede ver que durante este periodo es ligeramente mayor (26.7°C) que la de los otros dos periodos: 2001-2010 (24.41°C) y 1990-2000 (25.25°C), demostrando nuevamente la tendencia al incremento de las temperaturas. En lo que se refiere a las temperaturas mínimas, el periodo 1990-2000 tuvo los valores más bajos (7.9°C), seguido del periodo del 2001-2010 con mínimas de 8.45°C y, a pesar de que las mínimas del periodo del 2011-2012 fueron de 6.2°C existe una mayor variabilidad y el cuartil superior iguala al del primer periodo con una temperatura de 10.6°C (Figura 3.5).



**Figura 3.4.-** Tendencia de temperatura anual en 22 años (1990-2012).

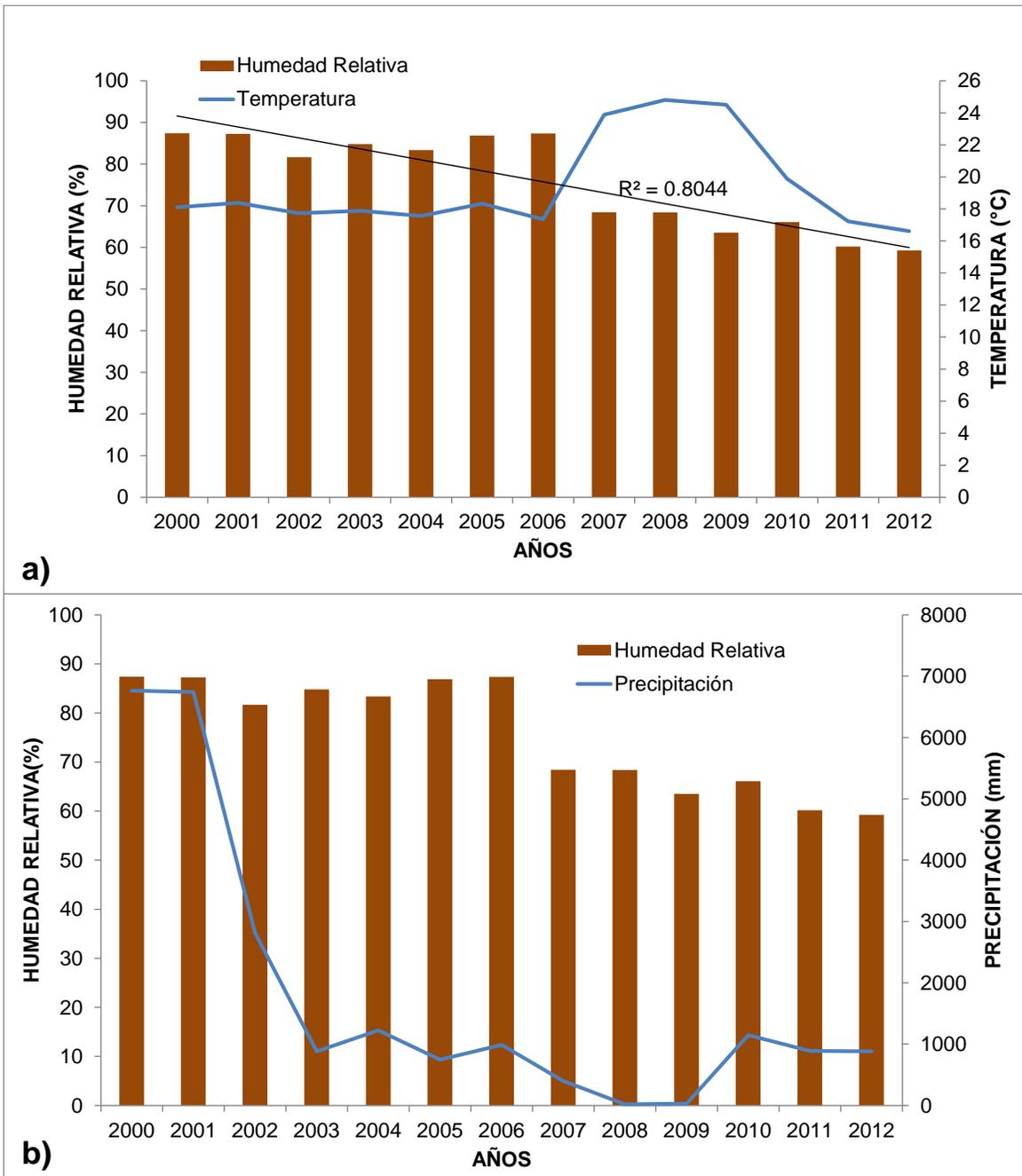


**Figura 3.5.-** Tendencia central de temperatura anual, máxima y mínima en periodos de 10 años (1990-2000 y 2001-2010) y dos años (2011-2012)

La precipitación promedio más escasa registrada fue de 165mm en el periodo '91-'99, con una máxima de 946.5mm y una mínima de 27.8mm para ese mismo periodo, a pesar de que se registraron temperaturas más bajas. Los años con mayor aporte de agua fueron los del periodo 2000-2006 con un promedio de 2880mm, un máximo de 6764.40mm y mínimo de 747.61mm; a partir del 2007 se registró una reducción del aporte de agua por lluvia registrándose un promedio de 669.61mm, con un máximo de 1147.3mm y un mínimo de 29.80mm; además se observa el incremento de la temperatura en los años 2007 al 2010 (Figura 3.6).

La humedad relativa se analizó a partir de 2000, pues como ya se mencionó anteriormente en los años '90-'99 no existe información disponible en las bases de datos de la Comisión Nacional del Agua (CNA). La humedad relativa en el transcurso del tiempo registra una tendencia a reducir el porcentaje ( $R^2=0.80$ ), registrándose un máximo de 87.40% en el 2000 y un mínimo de 59.25% en el 2012. Se observa, a partir del 2007 hasta el 2010, que a medida que aumenta la temperatura disminuyen la humedad y la precipitación, del año 2000 a 2006 se reporta un promedio de humedad de 85.52%, y del 2007 a 2010 es de 66.61% evidenciando una reducción de la humedad relativa hasta de un 18.91%.

Se realizó el cálculo de la humedad relativa, con respecto a la temperatura y a la cantidad de precipitación, durante los años 2000 a 2012. Se puede observar que en los últimos seis años la temperatura tiene un pico entre los años 2007-2010 y la humedad del ambiente ha disminuido y que a pesar de que la precipitación ha tenido un decremento considerable esta no tiene efectos notables en la humedad (Figura 3.6)



**Figura 3.6.** Humedad relativa relacionada con a) temperatura y b) precipitación

### 3.2 Escenarios climáticos para el humedal

La mayoría de los investigadores ambientales coinciden en que el mundo se ha calentado durante el pasado siglo, principalmente en las dos últimas décadas y el pronóstico es que este calentamiento continuará e incluso se acelerará en los próximos años (Hansen *et al.*, 2000). Ante esto, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) en su informe anual de 1995 concluyó que “este aumento observado no es probable que se deba enteramente a causas naturales” y además que “el balance de evidencias sugiere que hay una influencia humana perceptible en el clima global”. En forma genérica, a esta problemática se le ha designado como “Cambio Climático”, el cual es definido por el Convenio Marco sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas (CMNUCC) como una modificación del clima atribuido a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observado durante períodos de tiempo comparables (ONU, 1992).

Un clima global más cálido tendría posibles efectos en la disponibilidad y suministro de agua, cambios significativos en el aspecto y distribución de ecosistemas, reducción de la biodiversidad en muchas regiones (Buse *et al.*, 1999), aumento en el nivel del mar, intensificación de los actuales climas a situaciones extremas así como incrementos en la frecuencia de alergias y plagas (Palumbi, 2001). A pesar de esto, no conocemos con precisión su grado de afectación. (McCarty, 2001).

La manera en que se sabe que existe un calentamiento global es porque se han detectado variaciones anormales en las temperaturas, precipitaciones y emisiones de gases a la atmósfera desde mediados del siglo XIX hasta la fecha. De este modo, la necesidad de proporcionar información climática regional se ha incrementado (Mearns *et al.*, 2001).

### **3.2.1 Métodos**

Debido a que los métodos empleados para este propósito no fueron descritos en el proyecto y además fueron afinándose conforme se fue desarrollando el trabajo, se consideró necesario incluirlos en este apartado.

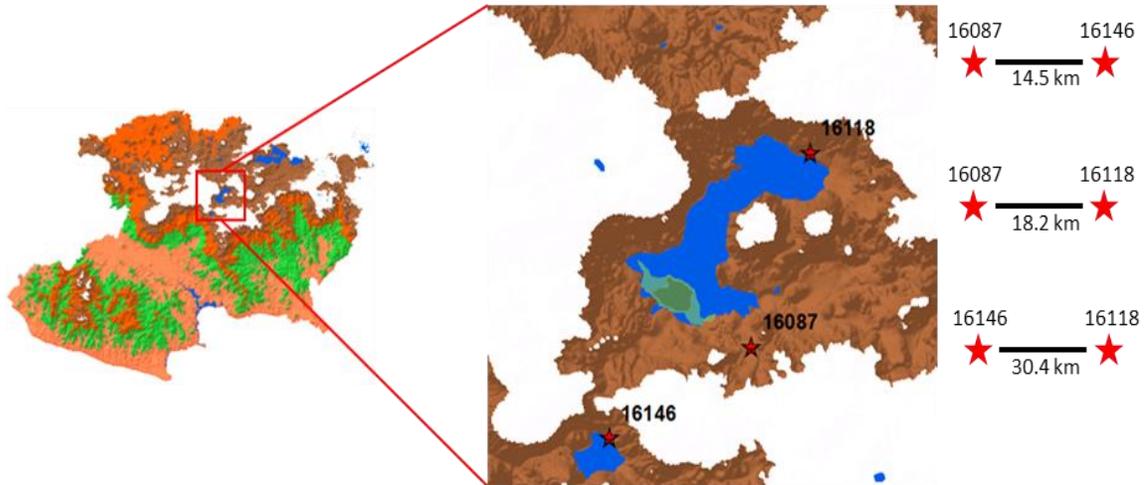
Para realizar los escenarios climáticos, fue necesario emplear tanto una base de datos temporal como una espacial. Para ello se emplearon datos diarios correspondientes a temperaturas máximas, mínimas y precipitación, provenientes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), registrados en las tres estaciones climáticas más cercanas a la zona del humedal Ramsar: Pátzcuaro, Santa Fé y Zirahuén (Tabla 3.3 y Figura 3.7). Para este análisis el intervalo de datos propuestos (1999 – 2010) fue ampliado (1960 – 2010) con el objeto de poder obtener una verdadera tendencia y no solamente patrones cíclicos o eventos de retorno. Estas bases de datos fueron procesadas con ayuda del paquete estadístico R (Ver. 2.15).

Se aplicó la prueba de Mann-Kendall a las series de tiempo mixtas generadas para detectar la existencia de tendencias significativas ascendentes o descendentes. Esta prueba es ampliamente usada en series de tiempo tanto climatológicas (Mavromatis y Stathis, 2011) como hidrológicas (Yue y Wang, 2004) y no requiere una distribución normal de datos, además de que presenta baja sensibilidad a las interrupciones abruptas (Tabari *et al.*, 2011).

Para este estudio se emplearon los resultados de los modelos climáticos de circulación global (MCG) Echam5 (ECH) y Hadgem1 (HAD) bajo escenarios de cambio climático A2 y B2 obtenidos también de la base de datos del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM y basándose en las sugerencias de los economistas involucrados en proyectos climáticos (Gay *et al.*, 2006).

**Tabla 3.3** Estaciones climáticas cercanas a la zona de estudio

CLAVE	NOMBRE	MUNICIPIO	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	PERIODO DATOS
16087	Pátzcuaro	Pátzcuaro	19.55°N	101.6°O	2035 msnm	1973 – 2009
16118	Santa Fé	Quiroga	19.823°N	101.383°O	2056 msnm	1965 – 2007
16146	Zirahuén	Salvador Escalante	19.466°N	101.75°O	2228 msnm	1972 – 2006

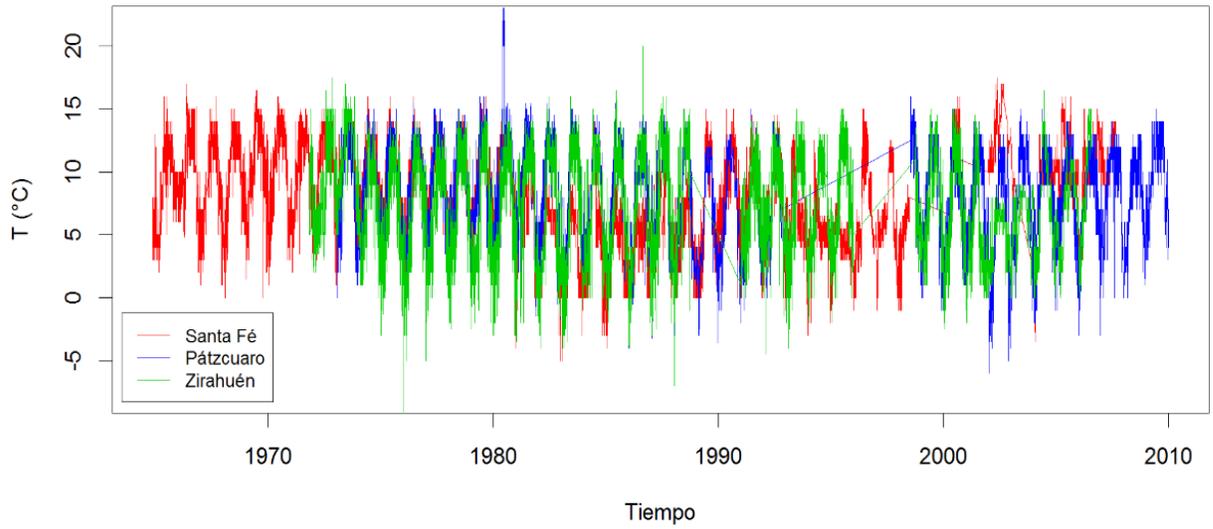


**Figura 3.7.** Ubicación de las estaciones climáticas cercanas a la zona de estudio

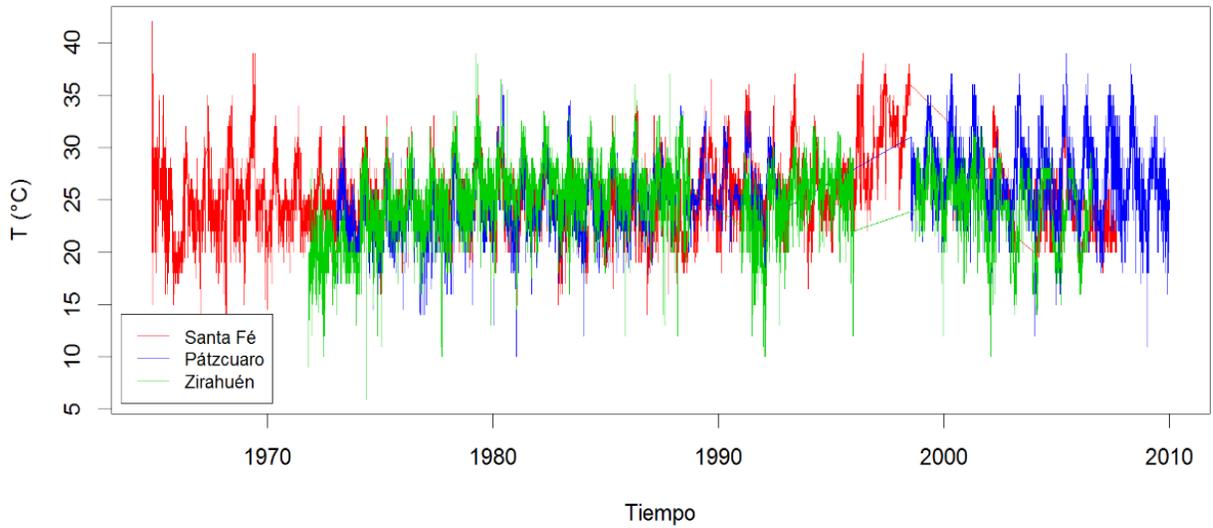
### 3.2.2 Resultados

Las temperaturas mínimas y máximas diarias correspondientes a las estaciones evaluadas, se encuentran graficadas en la figura 3.8 y 3.9. La información está graficada de forma periódica debido a las dos grandes épocas bien diferenciadas del año; la de frío y la de calor, es decir, a los umbrales máximos (generalmente entre abril, mayo o junio) y a los mínimos (por lo regular en diciembre o enero).

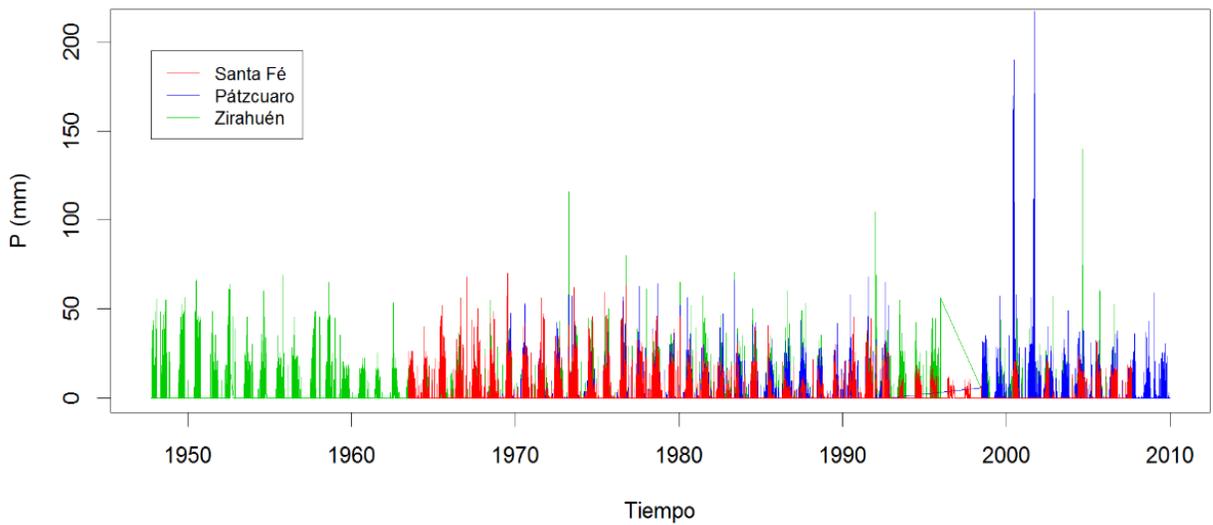
En cuanto a la precipitación, la figura 3.10 muestra la variación diaria en milímetros (mm) a través del tiempo, siendo Zirahuén la estación con el registro más antiguo seguida por Santa Fé. Las gráficas muestran las oscilaciones naturales tanto para la temporada de lluvias como para la temporada de secas, presentándose los umbrales máximos generalmente en julio o agosto y los mínimos durante febrero o marzo



**Figura 3.8.** Series de tiempo correspondientes a la temperatura mínima diaria



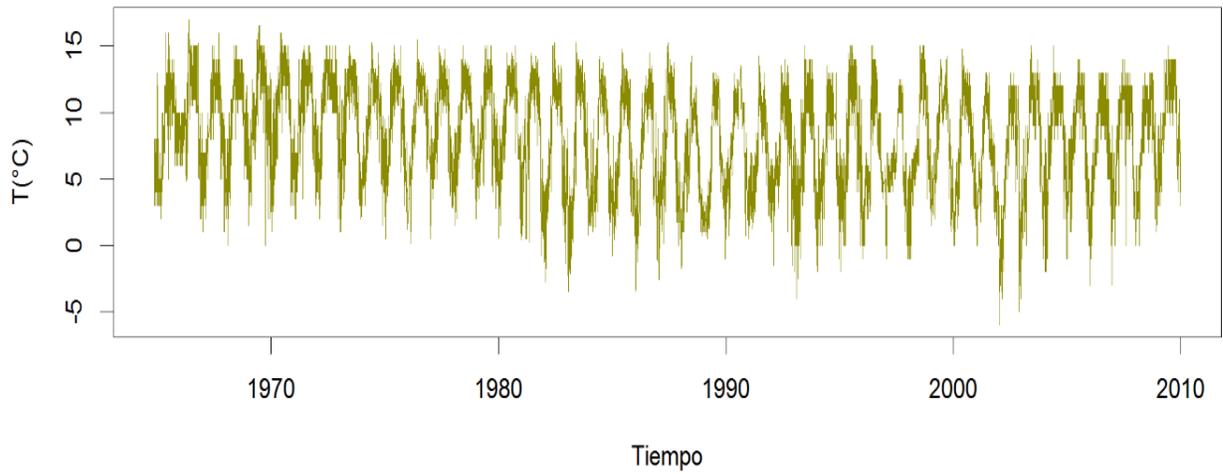
**Figura 3.9** Series de tiempo correspondientes a la temperatura máxima diaria



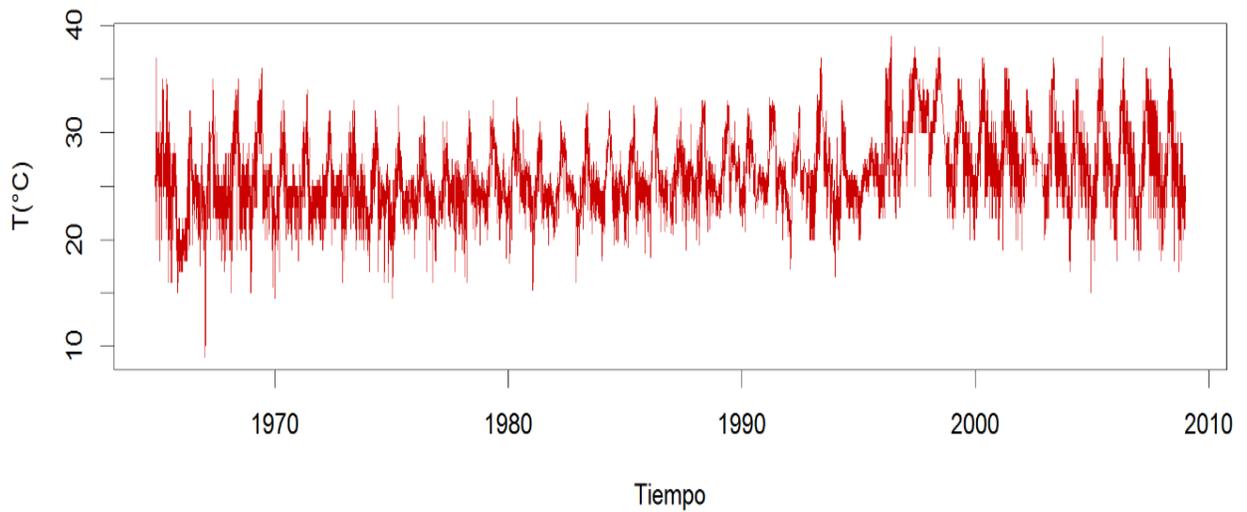
**Figura 3.10** Series de tiempo correspondientes a la precipitación diaria

La figura 3.11 muestra la serie de tiempo reconstruida para la temperatura mínima diaria a partir de la información climática de Pátzcuaro, Santa Fé y Zirahuén, mostrándose las oscilaciones naturales (frío y calor) a lo largo de cada año bien marcadas. Desde el inicio de la serie hasta el año de 1980, los valores máximos y los mínimos presentan valores semejantes. Sin embargo, posterior a este año los máximos siguen siendo parecidos aunque los mínimos que se habían estado presentando años anteriores disminuyen, alcanzando incluso los  $-5^{\circ}\text{C}$ . Dicho de otro modo, el rango de variación se vuelve más amplio. La gráfica muestra que años como 1982, 1985, 1992, 2001 y 2002 tuvieron inviernos más fríos y que 1997 fue el año con el umbral máximo más bajo de toda la serie. En cuanto a la prueba estadística de Mann-Kendall, ésta mostró una pendiente descendente, con un valor del coeficiente tau de  $-0.134$  y una  $P < 0.05$ , lo cual indica que las temperaturas mínimas han ido disminuyendo con el paso del tiempo, principalmente durante los inviernos.

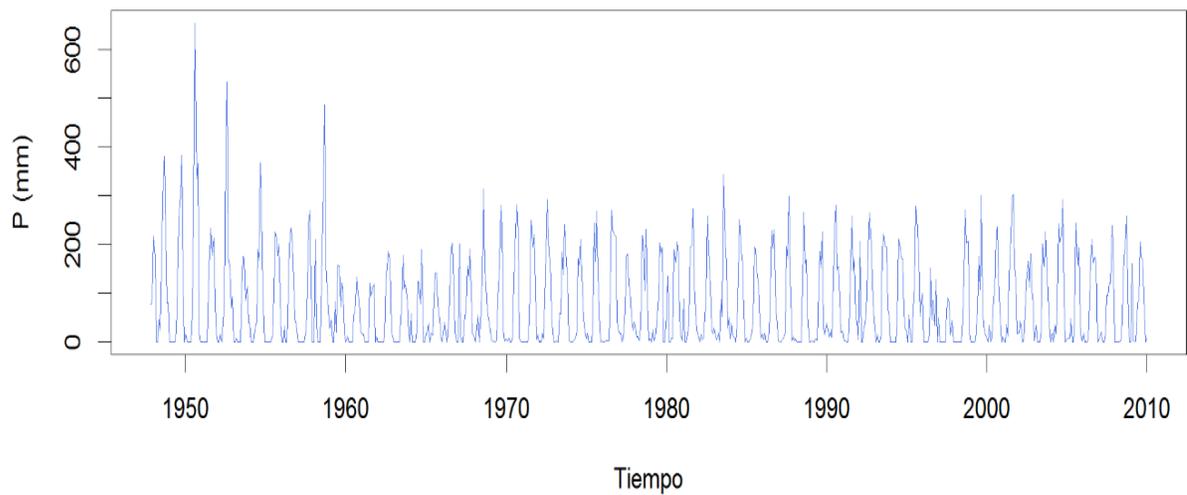
La reconstrucción de la serie de tiempo para la temperatura máxima diaria se muestra en la figura 3.12, misma que evidencia la variabilidad térmica presentada con el paso de los años. Se puede observar que antes de 1970 los umbrales máximos llegaban incluso hasta los  $35^{\circ}\text{C}$ , repitiéndose constantemente esta cifra hasta después de 1996. En cuanto a los umbrales mínimos, hasta a mediados de 1970 alcanzaron los  $15^{\circ}\text{C}$ , volviéndose cada vez menos fríos con el paso del tiempo, después del año 2000 la gráfica muestra que éstos comienzan a descender nuevamente, alcanzando valores alrededor de los  $17^{\circ}\text{C}$ . Por otro lado, se muestra un periodo (1996-1998) con valores muy por encima de los que se habían estado presentando hasta el momento y con muy poca variabilidad entre umbrales máximos y mínimos. La prueba de Mann-Kendall mostró para esta variable, una pendiente ascendente con un valor del coeficiente tau de  $0.238$  y una  $P < 0.05$ , lo que indica que las temperaturas máximas han ido incrementando con el tiempo.



**Figura 3.11.** Serie de tiempo mixta correspondiente a la temperatura mínima diaria



**Figura 3.12.** Serie de tiempo mixta correspondiente a la temperatura máxima diaria



**Figura 3.13.** Serie de tiempo mixta correspondiente a la precipitación mensual

Finalmente, la reconstrucción a escala mensual de la serie de tiempo de precipitación para la zona se muestra en la figura 3.13 de la página anterior.

La serie de precipitación comienza a finales de 1947 y termina en el 2009, ubicando los umbrales máximos correspondientes a la temporada de lluvias a mediados de cada año y los mínimos correspondientes a la temporada de secas a principios y a finales del año. Se puede observar que los valores más elevados para toda la serie se presentan en la década de los 50's, mientras que los más bajos se presentan para los años 1996 y 1997, exhibiendo asimismo valores bajos durante 1959, 1960 y 1961. El test de Mann-Kendall para esta serie de tiempo mostró una pendiente ascendente con un coeficiente de tau de 0.0188 y una  $P=0.4523$ , indicando que la precipitación ha aumentado con el paso del tiempo, aunque no de manera significativa (Figura 3.13).

En la tabla 3.4 se presentan las proyecciones de la temperatura promedio registrada hasta el año 2010 así como la proyectada a futuro bajo los modelos y escenarios climáticos ya mencionados. Se puede observar que todos los conjuntos de datos presentan una amplitud de rango térmico similar, aunque éste no se encuentra al mismo nivel a través del tiempo, es decir, los valores mínimos y máximos para el año 2050 son mayores que los presentados para el 2030 los cuales a su vez son mayores que los del 2010.

En la tabla 3.5 se muestra los contrastes en las distribuciones de los datos de precipitación entre modelos, habiendo una diferencia de entre 1 y 1.2 mm/año (dentro de cada escenario), siendo mayor esta tasa para el modelo Echam. Al comparar las proyecciones de escenarios A2 contra los B2 dentro del mismo año, se observa que los B2 presentan valores mayores, además de que la tasa de cambio es mayor.

**Tabla 3.4.** Medianas (Md) y medias ( $\mu$ ) de las proyecciones para temperatura promedio

MES		ACTUAL	ECH A2 2030	ECH A2 2050	HAD A2 2030	HAD A2 2050	ECH B2 2030	ECH B2 2050	HAD B2 2030	HAD B2 2050
Ene	Md	12.38	13.57	14.57	13.34	14.06	13.67	14.38	13.44	13.96
	$\mu$	12.36	13.55	14.55	13.31	14.04	13.65	14.36	13.42	13.94
Feb	Md	13.12	14.22	15.02	14.01	14.62	14.12	14.72	13.92	14.41
	$\mu$	13.1	14.19	14.99	13.98	14.59	14.08	14.69	13.89	14.38
Mar	Md	15.01	16.55	17.31	16.73	17.62	16.36	16.95	16.55	17.15
	$\mu$	14.98	16.52	17.28	16.7	17.59	16.34	16.92	16.52	17.12
Abr	Md	16.83	18.3	19.31	18.42	19.44	18.4	19.11	18.45	19.2
	$\mu$	16.8	18.27	19.28	18.38	19.41	18.37	19.09	18.42	19.2
May	Md	18.3	19.88	20.79	19.63	20.31	19.74	20.38	19.49	19.99
	$\mu$	18.27	18.85	20.76	19.6	20.28	19.72	20.35	19.46	19.96
Jun	Md	18.01	19.33	20.23	18.96	19.65	19.23	19.91	19.02	19.47
	$\mu$	17.98	19.3	20.2	18.94	19.63	19.2	19.89	18.99	19.45
Jul	Md	16.86	17.89	18.88	17.49	18.1	17.98	18.58	17.59	18.09
	$\mu$	16.83	17.87	18.85	17.47	18.07	17.95	18.56	17.57	18.07
Ago	Md	16.65	17.57	18.37	17.37	18.15	17.59	18.18	17.5	17.98
	$\mu$	16.62	17.55	18.35	17.35	18.13	17.56	18.16	17.48	17.95
Sep	Md	16.48	17.04	17.64	17.15	17.87	17.04	17.44	17.11	17.53
	$\mu$	16.46	17.02	17.62	17.13	17.85	17.02	17.42	17.08	17.51
Oct	Md	15.55	16.22	17.02	16.01	16.76	16.32	16.93	16.2	16.73
	$\mu$	15.52	16.2	17	15.99	16.74	16.3	16.9	16.17	16.71
Nov	Md	14	14.47	15.22	14.51	15.31	14.71	15.2	14.71	15.3
	$\mu$	13.98	14.45	15.2	14.49	15.3	14.69	15.18	14.69	15.29
Dic	Md	12.71	13.1	13.8	12.99	13.59	13.1	13.6	13	13.42
	$\mu$	12.68	13.07	13.78	12.97	13.57	13.07	13.57	12.97	13.4
<b>Anual</b>	Md	15.48	16.51	17.35	16.38	17.12	16.52	17.11	16.41	16.94
	$\mu$	15.46	16.48	17.32	16.35	17.09	16.49	17.09	16.38	16.91

**Tabla 3.5** Medianas (Md) y medias ( $\mu$ ) de las proyecciones para precipitación

MES		ACTUAL	ECH A2 2030	ECH A2 2050	HAD A2 2030	HAD A2 2050	ECH B2 2030	ECH B2 2050	HAD B2 2030	HAD B2 2050
Ene	Md	27.83	19.81	18.04	20.07	18.66	21.24	19.88	21.35	20.46
	$\mu$	27.81	19.79	18.02	20.05	18.67	21.21	19.86	21.32	20.44
Feb	Md	8.5	9.27	10.24	8.25	8.85	9.22	9.25	7.95	7.95
	$\mu$	8.52	12.35	10.31	8.34	8.93	9.28	9.33	8.02	8.04
Mar	Md	7.49	6.81	5.81	7.78	8.78	6.21	5.89	7.76	8.36
	$\mu$	7.54	6.81	5.81	7.78	8.78	6.21	5.88	7.77	8.35
Abr	Md	9.99	8.7	6.81	8.73	6.99	8.14	9.45	9.71	8.36
	$\mu$	10.04	8.74	6.84	8.75	6.99	8.17	9.5	9.76	8.4
May	Md	42.5	43.85	43.95	44.06	43.97	45.8	45.8	45.17	45.42
	$\mu$	42.71	44.05	44.15	44.16	44.04	46	46	45.33	45.51
Jun	Md	177.2	179	181.2	174.4	173.6	180.4	182.7	176.4	176.9
	$\mu$	177.1	179.1	181.3	174.5	173.7	180.4	182.7	176.5	177
Jul	Md	235.3	226.2	217.6	229	222.7	231.8	226.2	233.8	229.9
	$\mu$	235.1	226	217.4	228.9	222.5	231.6	226	233.7	229.8
Ago	Md	231.8	261	270.4	232.7	223	256.7	263	233.3	227
	$\mu$	231.7	260.8	270.2	232.6	222.9	256.5	262.9	233.2	226.8
Sep	Md	177.6	220.6	237.8	198.6	200.9	211	222.4	192.9	194.4
	$\mu$	177.4	220.3	237.6	198.3	200.7	210	222.2	192.7	194.2
Oct	Md	76.15	63.75	59.03	70.94	71.43	73.09	70.81	78.6	80.07
	$\mu$	76.15	63.65	58.95	70.8	71.29	72.98	70.71	78.47	79.92
Nov	Md	21.81	24.06	26.64	31.68	39.54	24.77	26.91	30.88	36.45
	$\mu$	21.75	24.09	26.68	31.69	39.59	24.78	26.93	30.9	36.49
Dic	Md	11.98	5.76	2.11	11.41	12.09	9.36	7.33	14.03	14.67
	$\mu$	11.98	5.76	2.11	11.43	12.1	9.37	7.34	14.04	14.7
Anual	Md	1028.7	1069.7	1080.5	1038.6	1031.3	1079.9	1089.2	1052.7	1050.8
	$\mu$	1027.7	1068.5	1079.3	1037.3	1030.2	1078.7	1088.1	1051.7	1049.7

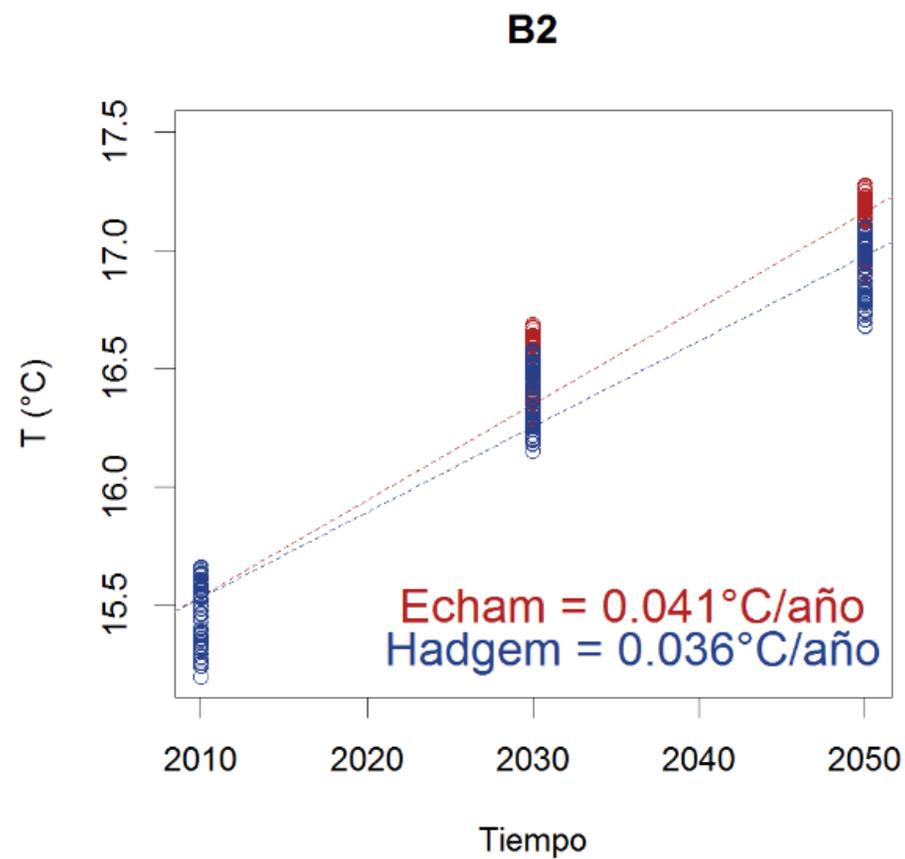
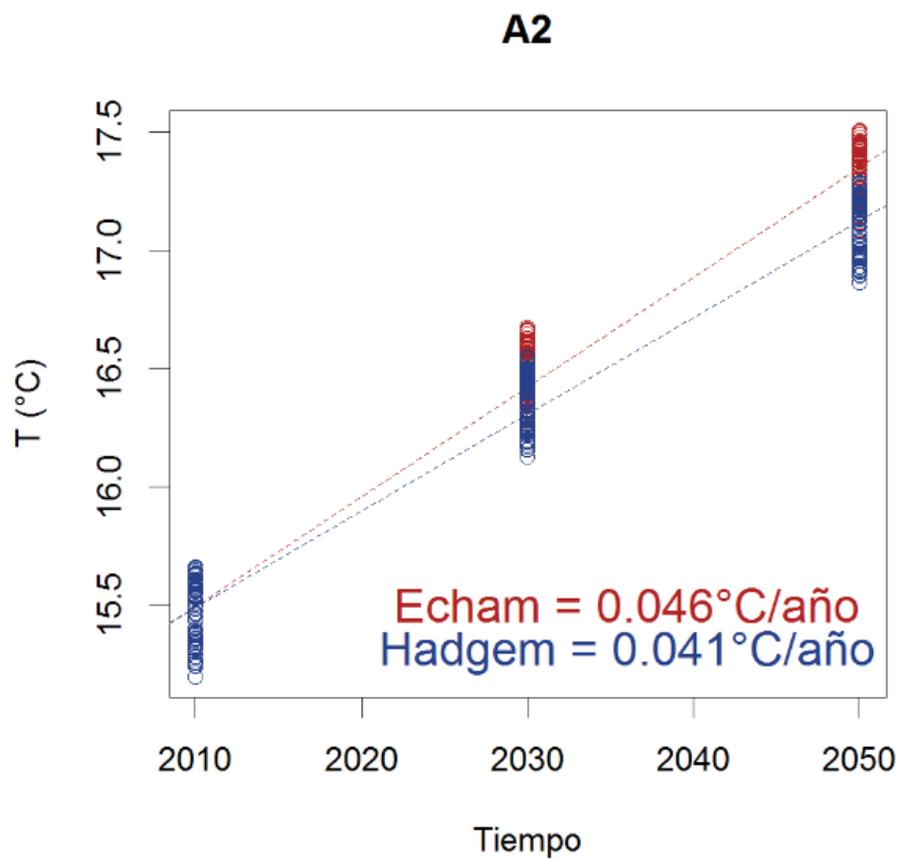
Los diagramas de dispersión anual para la zona del humedal Ramsar de Pátzcuaro, tanto de la temperatura promedio registrada hasta el año 2010 así como la proyectada a futuro bajo modelos y escenarios climáticos, corresponden a la figura 3.14.

Se puede observar que todos los conjuntos de datos presentan una amplitud de rango térmico similar, de alrededor de 0.5°C, aunque éste no se encuentra al mismo nivel a través del tiempo, es decir, los valores mínimos y máximos para el año 2050 son mayores que los presentados para el 2030 los cuales a su vez son mayores que los del 2010.

Al comparar las proyecciones de escenarios A2 contra los B2 dentro del mismo año, se observa que los A2 presentan valores mayores, lo cual se percibe más claramente en las proyecciones para el año 2050, además de que la tasa de cambio es mayor.

En cuanto a los modelos, se observa que el Echam (dentro de cada escenario) presenta temperaturas mayores que el Hadgem, lo cual es constatado con una diferencia de 5 milésimas de °C por año en la tasa anual de cambio. La prueba de Kruskal-Wallis reveló diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ,  $gl=8$ ) entre los conjuntos de datos (ver además tabla 3.4).

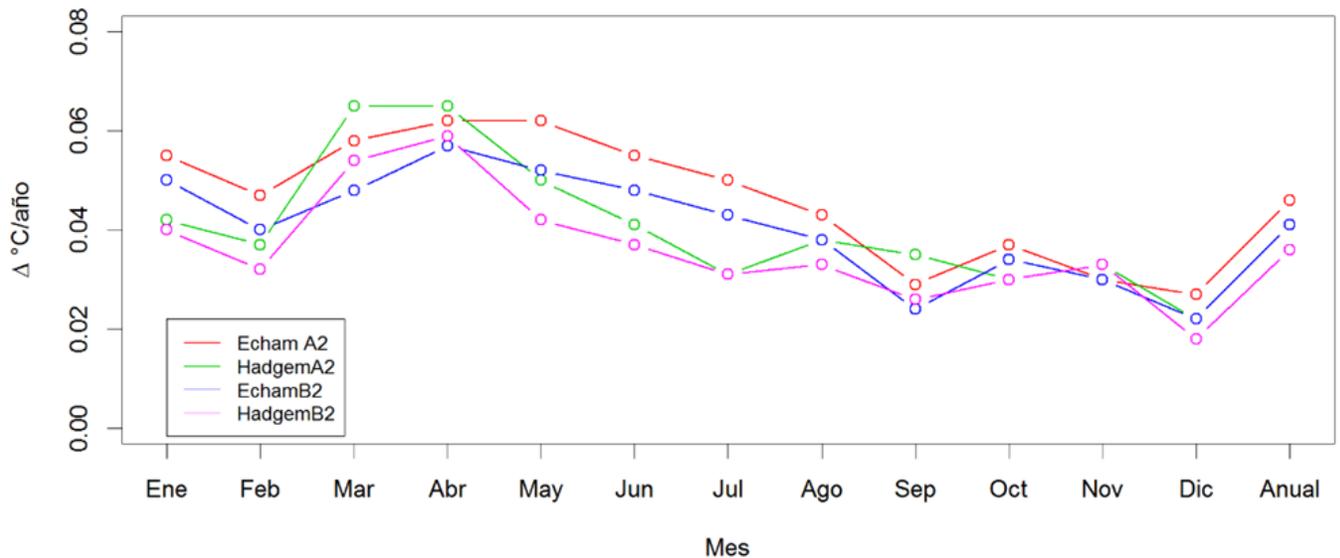
En cuanto a la tasa de cambio mensual de temperatura (figura 3.15), se observa de manera general un comportamiento paralelo de los modelos a través del tiempo, siendo el Echam bajo un escenario A2 el que mantiene la mayor tasa y el Hadgem bajo un escenario B2 el que mantiene la menor. Para todos los casos, marzo y abril son los meses que presentan el mayor  $\Delta$  y diciembre el menor. (Tabla 3.6)



**Figura 3.14.** Proyecciones de temperatura anual para el humedal de Pátzcuaro

**Tabla 3.6.** Tasa de cambio mensual ( $^{\circ}\text{C}/\text{año}$ ) de temperatura promedio bajo escenarios A2 y B2

MES	ECHAM A2	HADGEM A2	ECHAM B2	HADGEM B2
Ene	0.055	0.042	0.05	0.04
Feb	0.047	0.037	0.04	0.032
Mar	0.058	0.065	0.048	0.054
Abr	0.062	0.065	0.057	0.059
May	0.062	0.05	0.052	0.042
Jun	0.055	0.041	0.048	0.037
Jul	0.05	0.031	0.043	0.031
Ago	0.043	0.038	0.038	0.033
Sep	0.029	0.035	0.024	0.026
Oct	0.037	0.03	0.034	0.03
Nov	0.03	0.033	0.03	0.033
Dic	0.027	0.022	0.022	0.018
<b>Anual</b>	<b>0.046</b>	<b>0.041</b>	<b>0.041</b>	<b>0.036</b>



**Figura 3.15.** Tasa de cambio mensual ( $^{\circ}\text{C}/\text{año}$ ) de temperatura promedio bajo escenarios A2 y B2

La figura 3.16 muestra la dispersión anual de precipitación tanto histórica (hasta el 2010) como proyectada a futuro (2030 y 2050) para el área del humedal de Pátzcuaro.

Los diagramas indican que la amplitud del rango de valores para todos los conjuntos de datos es de alrededor de 30 mm, a pesar de no estar al mismo nivel en el eje de las Y y que la precipitación, con el modelo Echam, va aumentando a través del tiempo mientras que con el Hadgem solo ocurre este incremento del 2010 al 2030.

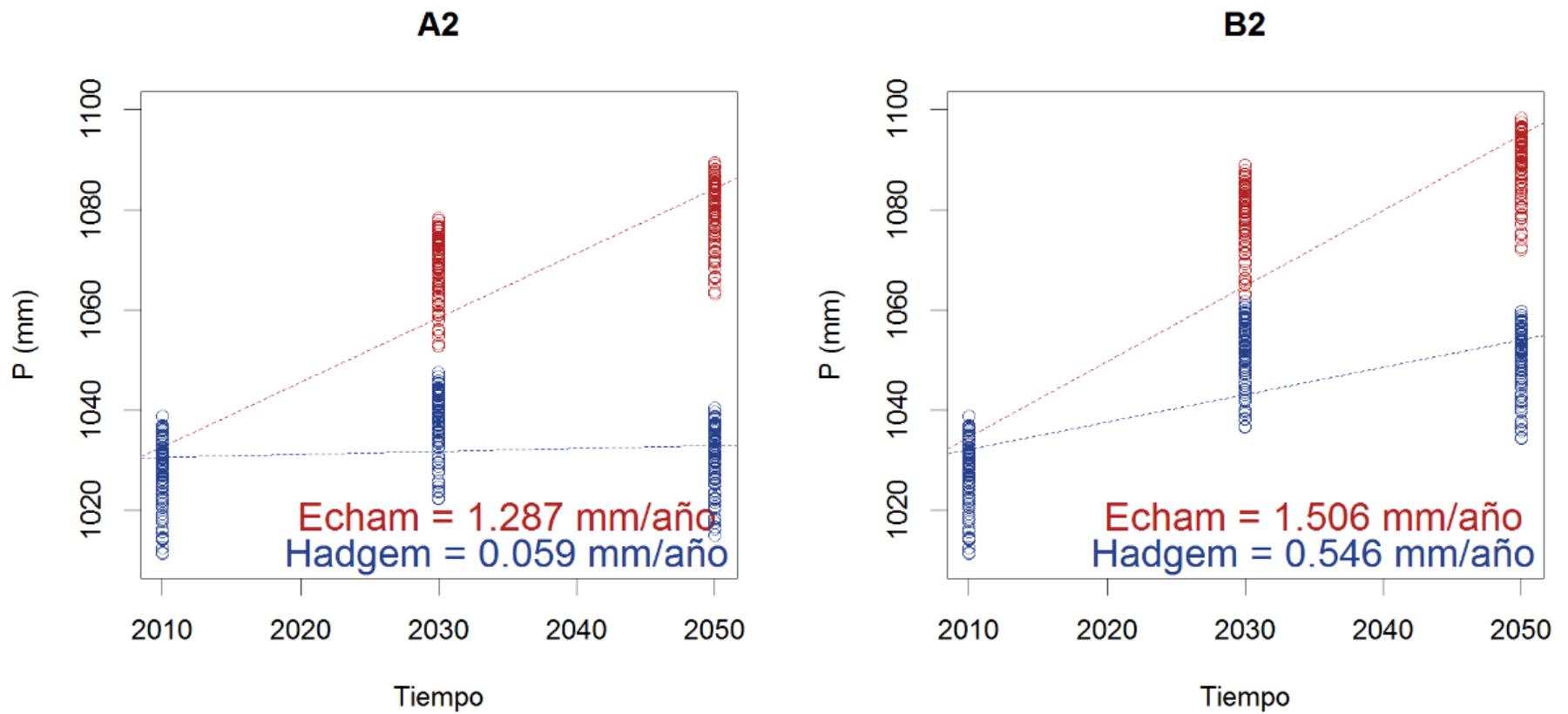
Estos contrastes en las distribuciones de los datos entre modelos se ven reflejados en la tasa anual de cambio, habiendo una diferencia de entre 1 y 1.2 mm/año (dentro de cada escenario), siendo mayor esta tasa para el modelo Echam.

Al comparar las proyecciones de escenarios A2 contra los B2 dentro del mismo año, se observa que los B2 presentan valores mayores, además de que la tasa de cambio es mayor.

Por otro lado, La prueba de Kruskal-Wallis reveló diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ,  $gl=8$ ) entre los conjuntos de datos (ver además tabla 3.5).

La tasa de cambio mensual de precipitación (Figura 3.17), muestra de manera general un comportamiento paralelo (con traslape en algunos meses), de los modelos a través del tiempo, siendo el Echam bajo un escenario A2 el que mantiene claramente la mayor tasa.

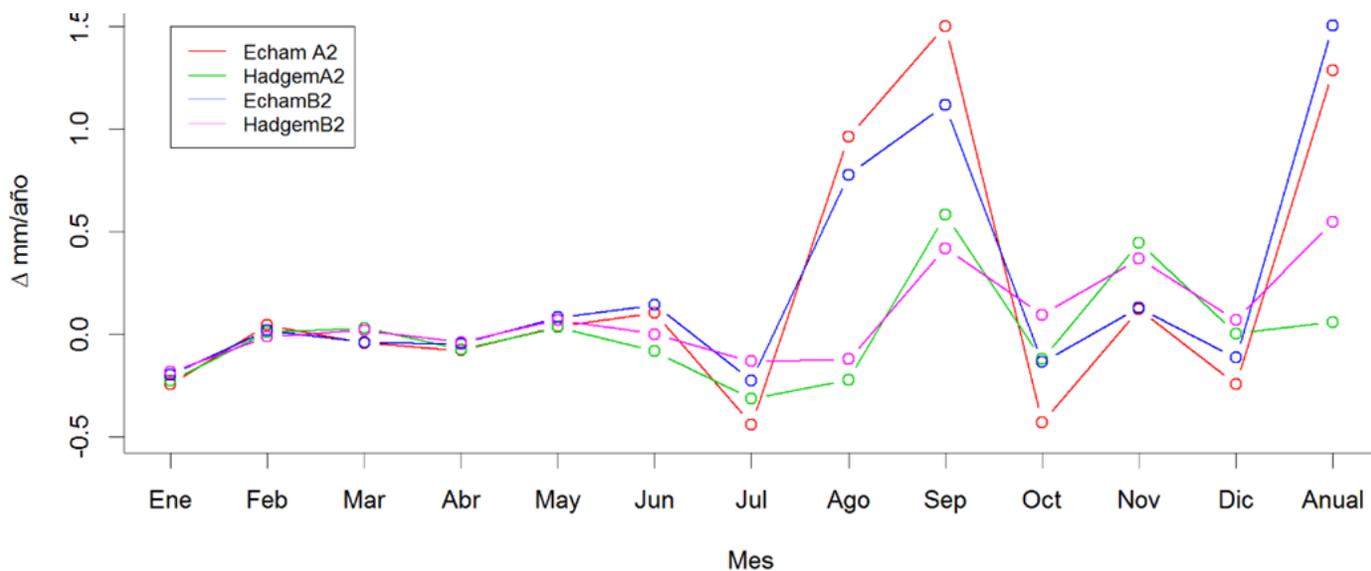
Durante la temporada de lluvias (principalmente agosto y septiembre) los  $\Delta$  para todos los casos se elevan notablemente y posteriormente vuelven a descender (Tabla 3.7).



**Figura 3.16.** Proyecciones de precipitación anual para el humedal de Pátzcuaro

**Tabla 3.7.** Tasa de cambio mensual (en mm/año) de precipitación bajo escenarios A2 y B2

MES	ECHAM A2	HADGEM A2	ECHAM B2	HADGEM B2
Ene	-0.244	-0.228	-0.198	-0.184
Feb	0.045	0.01	0.02	-0.012
Mar	-0.043	0.031	-0.041	0.02
Abr	-0.08	-0.076	-0.047	-0.041
May	0.036	0.033	0.082	0.07
Jun	0.105	-0.084	0.142	0
Jul	-0.442	-0.314	-0.226	-0.133
Ago	0.962	-0.222	0.778	-0.123
Sep	1.503	0.581	1.118	0.419
Oct	-0.43	-0.122	-0.136	0.094
Nov	0.123	0.446	0.129	0.368
Dic	-0.246	0.003	-0.116	0.068
<b>Anual</b>	<b>1.287</b>	<b>0.059</b>	<b>1.506</b>	<b>0.546</b>



**Figura 3.17.** Tasa de cambio mensual (en mm/año) de precipitación bajo escenarios A2 y B2

## 4. Composición fisicoquímica del agua y sedimentos

### 4.1 Calidad del agua

Los resultados de los análisis en el humedal Sur Ramsar-Pátzcuaro mostraron una temperatura del agua con un promedio anual de 21.7°C. La temperatura disminuye de sequía (22.3°C) a lluvia (14.4°C) (Tabla 4.1). Especialmente la frontera acuática registra las temperaturas más baja (10.5°C), mientras que la frontera terrestre y humedal registraron las temperaturas más altas (32.2°C y 32.6°C respectivamente).

Un análisis ANOVA ( $p < 0.05$ ) y Turkey (IC=95%) (Tabla 4.2) indican una diferencia significativa ( $p = 0.001$ ) entre la época de lluvia y estiaje, reportando una temperatura de máxima de 30.9°C (octubre) en la época de lluvia y 32.6°C (abril) en la época de estiaje y mínima de 17.76°C (junio a agosto) temporada de lluvia y 10.5°C (enero) en la época de estiaje (Tabla 4.1).

El potencial de hidrógeno registró un promedio anual de 8.3. La frontera terrestre registro el mismo valor promedio, sin embargo, en las estaciones 10,12 y 15 el pH fue de 9.0, la parte media del humedal y en la frontera acuática el promedio fue de 8, solo en la estación 23 de ésta última incrementa a 9 (Tabla 4.1). Sin embargo, temporalmente existe una diferencia significativa del pH entre la época de lluvia y sequía (Tabla 4.2), en los meses de junio a agosto (lluvias) se registraron valores alcalinos (9.7 a 10.28) y niveles ligeramente ácidos (6.93 a 7.0) durante los meses de enero a marzo (sequía).

El oxígeno disuelto registró una concentración promedio anual de 5.6 mg/L, especialmente se registró una máxima concentración en el humedal y en su frontera acuática con un promedio de 6 mg/L, y la concentración en la frontera terrestre tuvo un promedio de 5mg/L. Temporalmente la distribución de ésta concentración si representa una diferencia significativa ( $p = 0.025$ ), un valor máximo en 12mg/L en la temporada de lluvia (agosto) y el mínimo de 0.87 durante la temporada de sequía (diciembre) (Tablas 4.1 y 4.2).

En este sistema se registró un promedio anual de 242.8mg/L de alcalinidad total, con un valor de 232.4mg/L en temporada de lluvia, durante sequía el promedio fue de 219.1mg/L. El valor máximo se registró en la parte media del humedal (276mg/L). La frontera terrestre presento un promedio de 262mg/L y la frontera acuática presentó un promedio de 204mg/L.

En todo el ecosistema dominan los bicarbonatos (206.6mg/L) seguido de los carbonatos (30.4mg/L) y finalmente los hidróxidos (1.5mg/L). Durante la época de sequía, en comparación con la época de lluvias, se registró que existe una disminución de bicarbonatos (182.8mg/L), al igual que de los carbonatos (29mg/L) y un aumento en los hidróxidos a (2.4 mg/L). En lo que respecta al promedio anual de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es de 16.4mg/L, mismo que disminuye en la temporada de lluvia hasta 2.3mg/L y aumenta a 19.4mg/L en la temporada de sequía (Tabla 4.1).

La dureza total tiene un promedio anual de 277.7mg/L. Durante la temporada de lluvia disminuye a 157.1mg/L y aumenta en la temporada de sequía a 291.8mg/L. La mayor concentración se reporta en la frontera terrestre con un promedio de 392mg/L, seguido con 268mg/L en el humedal y finalmente en la frontera acuática se registró una dureza de 184mg/L que es el valor más bajo en el ecosistema. Los análisis estadísticos de ANOVA y Turkey indican que esta variable no presenta diferencia significativa entre los sitios de muestreo (43.93%) ni entre la temporada de lluvia y sequía (p=0.16) (Tabla 4.2).

La dureza de calcio presento un promedio anual de 18.01mg/L, disminuyendo en temporada de lluvia a 12 mg/L y aumentando a 18 mg/L en sequía. La Dureza de magnesio registró un promedio anual de 56.5mg/L, mismo que disminuye en la temporada de lluvia a 30.8mg/L y aumenta en sequia a 60.2mg/L.

En el humedal se obtuvo un promedio anual de fósforo total de 468.1µg/L, el cual disminuye en la temporada de lluvia a 300.4µg/L y en sequía presenta una concentración de 461.5 µg/L.

Los niveles máximos de fósforo se registraron en la frontera terrestre (814 $\mu$ g/L), seguida de la frontera acuática (305 $\mu$ g/L) y el mínimo en la parte media del humedal (277 $\mu$ g/L). El ortofosfato presentó un promedio anual de 168.7  $\mu$ g/L, aumenta ligeramente a 169.6 $\mu$ g/L en lluvia y disminuye a 145.2  $\mu$ g/L en sequía (Tabla 4.1).

El promedio de los nitratos en la temporada de lluvia fue de 15mg/L. Los nitritos presentaron un promedio de 0.04mg/L, con un valor máximo de 0.12mg/L en el humedal (estación 8) y un mínimo de 0.01mg/L en la misma zona (estación 1) (Figura 4.1). El promedio del amonio en la misma temporada fue de 0.03mg/L con un valor máximo de 0.03mg/L en la frontera terrestre.

En la temporada de sequía la concentración promedio de nitratos fue de 24.9mg/L, con un máximo en la frontera terrestre de 64mg/L (estación 4) y de 12.5mg/L en la frontera acuática (estación 2). Los nitritos en temporada de sequía presentaron un promedio de 0.09mg/L, el máximo se encontró en el humedal (estación 11) con 0.42mg/L y el mínimo (0.01 mg/L) en la frontera terrestre (estación 15). (Figura 4.1). El promedio del amonio en este periodo fue de 0.02mg/L, con un máximo de 0.04mg/L en la frontera terrestre (estación 9).

El fósforo total, ortofosfato, materia orgánica, así como sólidos suspendidos totales presentaron una diferencia significativa espacial y temporal ( $p < 0.05$ ), mientras que para nitritos y nitratos existió una diferencia espacial entre las zonas del humedal pero no en la temporalidad, ya que en el caso de estas variables se reportaron valores de "p" igual a 0.138, y 0.242 respectivamente (Tabla 4.2).

Las medias estadísticas de los contenidos de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) no presentaron diferencias significativas entre las dos épocas del año (P probabilidad)  $P = 0.1774$ . En lluvia la media fue de 160mg/L, con una variación entre los sitios de muestreo de un máximo de 360mg/L y un mínimo de 60 mg/L. En la temporada de sequía la media fue de 150mg/L, en donde existe variación entre los sitios de muestreo, con un máximo de 225mg/L y un mínimo de 110 mg/L. No existieron diferencias significativas entre las tres fronteras del humedal con una  $P = 0.9691$  (Figura 4.2).

**Tabla 4.1.** Parámetros fisicoquímicos del humedal Sur Ramsar Pátzcuaro.

<b>VARIABLE</b>	<b>PROMEDIO LLUVIA</b>	<b>PROMEDIO SEQUIA</b>	<b>PROMEDIO ANUAL</b>
<b>Temperatura (°C)</b>	14.4 ± 9.8	22.3 ±2.2	21.7 ±2.38
<b>Potencial de Hidrogeno</b>	8.8 ± 4.1	8.3 ±0.6	8.3 ±0.48
<b>Conductividad (µS/cm)</b>	730.1 ± 556.6	1525.8±564.5	1428.8±504.16
<b>Oxígeno (mg/L)</b>	3.6±2.8	5.7 ±1.4	5.6 ±1.01
<b>Alcalinidad total (mg/L)</b>	232.4 ±186.0	219.1 ±103.9	242.8 ±97.44
<b>Carbonatos (mg/L)</b>	30.3 ±44.1	29.0 ±17.9	30.4 ±20.46
<b>Bicarbonatos (mg/L)</b>	204.0 ±167.3	182.8 ±107.2	206.6 ±100.99
<b>Hidróxidos (mg/L)</b>	1.5±5.4	2.4 ±2.0	2.3 ±2.01
<b>Bióxido de Carbono (mg/L)</b>	2.3±4.1	19.4 ±22.2	16.4 ±17.82
<b>Dureza total (mg/L)</b>	157.1±109.6	291.8 ±139.2	277.7 ±120.98
<b>Dureza de calcio (mg/L)</b>	12.2±12.8	17.7 ±13.0	18.0 ±12.75
<b>Dureza de magnesio (mg/L)</b>	30.8±24.0	60.2 ±30.2	56.5 ±25.24
<b>Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)</b>	221.9±260.3	551.8 ±264.9	499.6 ±233.81
<b>Sólidos Disueltos Totales (mg/L)</b>	484.0±349.8	974.8 ±393.8	908.8 ±325.82
<b>Sólidos sedimentables (mL/L)</b>	0.4±0.8	0.7 ±1.7	0.7 ±1.30
<b>Turbidez (NTU)</b>	73.1 ± 67.6	114.1 ±66.1	106.7 ±58.23
<b>Fósforo total (µg/L)</b>	300.4±300.9	461.5 ±437.7	468.1 ±361.77
<b>Ortofosfato (µg/L)</b>	169.6±209.2	145.2 ±237.1	168.7 ±214.31
<b>Nitratos (mg/L)</b>	15.0±13.2	24.9 ±15.1	24.3 ±13.84
<b>Nitritos (mg/L)</b>	0.04±0.04	0.09 ±0.08	0.1 ±0.06
<b>Amonio (mg/L)</b>	0.03±0.03	0.02 ±0.02	0.01 ±0.06
<b>Clorofila a(mg/m<sup>3</sup>)</b>	10.7±11.9	21.9 ±8.7	20.8 ±7.56
<b>DBO<sub>5</sub> (mg/L)</b>	156.1±122.1	163.3 ±31.7	171.6 ±34.16
<b>DQO (mg/L)</b>	420.8±471.3	903.5 ± 67.6	888.1 ±72.47

**Tabla 4.2.** Resultados de diferencia significativa temporal (lluvia y estiaje) con valores de  $p < 0.05$  para ANOVA, e Intervalo de confianza (IC) del 95% para el método de Turkey (\*=significativamente diferente)

<b>Variable</b>	<b>SC</b>	<b>F</b>	<b>P (Anova)</b>	<b>IC (95%) Turkey</b>
<b>Temperatura</b>	468.3	27.00	0.001	*
<b>Potencial de hidrogeno</b>	2.393	8.03	0.005	*
<b>Conductividad eléctrica</b>	746758	2.48	0.110	---
<b>Alcalinidad total</b>	309856	8.43	0.004	*
<b>Dureza total</b>	24111	1.99	0.160	---
<b>Oxígeno disuelto</b>	21.15	5.12	0.025	*
<b>Fósforo total</b>	2441252	26.45	0.001	*
<b>Ortofosfato</b>	291718	26.26	0.001	*
<b>Nitritos</b>	0.019	2.22	0.138	---
<b>Nitratos</b>	307	1.38	0.242	---
<b>Materia orgánica (DBO/DQO)</b>	0.549	29.93	0.001	*
<b>Sólidos suspendidos totales</b>	622853	6.55	0.011	*

En la temporada de lluvia la media estadística de la demanda química de oxígeno (DQO) fue de 500mg/L, con un máximo de 1,200mg/L y un mínimo de 200mg/L y existieron diferencias significativas entre los sitios de muestreo. En la temporada de sequía la media estadística fue de 900mg/L, con un máximo de 1,000mg/L y un mínimo de 700mg/L, y no hubo diferencias entre los sitios de muestreo. Existió diferencia significativa entre las dos temporadas del año con una  $P=4.5588e^{-05}$ . Entre las zonas del humedal del humedal no hubo diferencias significativas ( $P=0.8829$ ) la media en la frontera acuática (FA) y en el humedal fue de 810mg/L, en la frontera terrestre (FT) fue de 900mg/L (Figura 4.3).

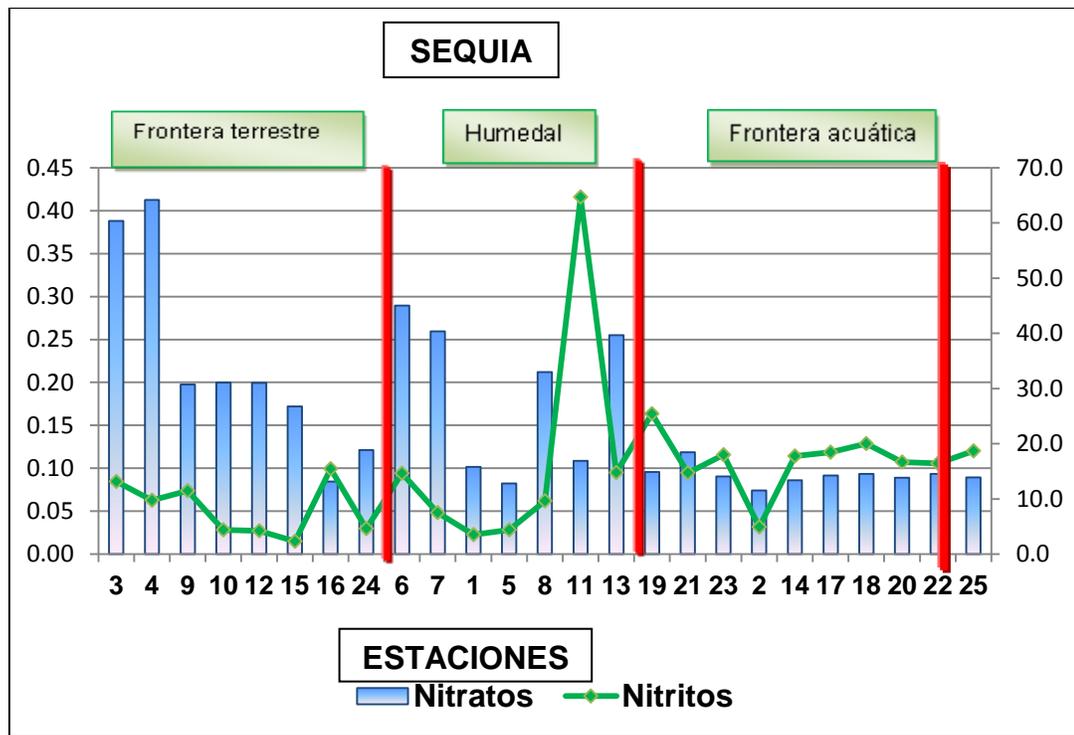
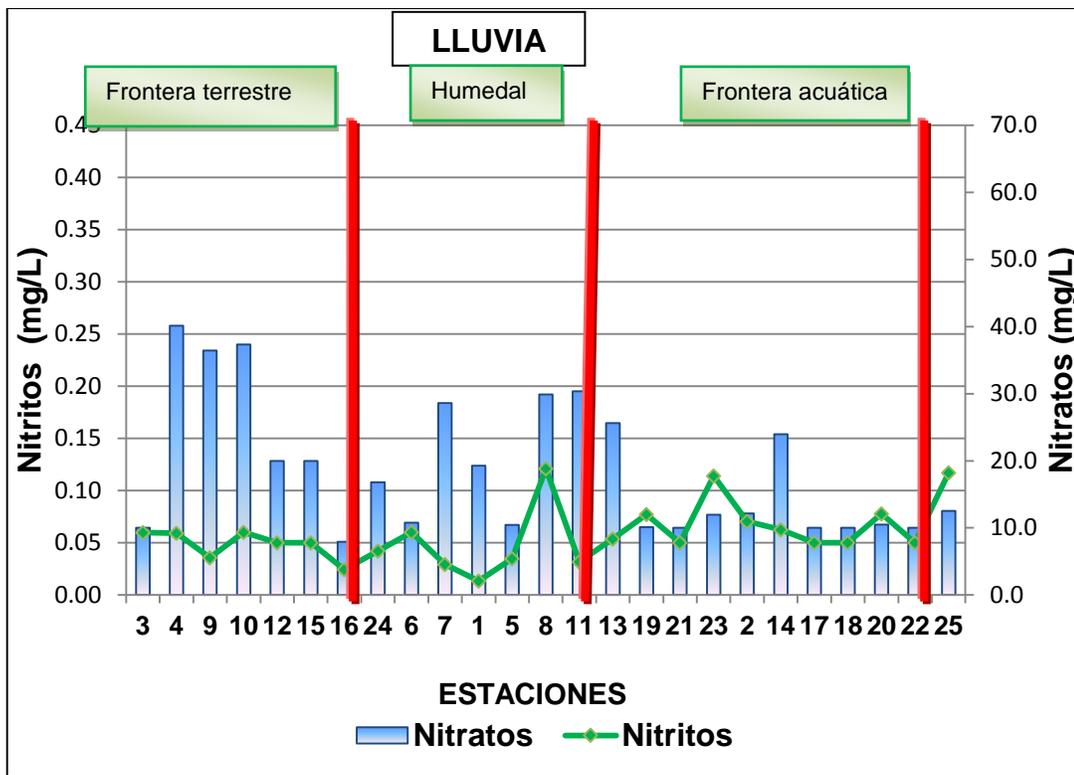
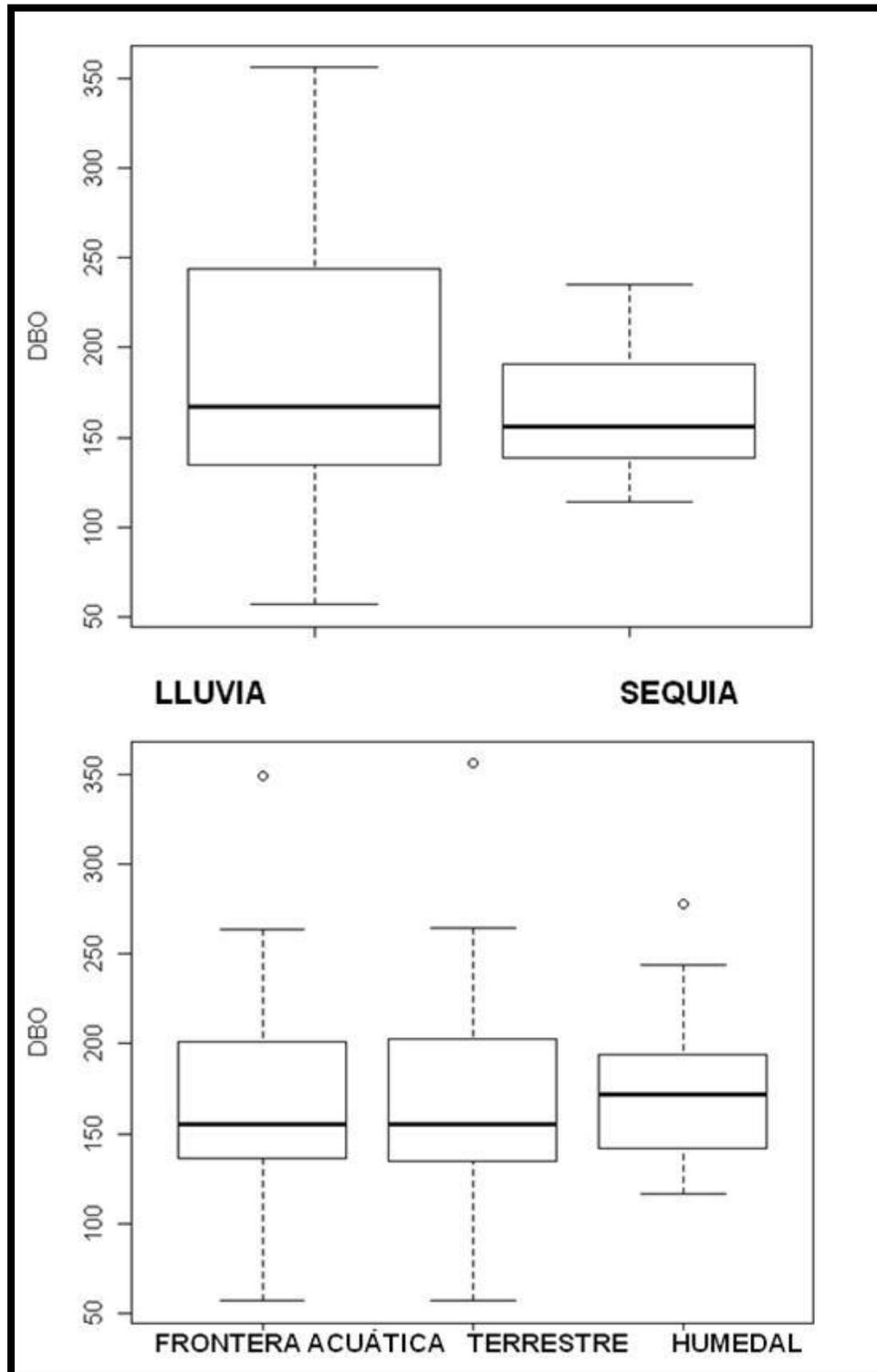
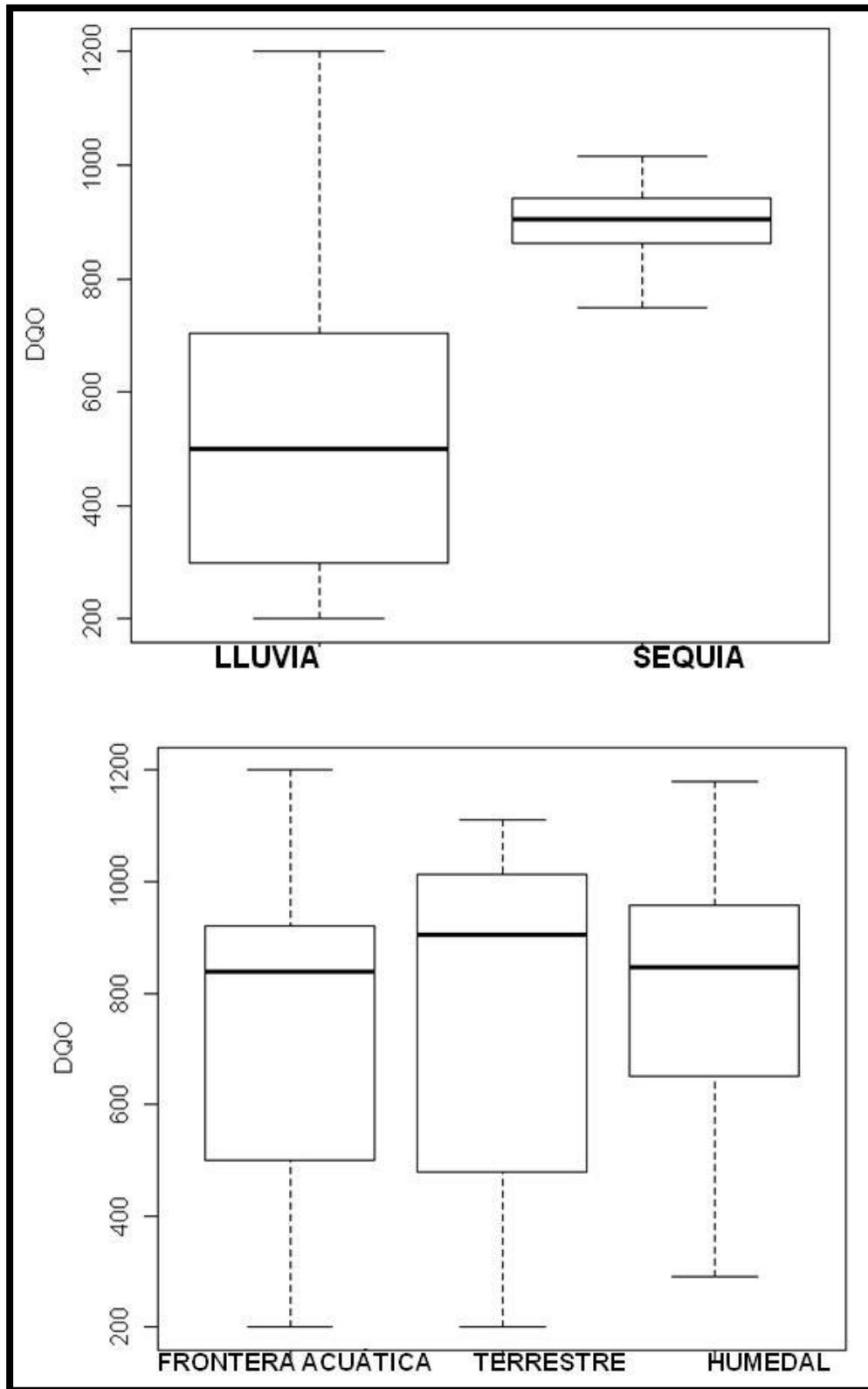


Figura 4.1 Distribución de los nitratos nitritos en temporada de sequía y lluvia en el humedal Ramsar-Pátzcuaro.



**Figura 4.2.** Distribución de la demanda bioquímica de oxígeno por temporada y por zonas del humedal Ramsar-Pátzcuaro.



**Figura 4.3.** Distribución de la demanda química de oxígeno por temporada y por zonas del humedal Ramsar-Pátzcuaro.

La conductividad presento un promedio anual de  $1,428.8\mu\text{S}/\text{cm}$ , con un valor en lluvias de  $730.1\mu\text{S}/\text{cm}$ , mismo que se incrementa en la temporada de sequía hasta  $1,525.8\mu\text{S}/\text{cm}$ . El valor máximo de conductividad fue de  $2,887\mu\text{S}/\text{cm}$  en la frontera terrestre (estación 3) en la época de sequía, mientras que el valor mínimo fue de  $672\mu\text{S}/\text{cm}$  en la frontera acuática (estación 2) y ocurre durante la época de lluvia. El análisis estadístico mostro que la conductividad eléctrica presenta diferencias significativas espacialmente, sin embargo, de acuerdo al método de Turkey (IC=95%) no se reporta una diferencia significativa en temporalidad. (Ver Tabla 4.1 y 4.2).

El promedio anual de la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) fue de  $908.8\text{mg}/\text{L}$ , con niveles promedio de  $484\text{mg}/\text{L}$  en la temporada de lluvia de mismo que se incrementa en la temporada de sequía a  $974.8\text{mg}/\text{L}$ . Mientras que el promedio anual de los sólidos sedimentables fue de  $0.7\text{mL}/\text{L}$ , de  $0.4\text{mL}/\text{L}$  en la temporada de lluvia y  $0.7\text{mL}/\text{L}$  en la temporada de sequía. Los SDT en la frontera terrestre son de  $1,104\text{mg}/\text{L}$ , los cuales disminuyen un 5.3 % en el humedal ( $1,046\text{mg}/\text{L}$ ), y en la frontera acuática existe una mayor disminución de SDT (37 %)  $656\text{mg}/\text{L}$ .

La relación entre la conductividad y SDT muestran una valor de  $R^2=0.76$  que indica una asociación directa, a mayor conductividad mayor concentración de SDT, las estaciones de la frontera terrestre registran valores altos de conductividad ( $1,794\mu\text{S}/\text{cm}$ ), en las estaciones de la parte media del humedal la conductividad se reduce en un 13.27% equivalente a  $1,556\mu\text{S}/\text{cm}$ , y finalmente hacia la frontera acuática disminuye un 32.71% más, equivalente a  $1,047\mu\text{S}/\text{cm}$  (Figura 4.4).

El análisis de asociación entre la conductividad con la dureza total fue de 66 %, es decir que conforme aumenta la concentración de iones en el humedal por la dureza, aumenta la conductividad la cual mide también los iones ( $R=0.84$ ) (Figura 4.5).

Los sólidos suspendidos totales (SST) mostraron un promedio anual de  $499.6\text{mg}/\text{L}$ , con un promedio estacional en lluvia de  $221.9\text{mg}/\text{L}$ , que aumenta en la temporada de sequía a  $551.8\text{mg}/\text{L}$

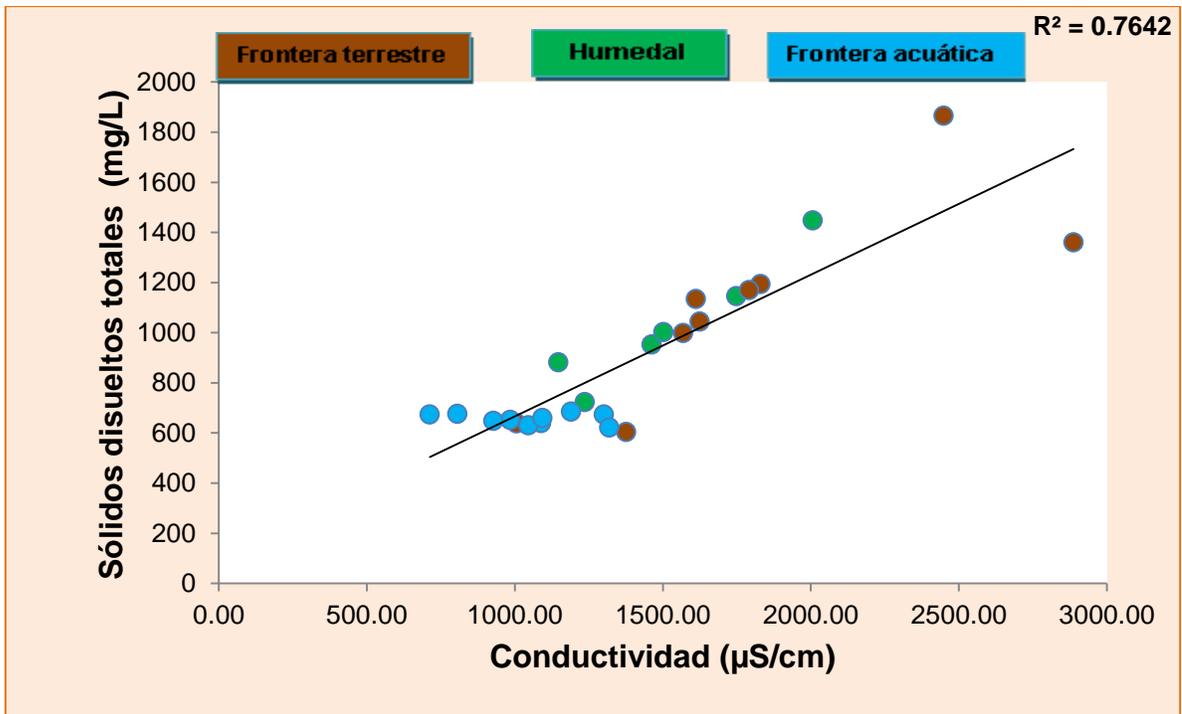


Figura 4.4. Relación de la conductividad con los sólidos disueltos totales

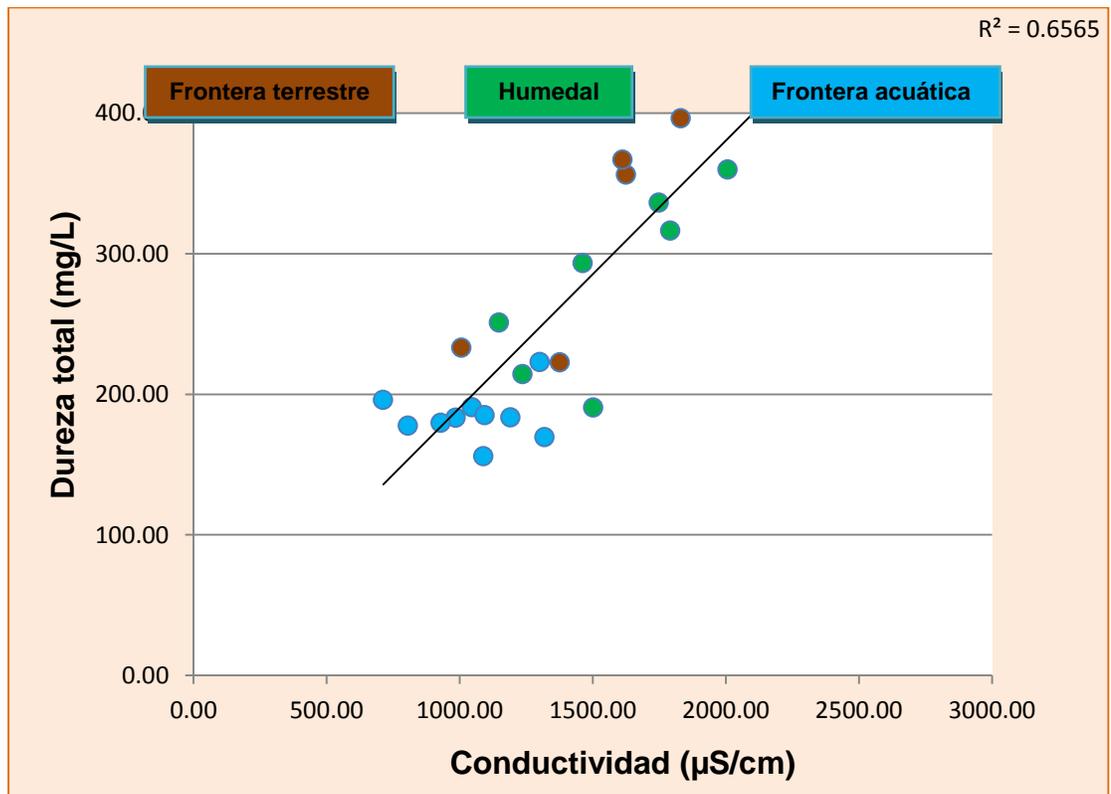


Figura 4.5. Relación de la dureza total con la conductividad.

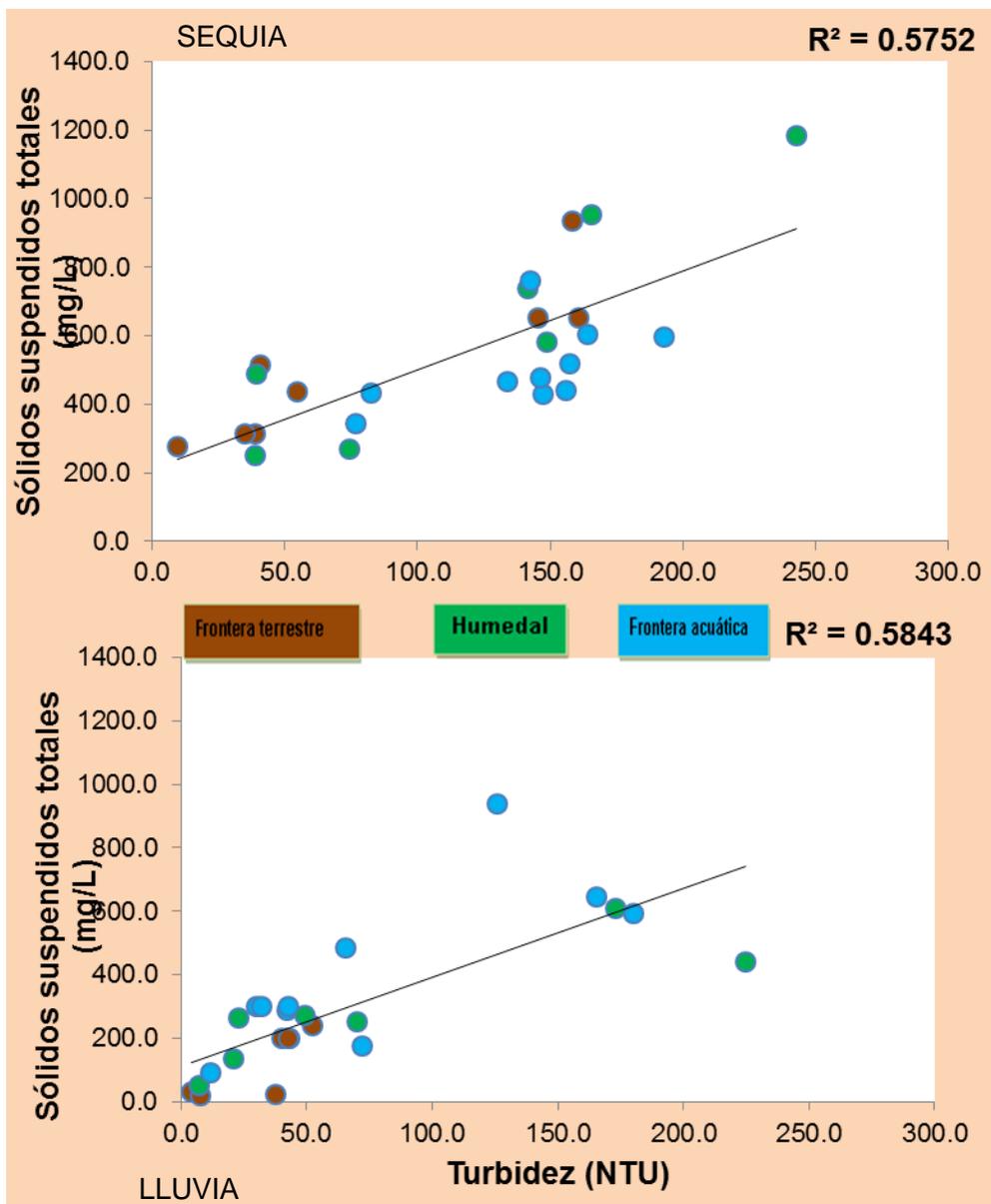
La concentración máxima de SST fue en la frontera terrestre 959mg/L (estación 4) y la mínima en el humedal de 211mg/L (estación 1). Este parámetro presento una concentración de 402 mg/L en las estaciones de la frontera acuática, seguidos del humedal con 289mg/L y finalmente las estaciones de la frontera terrestre presentaron una concentración de 202mg/L. Los sólidos sedimentables tuvieron un promedio a anual y en sequía de 0.7 mL/L, disminuyendo en lluvia a 0.4 mL/L.

La turbidez presentó un valor de 73.1 NTU en lluvia, hasta 114.1 en sequía, y su promedio anual fue de 106.7 NTU. La parte media del humedal presento una turbidez de 34 NTU, la frontera terrestre de 33 NTU, y las estaciones de la frontera acuática mostraron 77 NTU.

El análisis de correlación entre ésta variable y los sólidos suspendidos totales en la temporada de lluvia mostraron una asociación de  $R^2=0.58$ , lo que sugiere que al incrementar la concentración de SST también aumenta la turbidez (Figura 4.5). A excepción de la estación 20 que se encuentra en la frontera acuática y que presenta una concentración alta de SST (940mg/L) y una baja turbidez (126 NTU); y de la estación 8 que se encuentra en el humedal, y presentó una concentración baja de SST de 442mg/L y una turbidez alta de 225 NTU.

El análisis de correlación entre estas dos variables para la temporada de sequía tiene una asociación del 57%; existe una concentración mínima de turbidez (52 NTU) en el humedal, seguida de las estaciones de la frontera terrestre (63mg/L) y finalmente las estaciones de la frontera acuática con 140 NTU, con respecto a los SST, estos tienen menor concentración en el humedal con 465mg/L, seguidos de la frontera acuática con 506mg/L y finalmente la frontera terrestre con 511mg/L. Las estaciones 6 y 13, a pesar de que se encuentran en el humedal tienen mayor concentración de sólidos, por estar más cercanas a la frontera terrestre. En este mismo sentido las estaciones 3, 4 y 16 tienen un promedio de 150mg/L mayor que el resto de su grupo (frontera terrestre) debido a que las dos primeras se encuentran en terrenos agrícolas y la estación 16 se ubica en un canal (Figura 4.5).

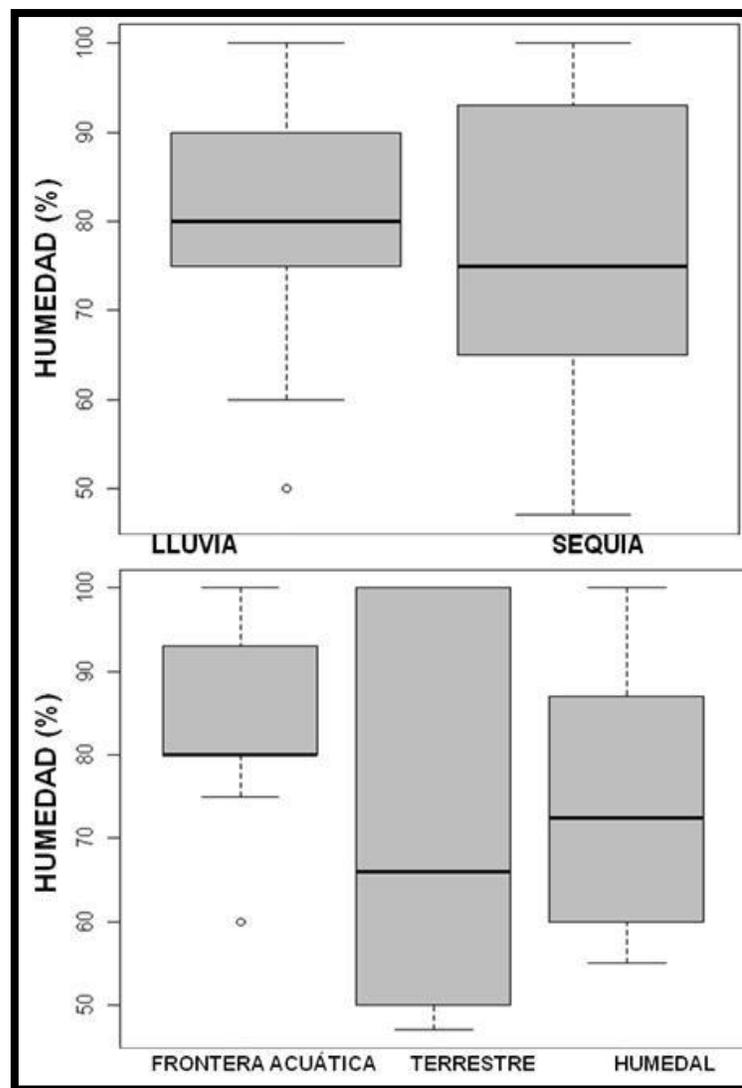
La clorofila presento un promedio anual de 21 mg/m<sup>3</sup>, con un máximo de 38 mg/m<sup>3</sup> en la estación 13 (humedal) y un mínimo de 8 mg/m<sup>3</sup> en la estación 24 (frontera terrestre). En lluvia se obtuvo una concentración de 11 mg/m<sup>3</sup> la cual se incrementa en sequia a 22 mg/m<sup>3</sup>



**Figura 4.5.**Relacion de los sólidos suspendidos totales y la turbidez en la temporada de sequía y lluvia en el humedal Ramsar-Pátzcuaro.

## 4.2 Variables en Sedimentos

De acuerdo al análisis de Shapiro Wilk, la humedad en sedimento muestra tendencia de variación entre lluvia y sequía; en temporada de lluvia tuvo una media de 80%, mientras que en la temporada de sequía la media fue de 75% Probabilidad (P)  $P= 0.6556 > 0.05$ . La humedad en las tres zonas del humedal (frontera terrestre, humedal y frontera acuática) presento un máximo de 100% y un mínimo de menos de 50% en la frontera terrestre  $P= 0.5512 > 0.05$  (Figura 4.6).



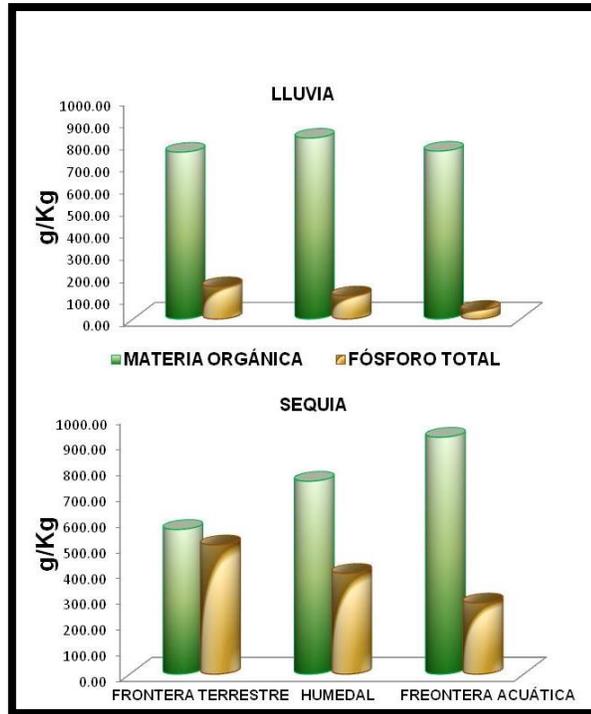
**Figura 4.6.** Porcentaje de humedad de sedimento por temporada y por zonas del humedal Ramsar-Pátzcuaro.

Se tuvo un promedio de 778g/Kg de materia orgánica en todo el ecosistema, el contenido mayor de este parámetro durante la temporada de lluvia se presentó en la parte media del humedal con 821g/kg, seguido de la frontera acuática con 763g/Kg y finalmente un mínimo en la frontera terrestre con 758g/Kg. La concentración máxima de fósforo total se encontró en la frontera terrestre con 147g/Kg, seguida del humedal con 105 g/Kg y la mínima en la frontera acuática con 40g/Kg.

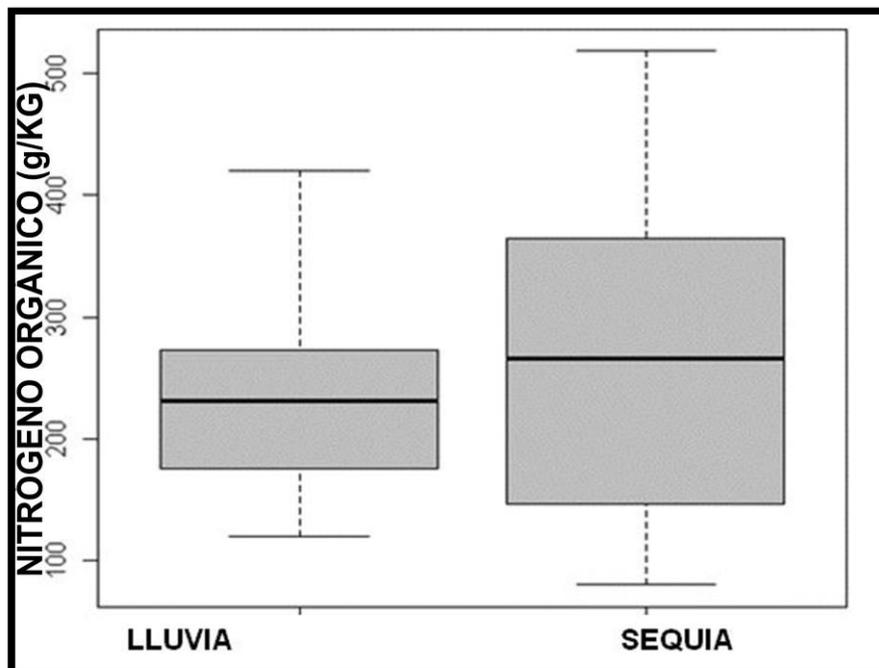
En la temporada de sequía la concentración máxima de materia orgánica se encontró en la frontera acuática con 920 g/Kg, seguida del humedal con 750 g/Kg y finalmente la concentración mínima se encontró en la frontera terrestre con 563 g/Kg. Con respecto al fosforo total, en esta misma temporada, se obtuvo un máximo en la frontera terrestre con 502 g/Kg, seguido del humedal con 392 g/Kg y un mínimo en la frontera acuática con 277 g/Kg (Figura 4.7).

El nitrógeno orgánico no presentó diferencias significativas entre las dos épocas del año. En la temporada de lluvia la media estadística fue de 220g/Kg, en donde hubo variación entre los sitios de muestreo, con un máximo de 410g/kg y un mínimo de 110g/kg. En la temporada de sequía la media estadística fue de 280g/Kg, cuya variación entre los sitios de muestreo tuvo como mínima 100g/kg y un máximo de más de 500g/kg  $P=0.6412>0.05$  (Figura 4.8).

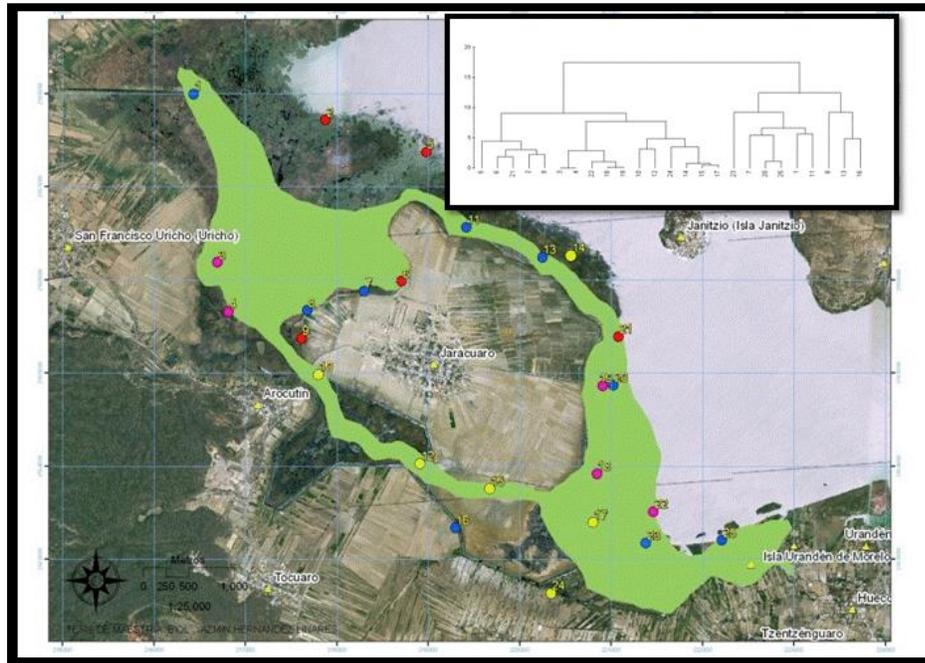
Derivado del análisis multivariado de Clúster en sedimentos se crearon cuatro grupos de sitios de muestreo en la temporada de lluvia, el primero está conformado por las tres zonas del humedal, dominado por las estaciones del humedal y la frontera acuática; el segundo grupo lo conforman la frontera acuática y terrestre dominado por la frontera acuática; el tercer grupo se integra por las frontera terrestre y acuática, dominando la frontera terrestre; finalmente el cuarto grupo está conformado por las tres zonas, dominado por las estaciones del humedal (Figura 4.9).



**Figura 4.7.** Concentración de la materia orgánica y fósforo total en sedimento en la temporada de lluvia y sequía en el humedal Ramsar-Pátzcuaro.



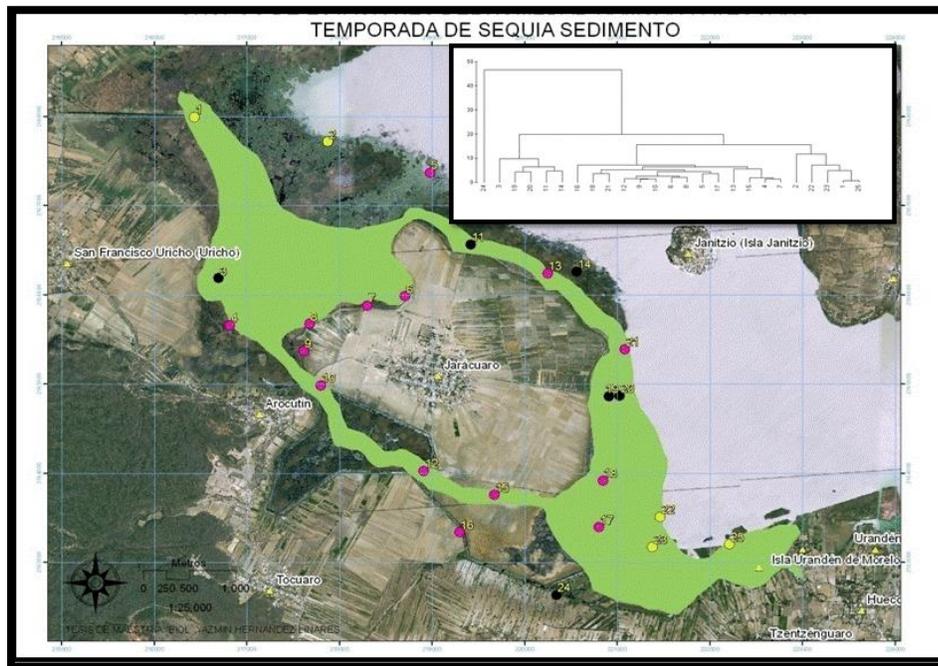
**Figura 4.8.** Distribución del nitrógeno orgánico en sedimentos en el humedal Ramsar-Pátzcuaro.



**Figura 4.9.** Análisis cluster de acuerdo a las variables fisicoquímicas en sedimento en temporada de lluvia, en el humedal Ramsar-Pátzcuaro.

Con el mismo análisis para la temporada de sequía se crearon tres grupos, el primero incluye las tres zonas, dominando la frontera acuática; el segundo dominado por la frontera terrestre, y el tercer grupo incluye la frontera acuática y el humedal, dominado por la frontera acuática (Figura 4.10).

Los resultados del análisis granulométrico integran a los sedimentos en 5 grupos de acuerdo a su textura. El grupo I incluye la clase textural franco-areno-arcilloso presente en la frontera terrestre en un 38 %, en el humedal en un 33% y en la frontera acuática en un 55%. Grupo II franco-arenosa en la frontera terrestre con un 31%, en el humedal en un 25% y en la frontera acuática en un 16%. Grupo III franco-arcillosa en la frontera terrestre en un 21%, el humedal en un 10% y en la frontera acuática en un 20%. Grupo IV Areno-francosa en la frontera terrestre con un 10%, en el humedal en un 15 % y en la frontera acuática en un 8%. Finalmente el grupo V franca este en la frontera terrestre no presento valor, en el humedal se encontró en un 18% y en la frontera acuática en un 2% (Tabla 4.3).



**Figura 4.10.** Análisis clusters de acuerdo a las variables fisicoquímicas en sedimento en la temporada de sequía, en el humedal Ramsar-Pátzcuaro.

**Tabla 4.3.** Porcentaje anual de textura del sedimento en la frontera terrestre (FT), humedal (H) y frontera acuática (FA) en el humedal Ramsar-Pátzcuaro.

CLASE TEXTURAL	TEXTURA	FT	H	FA
<b>Franco-areno-arcilloso</b>	Moderadamente fina	38	33	55
<b>Franco-arenosa</b>	Moderadamente gruesa	31	25	16
<b>Franco-arcillosa</b>	Moderadamente fina	21	10	20
<b>Areno-francosa</b>	Gruesa	10	15	8
<b>Franca</b>	Media	0	18	2

El análisis factorial mostro las variables en sedimento que más influyeron en el humedal en las dos temporadas del año, siendo en la temporada de lluvia la materia orgánica y la humedad. A diferencia de la temporada de sequía solo fue el fósforo total, donde el factor 1 tiene un porcentaje total de varianza del 52% en lluvia y un 50% en sequia (Tabla 4.4).

**Tabla 4.4.** Dominancia de variables de sedimento en lluvia y sequía.

<b>LLUVIA</b>	<b>FACTOR 1</b>
Materia orgánica	-0,897449
Humedad	-0,826069
<b>SEQUIA</b>	<b>FACTOR 1</b>
Fósforo total	0,712643

## 5. Composición iónica

Una de las herramientas para la interpretación hidro-geoquímica de sistemas hidrológicos es la identificación iónica del agua que permite determinar tipos de agua, interacción, y mezcla entre ellos.

La interacción entre las fuentes de agua superficial y los acuíferos es compleja, por lo que con el análisis hidrogeoquímico es posible determinar el origen del agua del humedal y su interacción con el agua del lago de Pátzcuaro.

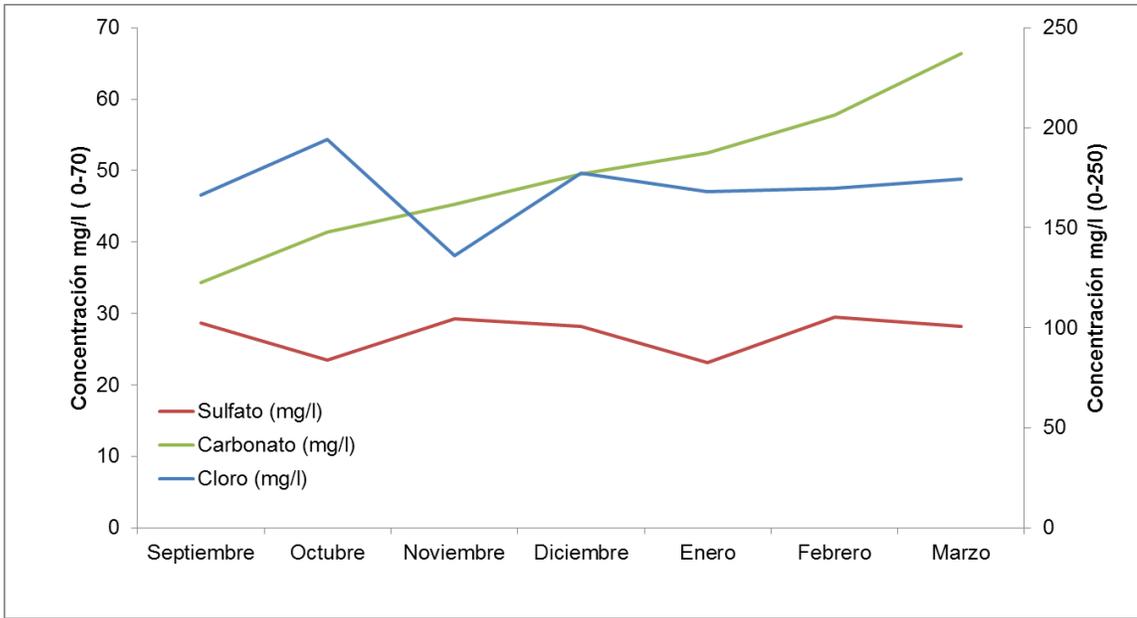
En el humedal Sur RAMSAR de Pátzcuaro, se registró mayor variabilidad en el ion Potasio ( $K=96.32\%$ ) con un concentración promedio de 18.99 mg/l, mientras que el ion con menor variabilidad fueron los carbonatos ( $CO_3=21.65\%$ ) con un promedio de 49.58mg/l (Tabla 5.1).

Entre los cationes se identificó que el carbono es el catión dominante de noviembre a marzo y el cloro es dominante en septiembre y octubre (Figura. 5.1).

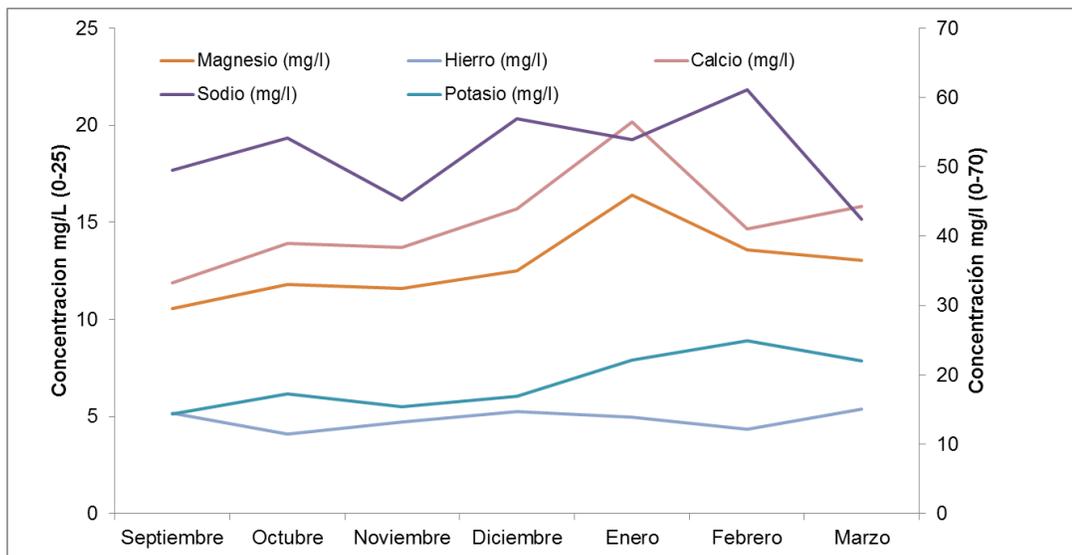
En cuanto a los aniones, el sodio predomina en todos los meses muestreados y, el hierro junto con el potasio son los de menor predominancia (Figura 5.2).

**Tabla 5.1.** Resultados de las concentraciones de cationes y aniones del Humedal

	Cl (mg/l)	SO (mg/l)	CO <sub>3</sub> (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Fe (mg/l)	Ca (mg/l)
<b>Promedio</b>	170.02	27.26	49.58	52.17	18.99	12.79	4.83	15.12
<b>STD</b>	83.83	19.94	10.73	43.40	18.29	9.78	3.08	11.07
<b>Min</b>	8.50	1.15	30.87	1.54	1.40	0.52	0.16	1.28
<b>Max</b>	434.57	96.94	80.00	190.90	97.59	49.87	13.74	64.83
<b>CV</b>	49.30	73.14	21.65	83.19	96.32	76.47	63.75	73.26



**Figura 5.1.** Tendencia de los cationes en el humedal sur de Pátzcuaro.



**Figura 5.2.** Tendencia de los cationes en el humedal sur de Pátzcuaro.

## **6.- Deterioro hídrico del humedal**

Los elementos más importantes de un humedal son: a) agua, b) sustrato y c) comunidades biológicas bien establecidas. De éstos, el agua es el factor principal que controla el medio y la vida vegetal y animal relacionada a él (Abarca, 2002, Mitsch y Gosselink, 2000).

El estudio de los humedales está ligado al ciclo hidrológico e interviene activamente en todos los procesos del mismo. Así pues, los humedales intervienen directamente en la recarga y descarga de acuíferos, y pueden también representar un importante papel en las pérdidas de agua del sistema por evaporación directa de la lámina de agua o por la evapotranspiración que ocasiona la vegetación (Red de seguimiento de humedales interiores de la CAPV).

Desde el punto de vista ecológico, estos cuerpos de agua, y ecosistemas asociados (lagos) podrían considerarse entre los más importantes, no sólo por el potencial que representa para el desarrollo de actividades económicas, sino además por la gran cantidad de servicios ambientales que prestan a la población humana: depuración de aguas, reducción de los efectos de inundación, control del microclima, almacenamiento de agua durante la época de estiaje, recarga de acuíferos, hábitat para especies de importancia económica (peces) y biológica (aves, reptiles, anfibios). Desafortunadamente, estos ecosistemas continentales son los más utilizados y vulnerables a la acción humana con afectaciones como la contaminación por residuos sólidos o químicos y descargas urbanas, extracción excesiva de agua con fines agrícolas y pecuarios, deforestación por prácticas agropecuarias y cambio de uso de suelo (Rojas y Vidal, 2008).

Por lo tanto es importante tipificar el deterioro hídrico de los humedales, en este caso en particular del humedal sur RAMSAR del lago de Pátzcuaro, con la finalidad de caracterizar la función hidrogeológica que desempeña y evaluar el estado de "salud ambiental" y analizar las causas de su deterioro.

## 6.1 Clasificación funcional del humedal.

Para establecer las características funcionales del humedal sur del Lago de Pátzcuaro, primeramente se debe tipificar de acuerdo a su altitud, latitud, longitud, temperatura media del aire, oscilación de la temperatura: vienen implícitos en la demarcación de las cuencas hidrográficas y régimen climático del territorio.

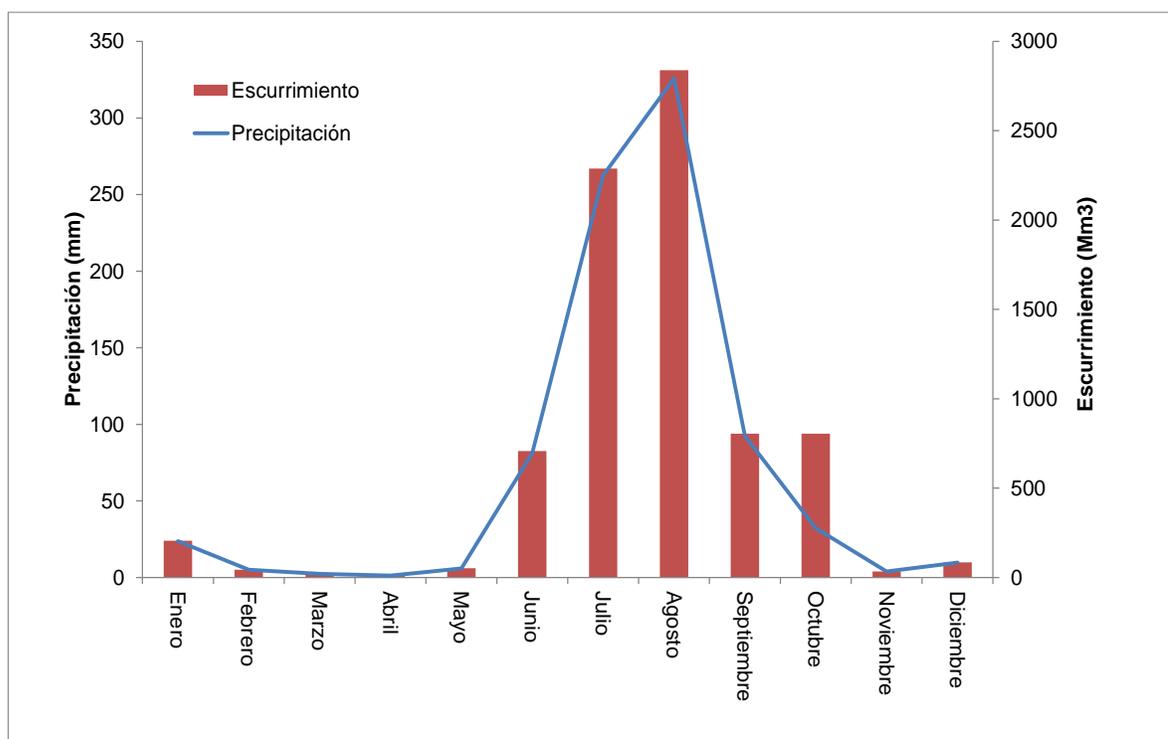
Se realizó una descripción detallada del Humedal Sur Pátzcuaro-RAMSAR (Tabla 6.1), tipificado como **Microcuenca de inundación** (García y Vidal, 2008).

**Tabla 6.1.** Caracterización descriptiva del Humedal Sur de Pátzcuaro.

INFORMACION GENERAL				
Nombre del Humedal		Municipio		Estado
Humedal sur RAMSAR Pátzcuaro		Pátzcuaro y Erongarícuaro		Michoacán
Altitud	UTM Y	UTM X	Extension	Perimetro
2036 m	2171501.92	246175.12	707.42 Ha	22151.48 m
Región Fisiográfica	Cuenca	Subregión	Ecosistema acuático asociado	
Eje Neovolcánico	Pátzcuaro-Cuitzeo	Pátzcuaro	Lago de Pátzcuaro	
INFORMACION DEL HUMEDAL				
Tipo de sistema	Tipo de subsistema		Tipo de clase	
Lacustre	Permanente		Humedal Emergente	
Tipo de humedal	Ambiente	Tipo	Regimen hidrológico	Fluctuacion estacional del agua
Agua dulce	Continental	Microcuenca de inundación	Temporal	20-45%
Clima	Clima (según Köppen)		Relieve	Tipo de erosion
Tropical	Templado sub-humedo		Planicie	antrópica
Geología		Edafología	Drenaje	Uso del suelo
Terciario y al inicio del Pleistoceno		Andosol y luvisol	Escurrimientos	Agropecuaria-Forestal
Profundidad máxima en lluvia	Profundidad mínima en Lluvias	Profundidad máxima sequía	Profundidad mínima sequía	Flujo
2.5	0.9	0.8	0.2	Lento ( 0.05m/s)
Tipo de vegetacion terrestre	tipo de vegetacion acuatica		comunidades dominantes	
Arbustiva-pino	Emergente, supergida y flotante		<i>Typha dominguensis</i> y <i>T. latifolia</i>	

Este tipo de humedal es permanente y se caracteriza por ser de ecosistemas acuáticos endorreicos, mantenimiento por efecto de escurrimiento, de forma irregular, poco profundo, nivel batimétrico cambiante, muy extendidos, sin estratificación térmica, sin zona afótica, altamente productivos, concentración de oxígeno disuelto de medio a bajo y con altas concentraciones de nutrientes y sólidos disueltos (turbios).

Se trata básicamente de pequeñas microcuencas de cuyo régimen hídrico depende de los ciclos de inundación locales y la permeabilidad del suelo. En el caso del humedal de Pátzcuaro éste depende del ciclo hidrológico el cual se caracteriza por dos hidroperiodos uno de sequía largo con una duración de siete meses y un periodo corto de lluvias de cinco meses, sin embargo a pesar del largo periodo de sequía, debido a que en el humedal se acumula el 94% de los escurrimientos (Figura 6.1), se mantiene una humedad permanente en el ecosistema.



**Figura 6.1.** Patrón de escurrimiento y precipitación en el humedal Sur de Pátzcuaro, Mich.

A partir de los antecedentes y tomando en cuenta que es un área de inundación el ecosistema estudiado se clasifica, jerarquizando sus procesos funcionales y en base a las condiciones hidrológicas, como **un humedal**; considerando además que sus ingresos son por afluentes intermitentes y depende básicamente de aportes de agua de escurrimientos y de afloramientos, se determinó que existe la siguiente relación entre procesos y atributos del humedal: *proceso de escorrentía, con estabilidad permanente con variaciones hidrométricas, en función del régimen de recarga de la cuenca, con una estructura de plantas acuáticas y vegetación hidrófila* (Figura 6.2).

Estos humedales se caracterizan por tener cambios en las concentraciones de sólidos disueltos y suspendidos en función al régimen hidrológico y presencia de materia alóctona en degradación.

Para el cálculo del índice de Aridez se utilizó el Cociente Pluviométrico de Emberger (1930), modificado por Di Castri (1976). Este considera la precipitación anual y temperaturas del mes más frío y el más cálido aplicando la siguiente ecuación:

$$1) Q = (100 * P) / (M_i^2 - m_i^2)$$

Donde:

P = Precipitaciones (mm)

M<sub>i</sub> = Temperaturas mes más cálido (°Kelvin)

m<sub>i</sub> = Temperaturas mes más frío (°Kelvin)

La fórmula anterior se aplicó para un periodo de 23 años donde la temperatura máxima fue de 23.97°C y la mínima de 3.87°C, con una precipitación aportada de 6764.60mm, resultado en un índice de aridez de 59.30, que de acuerdo a la clasificación de aridez se ubica como un ecosistema de humedal **subhúmedo** (Tabla 6.2).



**Figura 6.2.** Imágenes de condiciones ambientales del humedal

**Tabla 6.2.** Definición de clases de aridez

<b>Índice de aridez</b>	<b>Clase</b>
0 a 18	Periárido
18 a 27	Árido
27 a 55	Semiárido
<b>55 a 95</b>	<b>Subhúmedo</b>
95 a 196	Húmedo
196 y más	Perhúmedo

Al mismo tiempo se calculó la frecuencia de precipitaciones y su coeficiente de variación (CV) para su clasificación con la fórmula:

$$2) CV = \frac{S}{\bar{X}}$$

Donde:

S= la desviación estándar

$\bar{X}$ = Promedio

Las clases de variación de la Frecuencia de precipitación son:

Clase 1 = 0 a 0.25;

**Clase 2 = 0.25 a 1;**

Clase 3 = más de 1

Por la ubicación, el humedal se clasifica como **Continental-Escorrentía**, con pendientes mayores a 0.5, permeabilidad alta-media, una aridez subhúmeda y frecuencia de precipitación de **Clase 2**, dado que presenta una frecuencia de precipitación de 0.65 (calculada de fórmula 2).

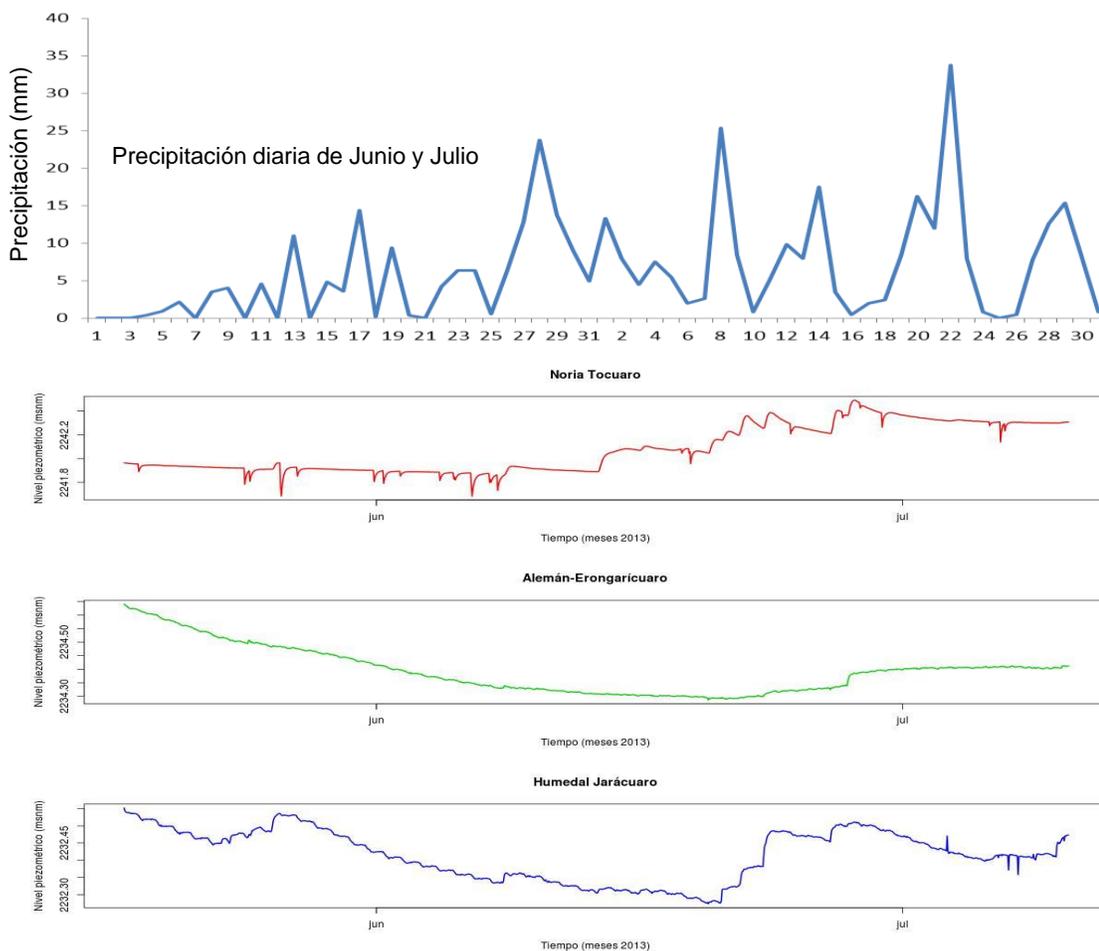
Los humedales lacustres son aquellas zonas cubiertas de agua permanentemente con baja circulación asociados a lagos. El registro del agua normalmente puede tener una duración suficiente para mantener una vegetación hidrófila y permitir el desarrollo de suelos hidromorfos.

El índice de humedales ribereños propuesto por García (2003) utiliza como indicadores los niveles de agua para establecer su función: 1) control de avenidas, 2) recarga de agua subterránea, 3) descarga de agua, 4) origen de cursos superficiales, y 5) fuente de agua a otros sistemas acuáticos.

En cuanto al control de avenidas se tiene que el nivel del agua del humedal no depende de los ríos ya que estos son intermitentes y al igual que el humedal dependen de la dinámica del ciclo hidrológico regional.

En ésta zona se registran avenidas de agua máximas de 10,211.82Mm<sup>3</sup>, con flujo lento de 0.05m/seg. Por lo que se considera que el sustrato puede inundar parcialmente el humedal. La función laminadora de la avenida será mayor como resultado de la semi-permeabilización del sustrato.

En éste humedal existe sustrato permeable que permite la recarga del agua subterránea lo cual se observa en la dinámica del agua sub-superficial del humedal (Figura 6.3), los niveles del piezómetro se elevan con la presencia de la precipitación, indicando una recarga al acuífero del humedal. Así que el humedal es zona de recarga de agua subterránea durante periodos de crecidas y precipitación de la cuenca del lago de Pátzcuaro.



**Figura 6.3.** Nivel de piezómetro y precipitación en el humedal de Pátzcuaro.

La formación de los sistemas de humedales litorales asociado a ecosistemas lacustres está relacionada, tanto con los regímenes de precipitación, como por las características geológicas del territorio. Por lo tanto deben considerarse como ecosistemas o unidades funcionales complejas y que pequeñas modificaciones sobre alguno de esos factores pueden contribuir a su destrucción y/o a cambios irreversibles en su funcionamiento.

Además, desde el punto de vista social y económico, los humedales litorales tienen bastante importancia en el control de avenidas según se pone de manifiesto en International Union for Conservation of Nature (I.U.C.N, 1995). Con el objeto de preservar los humedales, cada vez más en declive principalmente por motivos antrópicos, resulta imprescindible conocer su funcionamiento hidrológico con el detalle suficiente que permita gestionar los recursos hídricos de una zona sin que se perjudique al humedal.

En conclusión el humedal sur de Pátzcuaro se clasifica, de acuerdo a su funcionalidad y estructura, como: *un humedal de área o microcuenca de inundación, de ambiente continental de escurrimientos, de tipo emergente, permanente, con un índice de aridez subhúmedo, frecuencia de precipitación de clase 2, de variedad ribereña y tipo Lacustre, los cuales se caracterizan por estar temporalmente saturados con mezcla de materia orgánica e interacciones dominantes de sustrato y vegetación, y procesos de degradación.*

## 5.2 Estado trófico del humedal

Una vez determinado la funcionalidad y estructura del humedal se debe considerar establecer las condiciones tróficas del mismo. Al igual que su funcionalidad sus propiedades fisicoquímicas dependen de las condiciones climáticas y del uso de la tierra en su entorno inmediato (Sosnovsky & Quirós, 2004).

Los índices ambientales de eutrofia toman en consideración diferentes parámetros fisicoquímicos del agua para determinar el estado trófico de un sistema acuático. Es por ello que se realizaron algunos análisis a los parámetros de calidad del agua y que a continuación se describen.

El coeficiente de variabilidad (CV%) muestra que variables como ortofosfatos y sólidos sedimentables presenta una alta variación anual ( $> 100\%$ ), mientras que alcalinidad total, nitritos, nitratos y fósforo total registran una variación entre 50 a 77.8% (Tabla 6.3). Esta variabilidad se encuentra asociada a la temporada de lluvias y sequía del humedal y se puede considerar que la dureza total (46.56%) y sólidos suspendidos totales (49.22%) con menor variación también pueden ser significante en los procesos físico-químicos del humedal.

Una vez analizado la variabilidad anual de los parámetros fisicoquímicos, se consideraron solo las variables con mayor coeficiente de variación, para determinar en cual temporada del año las variables con alto CV% presenta mayor impacto sobre el humedal. Los resultados indicaron que en la temporada de lluvias domina los promedios de la alcalinidad total (324.2mg/l), la dureza total (271.19mg/l), las concentraciones de fósforo total (559.8 $\mu$ g/l), ortofosfato (185.61  $\mu$ g/l), nitritos (0.11mg/L) y nitratos (6.09mg/L). Mientras que en la temporada de sequía los sólidos sedimentables (2.19ml/l) y los sólidos suspendidos totales (397.2mg/L) son los dominantes (Figura 6.4 y Tabla 6.3).

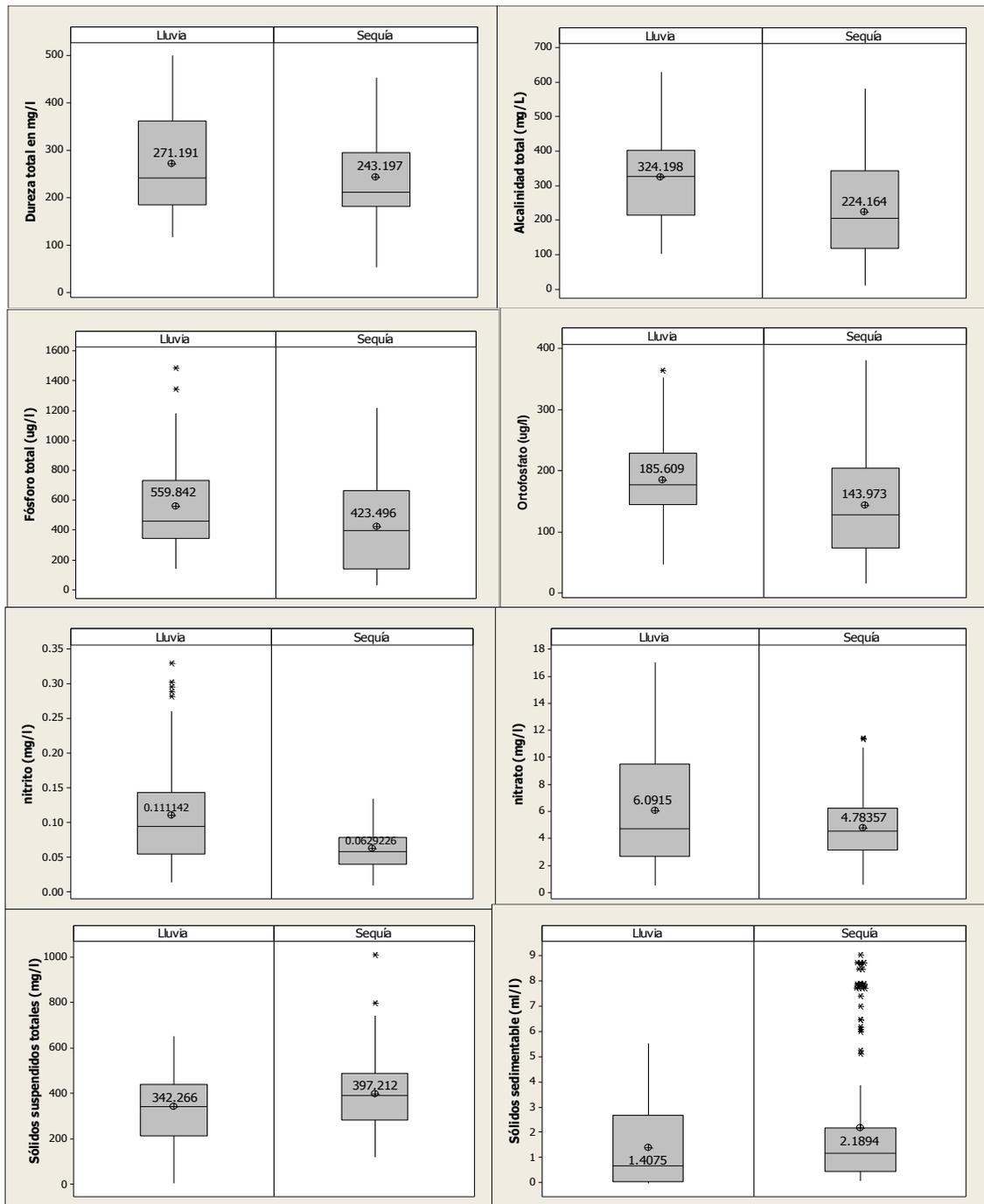
Una vez analizado la tendencia temporal de las variables fisicoquímicas se realizó un análisis de componentes principales para determinar las variables de mayor peso (significancia) para determinar el estado trófico del Humedal sur de Pátzcuaro. El análisis de componentes principales tiene el propósito del obtener un número reducido de combinaciones de las 13 variables incorporadas a éste análisis, como resultados se extraen ocho componentes de los 13 y con ellos se explica el 83.19% acumulado de los procesos físico-químicos del humedal sur de Pátzcuaro (Tabla 6.4).

**Tabla 6.3.** Variabilidad temporal de las características físico-química del humedal.

<b>VARIABLE</b>	<b>PROMEDIO ANUAL</b>	<b>CV (%)</b>
<b>Temperatura del agua (°C)</b>	21.86 ± 3.63	16.62
<b>Conductividad (µS/cm)</b>	1428.8 ± 504.16	35.29
<b>Potencial de Hidrogeno</b>	8.3 ± 0.48	5.78
<b>Alcalinidad total (mg/L)</b>	265.84 ± 143.63	54.03
<b>Dureza total (mg/L)</b>	277.7 ± 120.98	46.56
<b>Oxígeno (mg/L)</b>	5.19 ± 1.92	37.00
<b>Fósforo total (FT) (µg/L)</b>	468.1 ± 361.77	77.28
<b>Ortofosfato (µg/L)</b>	168.7 ± 214.31	120.70
<b>Nitratos (mg/L)</b>	24.3 ± 13.84	56.94
<b>Nitritos (mg/L)</b>	0.1 ± 0.06	60.00
<b>Clorofila a (CHL) (mg/m<sup>3</sup>)</b>	20.8 ± 7.56	36.35
<b>Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)</b>	322.4 ± 158.7	49.22
<b>Sólidos sedimentables (mL/L)</b>	1.86 ± 2.19	117.87

**Tabla 6.4.** Análisis de componentes principales.

<b>No. de Componente</b>	<b>Eigenvalor</b>	<b>Porcentaje de Varianza</b>	<b>Porcentaje Acumulado</b>
1	2.87103	22.085	22.085
2	1.80907	13.916	36.001
3	1.41856	10.912	46.913
4	1.26472	9.729	56.641
5	1.06826	8.217	64.859
6	0.836422	6.434	71.293
7	0.81756	6.289	77.582
8	0.729155	5.609	<b>83.191</b>



**Figura 6.4.** Panel de temporalidad de las concentraciones alcalinidad total, dureza total, fósforo total (FT), ortofosfato (FSR), nitrito, nitrato, sólidos sedimentables y sólidos suspendidos totales.

Las ecuaciones de los componentes principales, donde los valores del primer componente principal tiene la ecuación de las variables en la ecuación se han estandarizado restándoles su media y dividiéndolos entre sus desviaciones estándar, quedando la formula siguiente:

$$3) \quad 0.44 * FT + 0.29 * SRP - 0.08 * Nitrito + 0.30 * Nitrato + 0.23 * T^{\circ}C + 0.12 * OD + 0.43 * CE + 0.25 * Alc - T + 0.43 * DT + 0.08 * TSS + 0.24 * Ssed + 0.19Ch - a$$

Considerando que para determinar la dinámica trófica del humedal se ha dado prioridad a las variables seleccionadas en la fórmula 3, por estas características se consideró aplicar los índices de Carlson quien da peso a FT, CHL y visibilidad, en el caso de los índices de Shannon y Bezzonik, y Dillon y Rigler, se da importancia a los nutrientes (Tabla 6.5).

De acuerdo con los resultados y pesos de significancia de nutrientes, turbidez y productividad primaria se podría considerar que el humedal es *Mesotrófico*, lo cual lo convierte en un ecosistema productivo.

Sin embargo, los valores de visibilidad y transparencia de los índices de Carlson y Shannon & Brezonik lo clasifican como ecosistema *eutrófico*, esto debe a que están relacionados a cambios en la visibilidad asociados con los sólidos suspendidos orgánicos e inorgánicos causado por la erosión de suelo y transporte de materia orgánica alóctona hacia el humedal.

La carga de nutrientes proveniente de las actividades agropecuarias y la urbanización ha cambiado esa situación, en la mayoría de los casos. En grandes zonas del humedal han cambiado gradualmente desde un estado de aguas “claras” hacia aguas “turbias”.

Es factible mencionar que el humedal está clasificado como en un proceso de transición de la mesotrofía a la eutrofia pues los valores de los índices no tienen una clasificación bien definido, sino se presenta una combinación de ambos (Tabla 6.5).

**Tabla 6.5.** Valores de índices de estado trófico calculado para el humedal de Pátzcuaro.

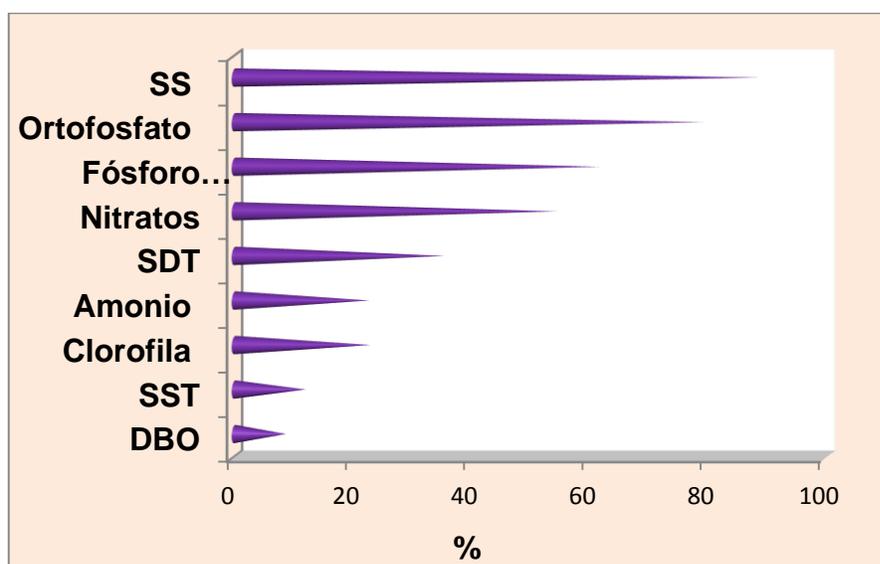
ÍNDICE		Humedal	Clasificación
Carlson	TSI	47.03	MESOTROFICO
	TSD	103.71	EUTROFICO
	TCHI	31.16	MESOTROFICO
	TTP	30.35	MESOTROFICO
Shannon&Brezonik		34.35	EUTROFICO
Dillon&Rigler		0. 80	MESOTROFICO

## 7. Capacidad sortiva

Fue necesario validar estadísticamente las diferencias entre las concentraciones de las variables fisicoquímicas a su ingreso al humedal, con respecto a las concentraciones de las mismas variables a su salida hacia el lago, para certificar la sortividad y depuración del agua por el ecosistema. Sin embargo, es posible darse cuenta de la eficiencia depurativa con tan solo observar los números crudos, como se muestra en la tabla 7.1 y en la figura 7.1 de las variables en agua.

**Tabla 7.1.** Porcentaje de absorción en las diferentes fronteras del humedal.

VARIABLES	TIERRA HUMEDAL	HUMEDAL	HUMEDAL AGUA	RETIENE	% EFICIENCIA TOTAL
Fósforo total (µg/L)	788	327	304	484	61
Ortofosfato (µg/L)	332	107	70	262	79
Nitratos (mg/L)	30	27	14	16	54
Amonio (mg/L)	0.02	0.02	0.01	0.01	23
Clorofila (mg/m <sup>3</sup> )	23	21	18	5	23
SST (mg/L)	495	548	436	59	12
SDT (mg/L)	1023	990	663	361	35
SS (mL/L)	1.26	0.65	0.15	1.12	89



**Figura 7.1.** Absorción (%) de elementos por el humedal Ramsar-Pátzcuaro.

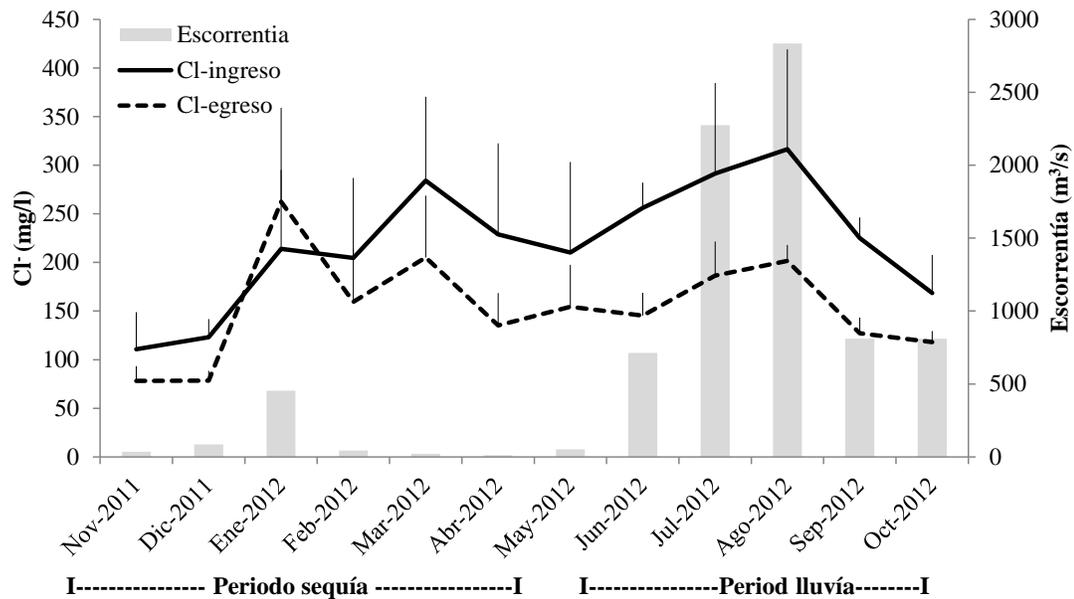
## 7.1 Análisis de sortividad anual

Se obtuvo una escorrentía anual acumulada en el humedal de 7,899m<sup>3</sup>/s, registrándose la mayor cantidad de ésta (7,445m<sup>3</sup>/s) durante la época de lluvia (junio a octubre) y muy poca en la época de sequía (453.8m<sup>3</sup>/s) de noviembre a mayo, el valor máximo se registró en el mes de agosto, 2,835m<sup>3</sup>/s, y el mínimo, 11.4m<sup>3</sup>/s, en el mes de Abril (Figura 7.2).

En cuanto a cloruros un ANOVA con el metodo de Turkey mostró que la escorrentia acumulada y las concentraciones de Cl<sup>-</sup> tanto de ingreso como de egreso no indican diferencia significativa ( $p > 0.05$ ) en todo el año. El análisis del coeficiente de variación (CV) para los cloruros tanto de ingreso como de egreso del humedal indica que es relativamente estrecho (Cl<sup>-</sup>-ingreso (41.04%; n=12) y Cl<sup>-</sup>-egreso (42.13%; n=12)) durante el año (Figura 7.2). Sin embargo, las concentraciones de ingreso presentan un promedio mayor (219.45mg/L) que los Cl<sup>-</sup> de egreso (154.33mg/L) excepto en el mes de enero (cuando se registró una precipitación atípica), indicando una diferencia significativa ( $p = 0.013$ ), acentuándose durante el periodo de lluvia ( $p = 0.014$ ) y no así en la temporada de sequía.

La temperatura en la zona de ingreso fue de 21.26°C y en la zona de egreso fue de 20.67°C con un CV de 20.65% para ambas zonas, lo cual indica una baja variabilidad ( $p = 0.42$ ), por lo tanto no existe una diferencia espacial en el humedal con respecto a esta variable.

La conductividad eléctrica (CE) registró CV bajos tanto, en la zona de ingreso (29.68%) como de egreso (27.28%), con una diferencia significativa en su variabilidad ( $p = 0.01$ ). La CE-ingreso promedio fue mayor (1,489.86µS/cm) que la CE-egreso (1,170.20µS/cm) (Tabla 7.2). El potencial de hidrógeno se encontró en un intervalo de 8.09 a 9.0 con un coeficiente de variación bajo (Tabla 7.2), sin embargo, un análisis de Tukey resalta que existe diferencia significativa en el pH-ingreso y el pH-egreso ( $p = 0.036$ ), siendo éste mayor en la zona de egreso del humedal con un pH de 9.



**Figura 7.2.** Relación entre el escurrimiento y las concentraciones de ingreso y egreso de cloruros en el humedal.

**Tabla 7.2** Variables ambientales de ingreso y egreso al humedal (STD= Desviación estándar; CV= Coeficiente de variación).

VARIABLE	Ingreso					Egreso				
	promedio	STD	Max	Min	CV (%)	Mean	STD	Max	Min	CV (%)
<b>N=72</b>										
Temperatura(°C)	21.26	4.45	32.60	14.00	20.91	20.67	4.27	29.38	10.50	20.65
Potencial de hidrógeno	8.09	0.47	9.70	7.00	5.83	8.25	0.45	9.00	6.93	5.47
Conductividad eléctrica (µS/cm)	1489.86	442.14	2860.00	702.00	29.68	1170.20	319.22	2545.90	672.00	27.28
Cloruro (mg/L)	219.45	90.06	498.50	59.00	41.04	154.33	65.02	434.57	52.85	42.13
Oxígeno disuelto (mg/L)	6.02	2.02	12.00	2.90	33.45	5.21	1.94	9.17	1.30	37.19
Fósforo total (µg/L)	534.30	203.60	1156.00	70.20	38.10	236.20	159.00	1001.00	31.30	67.30
Fósforo reactivo soluble(µg/L)	198.64	80.96	416.80	30.30	40.76	107.58	72.69	409.20	3.79	67.57
Nitrito (mg/L)	0.10	0.07	0.38	0.02	75.41	0.05	0.03	0.16	0.01	52.85
Nitrato (mg/L)	7.81	3.89	24.49	0.03	49.84	3.61	1.64	10.73	0.20	45.49
DBO <sub>5</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	245.60	81.12	483.10	77.82	33.03	211.78	59.31	379.33	77.82	28.00
DQO (mg/L)	944.53	254.30	1498.00	480.00	26.93	969.10	149.40	1200.40	280.00	15.42
Índice de materia orgánica	0.28	0.12	0.61	0.10	42.50	0.22	0.06	0.40	0.09	27.85
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	416.85	144.30	1009.00	10.80	34.63	228.00	108.70	800.00	7.30	47.66

El oxígeno disuelto (OD) en el agua de ingreso presentó un CV=33.45% y el de egreso fue de CV=37.19% reportando una baja variabilidad; y al aplicar el método de Tukey ( $p=0.014$ ) se encontró una diferencia significativa, esto debido a que la concentración máxima del OD-ingreso fue de 12mg/L y el OD-egreso fue de 9.17 mg/L. Al igual que el oxígeno disuelto, la demanda biológica de oxígeno ( $DBO_5$ ) y la demanda química de oxígeno (DQO) presentan CV bajo (Tabla 7.2), por lo que no existe diferencia significativa entre las concentraciones de ingreso al humedal ( $DBO_5=245.60\text{mg/L}$  y  $DQO=944.53 \text{ mg/L}$ ) y las concentraciones de egreso ( $DBO_5=211.78\text{mg/L}$  y  $DQO=969.10\mu\text{g/L}$ ).

Con respecto a los nutrientes, el CV de ingreso para el fósforo total (FT) y fósforo reactivo soluble ( $PO_3^-$ ) fue bajo (38.10% y 40.76% respectivos) comparado con las concentraciones de FT-egreso (CV=67.30%) y  $PO_3^-$ -egreso (67.57%) que fue mucho mayor. Lo anterior resulta en una diferencia significativa ( $p=0.01$ ) entre los promedios de concentración de ingreso de FT (534.30 $\mu\text{g/L}$ ) y  $PO_3^-$  (198.64  $\mu\text{g/L}$ ) y los promedios de concentración de egreso 236.20  $\mu\text{g/L}$  y 107.58  $\mu\text{g/L}$  respectivamente (Tabla 7.2).

Los nitritos ( $NO_2^-$ ) de ingreso presentaron un promedio de 0.10mg/L lo que equivale a 50% más que el promedio a su egreso (0.05mg/L), por lo tanto el coeficiente de variación fue mayor (75.41% y 52.85% para cada uno) que el reportado para los nitratos ( $NO_3^-$ ) de ingreso (49.84%), con un promedio de 7.81mg/L, como de egreso (CV=45.49%) con un promedio de 3.61mg/L. Tanto  $NO_2^-$  y  $NO_3^-$  presentan diferencias significativas entre sus concentraciones de ingreso y egreso ( $p<0.05$ ) (Tabla 7.2).

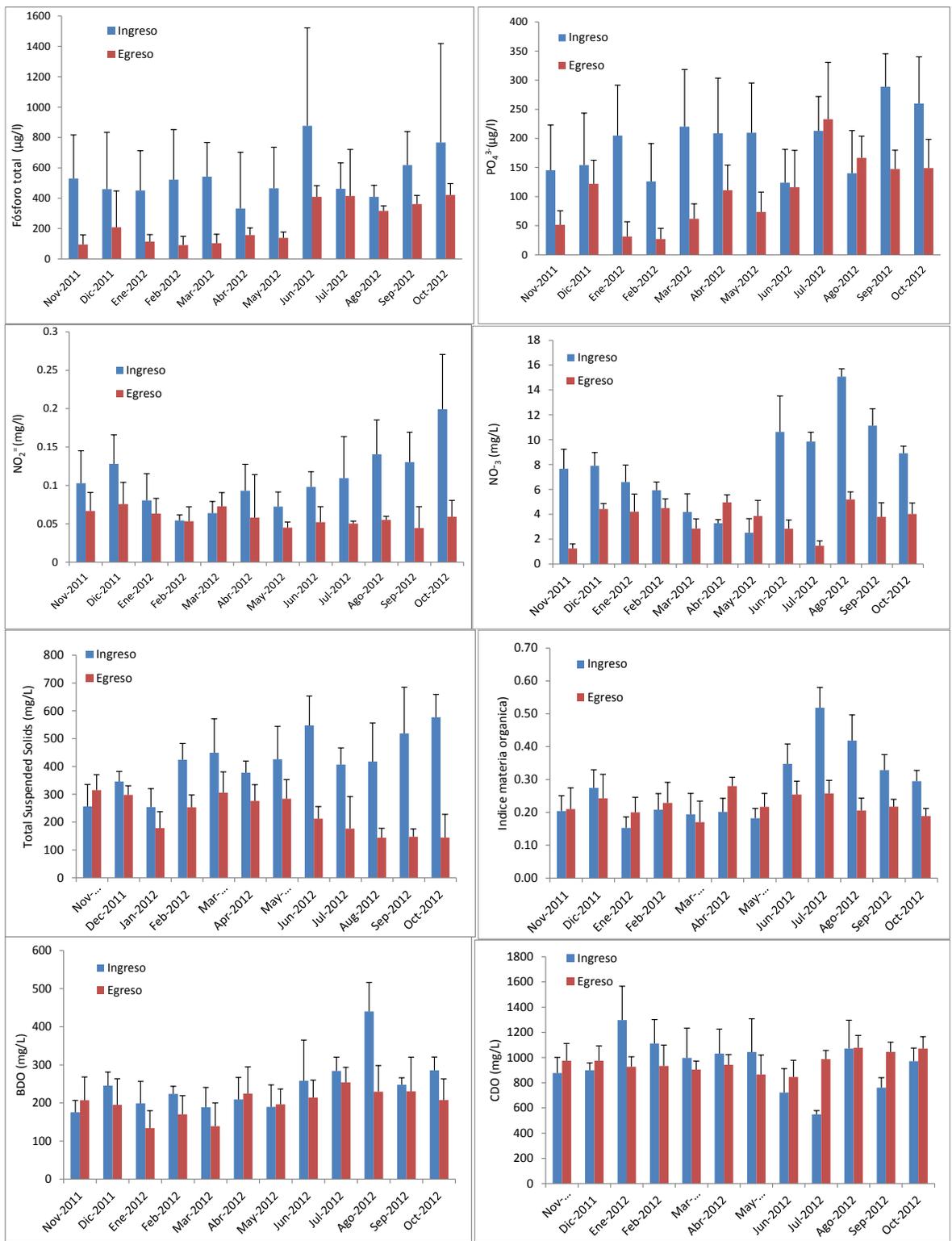
La materia orgánica (MO) presentó un índice promedio de ingreso de 0.28 y un egreso de 0.22. Los sólidos suspendidos (SS) de ingreso tuvieron un valor de 416.85mg/L y de 228mg/L a su egreso. Estos parámetros presentan una variabilidad en sus concentraciones de ingreso de 42.5% y 34.63% respectivamente y de 27.85% y 47.66% para las concentraciones de egreso (Tabla 7.2).

Un análisis más detallado fue realizado a las variables que influyen en mayor medida en el estado trófico del humedal, de acuerdo a lo obtenido en el capítulo anterior, para evaluar su absorción por el ecosistema y los posibles cambios durante el ciclo anual que puedan afectar el estado trófico ya establecido.

Con dicho análisis se obtuvo que el FT presenta menor absorción (42.9%) que el  $\text{PO}_3^-$  (66.5%), sobre todo en el mes de enero (condiciones climáticas atípica en el 2012) en el que este último se incrementa hasta un 82.19%, y el FT solo llegó a 69%. Sin embargo, en el mes de junio se registró un proceso de exportación de  $\text{PO}_3^-$  (-47.98%) hacia el lago y una disminución en la retención del FT (16.77%) (Figura 7.3).

Los nitritos registraron la más alta variabilidad de todas las formas de nutrientes (CV =122.1%), y se mantienen la mayor parte del año por debajo de los nitratos. Excepto en los meses de mayo y octubre, en los que hay una mayor retención de nitritos (48.22% y 66.61% respectivamente), que los reportados para nitratos en los mismos meses (-83.30% y 37.04%). En el mes de Junio ocurrió una exportación de nitratos de hasta -80.83% y los nitritos incrementaron su retención a 49.98% (Figura 7.3).

El contenido de MO y sólidos suspendidos presentan una variabilidad alta (CV=99.9% y CV=99.4%, respectivamente), sin embargo la MO se reporta con sortividades bajas, siendo sus máximos en los meses de julio (17.79%), agosto (21.85%) y octubre (9.54%). Los sólidos suspendidos, a diferencia del índice de MO, son retenidos la mayor parte del año, excepto en el mes de noviembre (-72.41%) en el que fueron exportados, el máximo de retención registrado fue de 63.02% en octubre (Figura 7.3).



**Figura 7.3** Concentraciones de ingreso y egreso de algunas variables físico-químicas en el humedal de Pátzcuaro.

## 7.2 Análisis de sortividad temporal (sequía y lluvia).

Debido a las dos temporalidades climáticas existentes en el humedal, mencionadas en capítulos anteriores, fue necesario establecer la sortividad en cada una de ellas por la diferencia tan marcada en el ingreso de agua y los flujos de la misma acarrean elementos que afectan los parámetros fisicoquímicos y por ende su absorción por el ecosistema.

La temperatura en ambas temporadas tienen un bajo coeficiente de variación, siendo la temperatura de egreso ligeramente variable durante lluvias  $CV=49.62\%$ ; por lo tanto la temperatura no presenta diferencia significativa durante lluvias ( $p=0.47$ ) ni sequía ( $p=0.75$ ).

El potencial de hidrógeno (pH) en las dos temporadas registran un coeficiente de variación muy bajo (Tabla 7.3) y no presenta diferencia significativa durante la temporada de sequía ( $p=0.67$ ); sin embargo, durante la época de lluvia existe una diferencia significativa ( $p=0.014$ ) de acuerdo a un ANOVA con un test de Tukey.

El oxígeno disuelto (OD) reporta la variación más alta en la temporada de lluvia  $49.62\%$  (OD-egreso) con una diferencia significativa de  $p=0.009$ ; en la temporada de sequía, el coeficiente de variación es de  $27.85\%$  (OD-ingreso) y  $27.37\%$  (OD-egreso) con una diferencia no significativa de  $p=0.537$  (Tabla 7.3).

Las concentraciones de FT son mayores en el ingreso  $626.9\mu\text{g/L}$  ( $n=30$ ), durante la temporada de lluvias, que en el egreso. En sequía se encontró el promedio más bajo  $130.01\mu\text{g/L}$  ( $n=42$ ). Esta misma tendencia presenta el  $\text{PO}_3^-$  con un valor de  $215.1\mu\text{g/L}$  ( $n=30$ ) en lluvias y de  $68.42\mu\text{g/L}$  ( $n=42$ ) en sequía, excepto en el mes de julio ( $237.95\mu\text{g/L}$ ) y agosto ( $166.56\mu\text{g/L}$ ) donde se reporta una concentración mayor de  $\text{PO}_3^-$  en el egreso que en el ingreso (Figura 7.4). El FT no rebasa  $50\%$  de variación, registrándose su máximo coeficiente de  $41.50\%$  durante la temporada de sequía, el  $\text{PO}_3^-$  presenta la máxima variación también durante sequías con el  $65.83\%$  (Tabla 7.3), el ANOVA con un test de Tukey indica que FT ( $p=0.001$ ) y  $\text{PO}_3^-$  ( $p=0.007$ ) son significativamente diferentes entre lluvias y sequía.

El coeficiente de variación para nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) tanto en lluvias (ingreso=67.98%, egreso=54.54%), como en sequía (ingreso=42.41% y egreso=60.06%) es mayor que el CV de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) (Tabla 7.3), siendo ambos significativamente diferentes ( $P=0.001$ ) entre lluvias y secas. El ingreso de  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$  fue alto durante el año, sin embargo, los  $\text{NO}_2^-$  presentaron el promedio más alto en sequía (0.68mg/L) y los nitratos en lluvia (9.507mg/L). El egreso de nitritos durante los meses de febrero y marzo (Tabla 7.3) sobrepasa a las concentraciones de ingreso, y los nitratos sobrepasan las concentraciones de egreso con respecto a las de ingreso en los meses de abril (4.96mg/L) y mayo (3.96mg/L) (Figura 7.4).

En el caso de la demanda biológica de oxígeno, demanda química de oxígeno y el contenido de materia orgánica el CV es bajo durante sequía y lluvias como se observa en la tabla 7.3; sin embargo las tres variables registraron una diferencia significativa ( $p=0.001$ ) entre el ingreso y el egreso durante lluvias, no así en el periodo de sequía ( $p=0.77$ , 0.13 y 0.23 respectivamente). En el caso de DBO se presenta una tendencia de concentraciones más altas durante el ingreso que el egreso, el valor más alto fue de 303.2mg/L y se registró en el ingreso, en el egreso el más bajo fue de 208.5 mg/L ambos durante el periodo de lluvia, sin embargo en los meses de noviembre (207mg/L) y abril (224mg/L) las concentraciones de egreso son más altas que el ingreso.

El promedio de DQO de ingreso y egreso no presentan una tendencia definida (Figura 7.4), se puede observar que lo valores máximos se encuentra en la temporada de sequias con valores que van de 968.7 a 1036mg/L, y en lluvias de 815.1 a 969.5mg/L; sin embargo, en la época de sequía la concentración de egreso de los meses de noviembre (975mg/l), diciembre (975 mg/l) y septiembre (1045 mg/l) sobrepasan los valores promedio de ingreso.

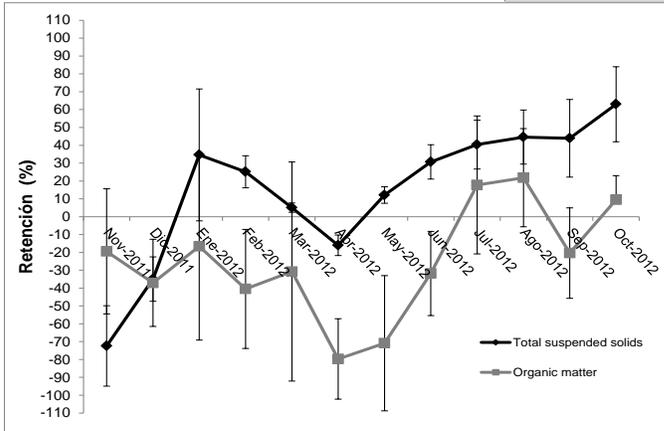
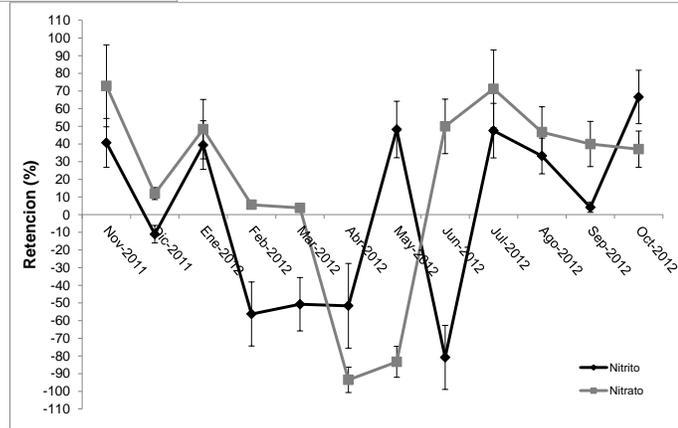
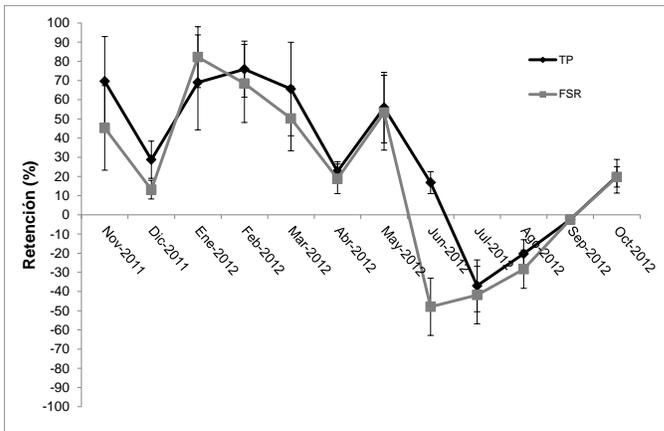


El contenido de MO en el ingreso registró el promedio más alto en la época de lluvias, y en la zona de egreso, para ambas temporadas, el contenido se encuentra en un rango de 0.202 a 0.225. Se puede observar en la figura 7.4 que la de materia orgánica de egreso presenta mayor concentración que el ingreso, excepto en el mes de diciembre donde el ingreso es mayor (0.24) que la concentración de egreso.

Los sólidos suspendidos totales alcanza su máximo CV (43.96%) durante lluvias al egreso del humedal, a pesar de esta baja variación, se reporta una diferencia significativa entre el periodo de lluvia ( $p=0.001$ ) y sequía ( $p=0.001$ ). El registró máximo fue en la época de lluvia al ingreso (493.7mg/L) y el menor registro ocurrió en el egreso de la misma temporada con 165.1mg/L. En sequia el valor de ingreso y egreso fueron de 362mg/L a 272.9 mg/L respectivamente. Los TSS presentan una tendencia de incremento en las concentraciones de ingreso que las de egreso, excepto en noviembre en donde el egreso (314.80mg/L) sobrepasa la concentración del ingreso (Tabla 7.3 y Figura 7.4).

Fue realizada una correlación de Spearman para evaluar la relación entre las variables ambientales y concentración de nutrientes con el porcentaje de retención en el humedal. Las correlaciones más fuertes encontradas fueron entre la retención de FT con el contenido de Materia Orgánica (-0.66), la concentración de nitrato,  $PO_3^-$ , y BDO seguido de la concentración de FT y DQO las cuales fueron de valores negativos; mientras que para la retención de  $PO_3^-$  la asociación significativas encontradas, aunque también negativas, fueron con MO (-0.70), DBO, DQO, nitratos, TP y  $PO_3^-$ . (Tabla 7.4)

El  $NO_2$  registró una ligera correlación negativa con la temperatura (-0.43) únicamente. A diferencia de las asociaciones anteriores, los  $NO_3^-$  mostraron una asociación positiva con la concentración de nitratos (0.54) y FT. Mientras que el índice de MO no registro correlación directa con alguna variable. Finalmente la retención de TSS presento una asociación positiva con FT (0.58) y nitratos, sin embargo, con la temperatura la correlación fue negativa (-0.54) (Tabla 7.4)



**Figura 7.4** Relación entre los porcentajes de retención de ingreso y egreso de fósforo total ortofosfato, nitritos, nitratos, materia orgánica y solidos suspendidos totales.

**Tabla 7.4** Correlación de Spearman entre los porcentajes de retención con las variables ambientales y nutrientes.

n=72	TP %R	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> %R	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> %R	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> %R	OM %R	TSS %R
<i>CORRELACION DE SPEARMAN</i>	r <sub>s</sub>	r <sub>s</sub>	r <sub>s</sub>	r <sub>s</sub>	r <sub>s</sub>	r <sub>s</sub>
Temperatura (°C)	0.36**	0.27*	-0.43**	-0.39**	-0.37**	-0.54**
pH	0.15	0.05	-0.25*	-0.11	-0.06	-0.11
Conductividad eléctrica (µS cm <sup>-1</sup> )	-0.23*	-0.16	-0.03	0.01	0.05	0.34**
Cl <sup>-</sup> (mg l <sup>-1</sup> )	-0.23*	-0.16	-0.03	0.01	0.05	0.34**
DO(mg l <sup>-1</sup> )	0.19	0.22	0.29**	0.10	0.20	0.04
TP (µg l <sup>-1</sup> )	-0.43**	-0.51**	0.06	0.46**	0.28**	0.58**
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (µg l <sup>-1</sup> )	-0.57**	-0.47**	0.26**	0.12	0.15	0.27*
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg l <sup>-1</sup> )	-0.23*	-0.22	0.31**	0.38**	0.29**	0.25*
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg l <sup>-1</sup> )	-0.61**	-0.56**	0.10	0.54**	0.33**	0.56**
BOD <sub>5</sub> (mg m <sup>3</sup> )	-0.58**	-0.57**	0.06	0.23*	0.30**	0.36**
COD (mg l <sup>-1</sup> )	0.43**	-0.56**	0.09	-0.37**	-0.09	-0.14
Índice de materia orgánica	-0.66**	-0.70**	0.00	0.36**	0.31**	0.38**
Sólidos suspendidos totales (mg l <sup>-1</sup> )	0.01	-0.06	-0.27*	-0.30**	-0.27*	0.02

Finalmente se realizó el análisis con los porcentajes de retención de las variables que influyen en el estado trófico. Se observó que durante la época de sequía se obtuvo una mayor retención (R) para FT (fósforo total) y PO<sub>3</sub><sup>-</sup> (fósforo reactivo soluble) con valores de 55.32% y de 47.32% respectivamente. Lo anterior, resulta en una retención neta del 48.64% de FT y 44.09% de PO<sub>3</sub><sup>-</sup>, mientras que la exportación de éstos nutrientes hacia el lago resulto de -19.93% para FT, y de -32.63% para PO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Tabla 7.5).

Los nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) registraron una exportación total de -1.11% en el año y los nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) una absorción de 24.26%, con el máximo en la época de lluvia para ambos (14.14% y 48.99%), el %R fue menor (NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (40.97%) y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (39.64%)) que el porcentaje de exportación que se reporta para cada uno de ellos (-56.77% y -127.7%).

La de materia orgánica (MO) presentó exportación de -25.50%, mientras que los sólidos suspendidos (SS) fueron retenidos un 18.63%; el porcentaje de retención de la MO fue mayor en la época de sequía que en la época de lluvias y en el caso de los SS resulto contrario, la mayor retención se presentó durante la época de lluvia (44.52%) (Tabla 7.5).

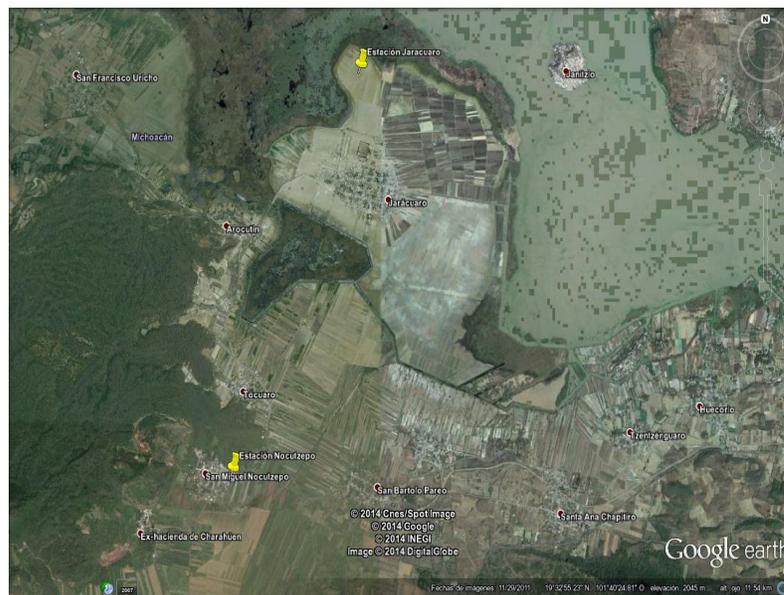
**Tabla 7.5.** Porcentaje de retención y exportación de nutrientes (N y P), materia orgánica y sólidos suspendidos en el año y en los periodos de sequía y lluvia.

VARIABLE	TOTAL		Periodo de sequía		Periodo de lluvia		Retención (R)		Exportación	
	n=72		n=30		n=42		n=72		n=72	
	R (%)	Error Estándar	R (%)	Error Estándar	R (%)	Error Estándar	R (%)	Error Estándar	R (%)	Error Estándar
Fósforo total (µg/L)	31.50	38.94	55.32	23.43	-4.59	26.27	48.64 (n=54)	27.28	-19.93 (n=18)	16.72
Fósforo soluble reactivo (µg/L)	19.19	43.37	47.32	27.63	-20.18	27.79	44.09 (n=47)	27.59	-32.63 (n=25)	25.47
Nitrito (mg/L)	-1.11	58.34	-5.60	71.30	14.14	47.32	40.97 (n=41)	20.82	-56.77 (n=31)	43.07
Nitrato ((mg/L)	24.26	59.58	-16.10	18.88	48.99	79.30	39.64 (n=61)	27.45	-127.70 (n=11)	44.70
Índice de materia orgánica	-25.50	57.03	42.13	18.96	-0.60	56.47	24.10 (n=27)	18.56	-55.26 (n=45)	51.28
Sólidos suspendidos Totales (mg/L)	18.63	35.21	-6.63	33.22	44.52	18.96	33.17 (n=55)	23.52	-28.41 (n=17)	23.61

## 8. Flujo de agua

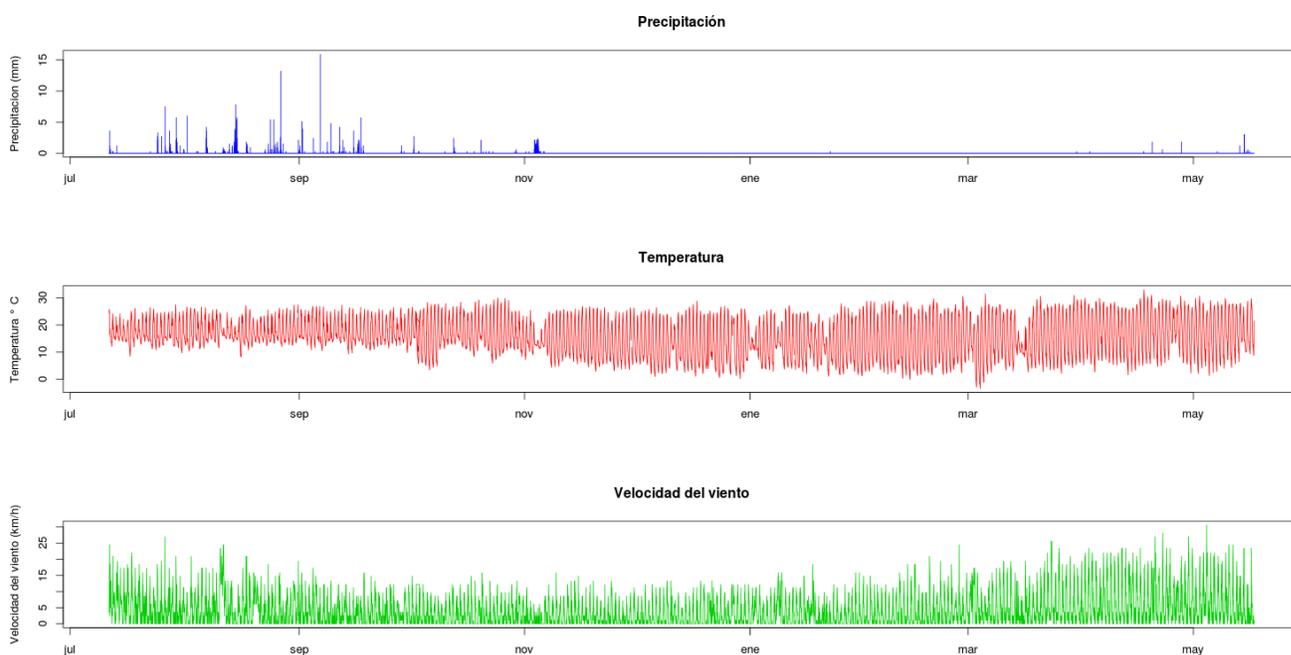
Para determinar el flujo bidimensional de agua que ingresa al humedal fue necesario, además de la instalación de piezómetros subsuperficiales semiautomatizados, el registro de las variables meteorológicas más localmente, es decir en el humedal tal cual. Para tal efecto se instalaron dos estaciones meteorológicas con las que se obtuvieron series de tiempo; la primera dentro del humedal (Jarácuaro) con coordenadas  $19^{\circ}34'20.3''$  N,  $101^{\circ}40'44.3''$  W y la segunda en la parte sur, fuera del humedal en un área segura y resguardada (Nocutzepo)  $19^{\circ}34'46.5''$  N,  $101^{\circ}41'43.3''$  W. La Figura 8.1, muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas automáticas.

Los registros de la estación del humedal abarcan del 11/07/2012 al 17/05/2013, mientras que los de la estación de Nocutzepo abarcan 01/01/2012 al 31/12/2013. La estación del humedal tuvo que ser retirada debido a daños por vandalismo ocurridos entre el 17/05/2013 y 30/08/2013.



**Figura 8.1.** Estaciones meteorológicas instaladas (marcadores amarillos). El marcador norte corresponde a la estación del humedal (Jarácuaro). El marcador sur corresponde a la estación fuera del humedal (Nocutzepo)

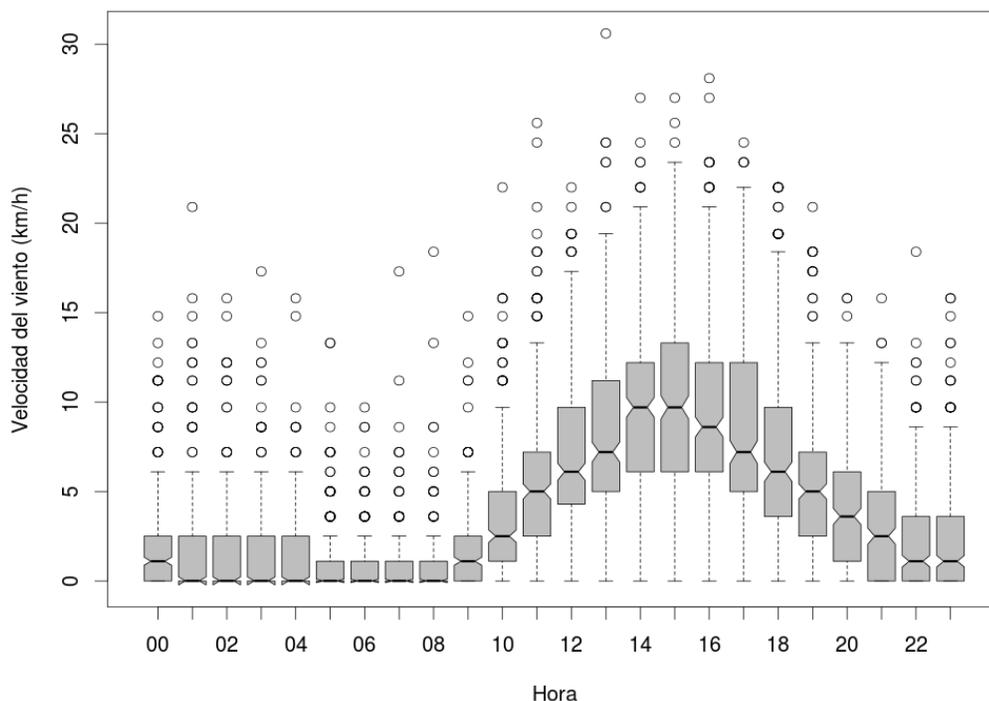
La figura 8.2 muestra las series de tiempo para la estación del humedal (11/07/2012 al 17/05/2013). Puede observarse claramente la época de lluvias entre julio y principios de noviembre (2012) y la época seca entre mediados de noviembre y mediados de mayo (2013), aunque se presentan eventos aislados de precipitación a partir de finales de abril (2013). En cuanto a la temperatura puede observarse un cambio importante en la oscilación de la temperatura en periodos específicos que coinciden con eventos de precipitación de tipo ciclónico (varios días consecutivos). Por ejemplo a principios de noviembre de (2012). Además puede observarse el cambio estacional en la oscilación térmica diaria. Durante los meses de verano se ubica entre 8 y 15 ° C, mientras que en invierno (enero 2013) oscila entre 12 y 21 ° C y para la época seca entre 15 y 25 ° C (abril 2013).



**Figura 8.2.** Series de tiempo de variables climáticas para la estación del humedal (11/07/2012 al 17/05/2013).

La velocidad del viento, oscila entre 0.0 (condiciones sin viento) y 30.6 km/h, con un promedio de  $4.21 \pm 4.9$  km/h. La velocidad del viento muestra un claro patrón estacional, con un promedio de  $3.6 \pm 5.0$  km/h durante la época lluviosa (julio-agosto 2012). La velocidad del viento decrece durante la temporada seca y fría en invierno (diciembre-enero) con promedio de  $3.19 \pm 3.72$  km/h, para posteriormente incrementar durante la época seca y caliente en primavera (abril-mayo) alcanzando un promedio de  $6.8 \pm 6.5$  km/h.

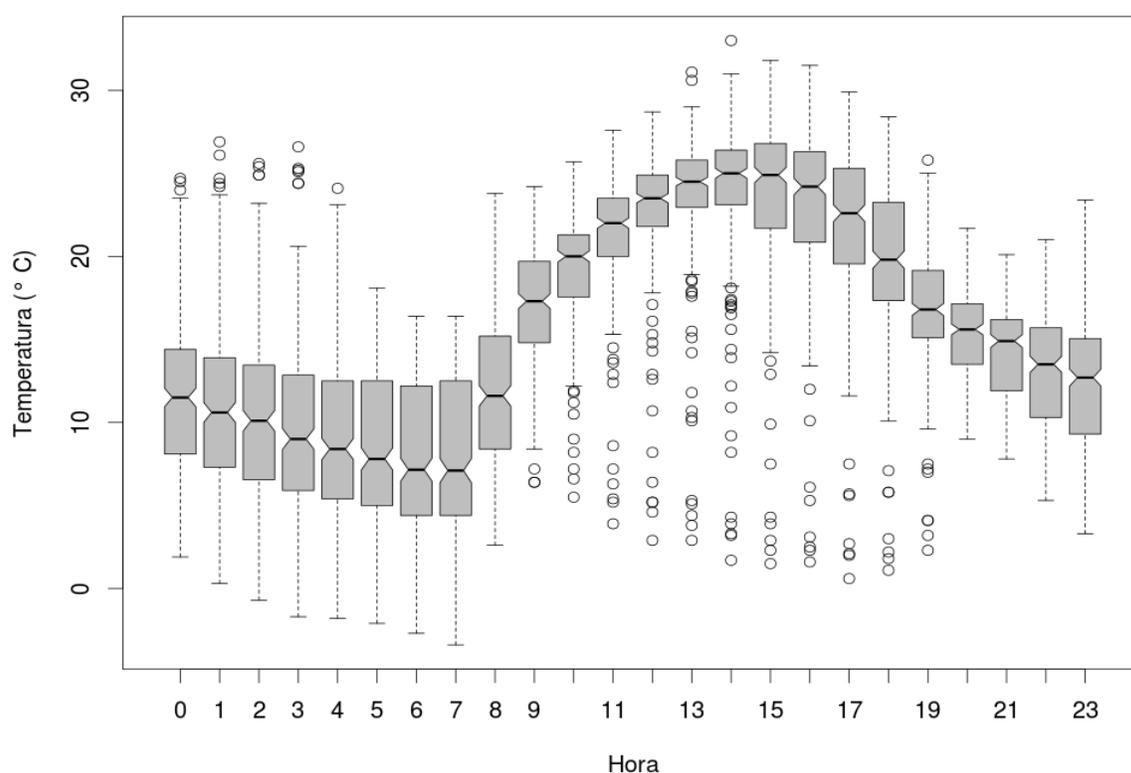
El viento muestra además un claro patrón diario (Figura 8.3). La velocidad del viento tiene su mínimo durante la noche y temprano por la mañana, entre las 5:00 y las 8:00 con una velocidad promedio de  $0.98 \pm 1.81$  km/h, a partir de las 9:00 se presenta viento, en forma de brisa con velocidad promedio de  $1.68 \pm 2.31$  km/h. Entre las 10:00 y las 15:00 horas la velocidad del viento incrementa hasta los valores máximos diarios entre las 15:00 y 16:00 horas con promedio de  $9.81 \pm 5.47$  km/h. A partir de las 16:00 la temperatura decrece rápidamente por la tarde hasta la puesta del sol (16:00 a 20:00), hasta llegar a un promedio de  $3.73 \pm 3.29$  km/h.



**Figura 8.3.** Patrón diario de velocidad de viento para la estación del humedal.

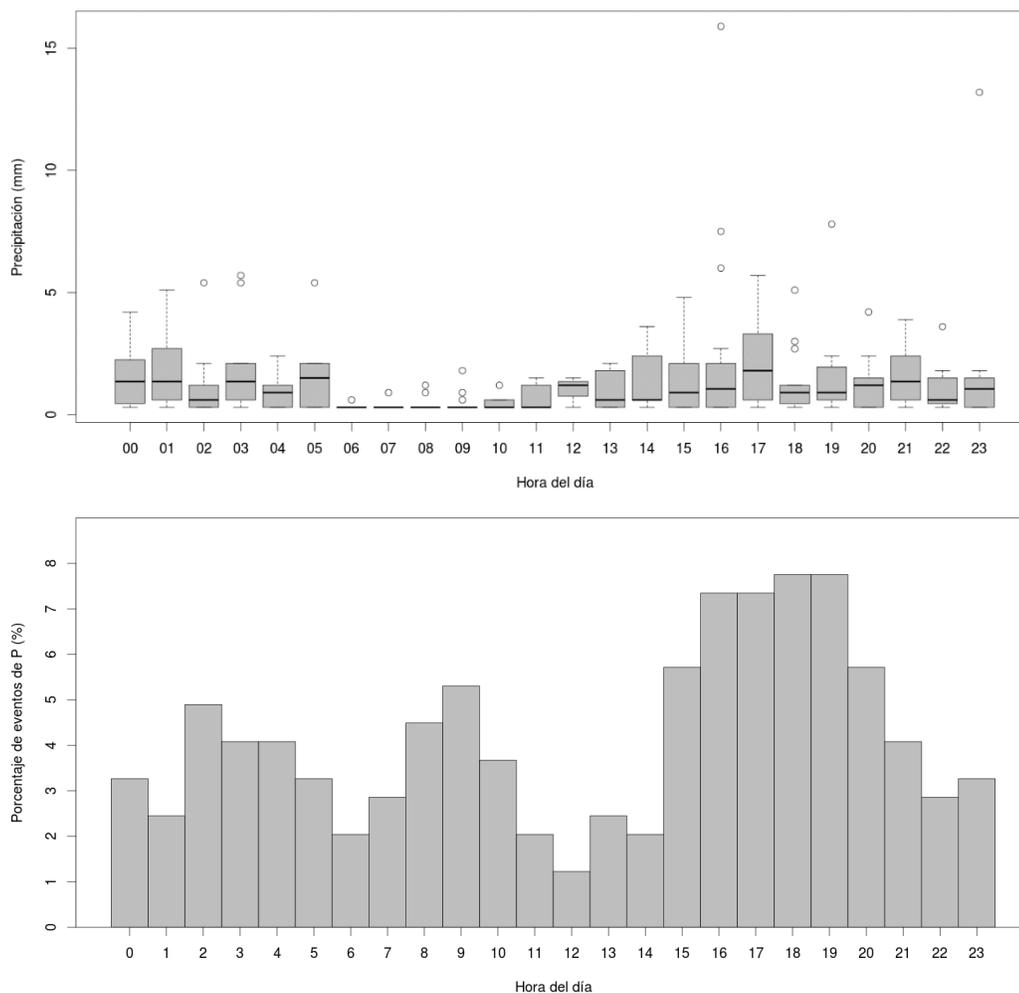
La variación diaria de la velocidad de viento está relacionada con el patrón de temperatura diaria. En la figura 8.4 se aprecia como los valores mínimos se alcanzan entre las 6:00 y las 7:00 horas (promedio  $8.0 \pm 4.4$  °C). Posteriormente la temperatura se incrementa a partir de las 8:00 alcanzando su máximo promedio a la 14:00 (promedio  $23.9 \pm 4.5$  °C) horas para posteriormente decrecer hasta alcanzar la temperatura más baja temprano por la mañana.

La coincidencia de los patrones diarios de viento y de temperatura indican que el viento tiene un origen local y se debe a procesos de desplazamiento de aire de la superficie del suelo por diferencia de temperatura y densidad asociados al calentamiento del aire justo en la interfaz entre atmósfera-tierra sólida y atmósfera-agua.



**Figura 8.4.** Variación diaria de la temperatura del aire en el humedal (estación del humedal).

La precipitación acumulada del periodo de registro fue de 332.7 mm. La mayor parte de la precipitación ocurrió en la época húmeda entre julio y noviembre. Se registraron eventos invernales en enero y también en primavera (abril y mayo). En cuanto a la variación diurna, la precipitación la figura 8.5 presenta tanto la variación en lámina como proporción de eventos. Puede observarse que la menor proporción de precipitación ocurre durante dos horas antes del mediodía y dos horas después de este (11:00 – 14:00). La mayor parte de los eventos de precipitación se presentan entre las 15:00 y 21:00 horas. Sin embargo, las mayores láminas de precipitación se presentan a las 17:00



**Figura 8.5.** Gráficas de hora del día y lámina de precipitación (superior) y hora del día y porcentaje de eventos de precipitación (inferior).

Se estructuró una serie de nivel de agua piezométrica que abarca del 18/05/2013 al 29/05/2014 abarcando 376.04 días.

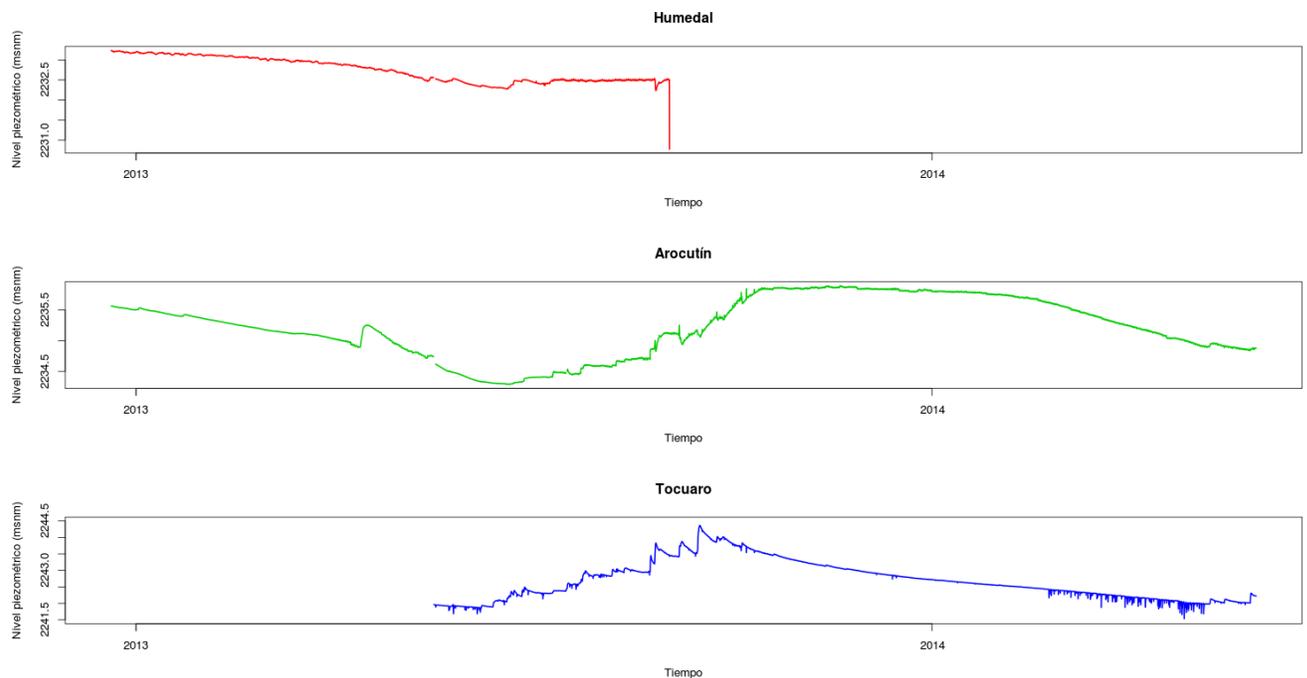
Los piezómetros monitoreados se tienen las siguientes coordenadas:

Pozo Tócuaro; 19° 32' 23.26"N, 101°41'32.19" W

Tubo Arocutín: 19°33'41.7" N, 101°42'13.33" W

Tubo Humedal: 19°34'26.42" N, 101°40'59.21" W.

La figura 8.6 muestra el comportamiento de las series piezométricas registradas. La serie del humedal abarca del 20 de diciembre de 2012 al 02 de septiembre de 2013. Mientras que el piezómetro instalado en el freático en Arocutín abarca del 20 de diciembre de 2012 al 29 de mayo de 2014. Finalmente el piezómetro instalado en el pozo Tócuaro comprende del 17 de mayo de 2013 al 29 de mayo de 2014.

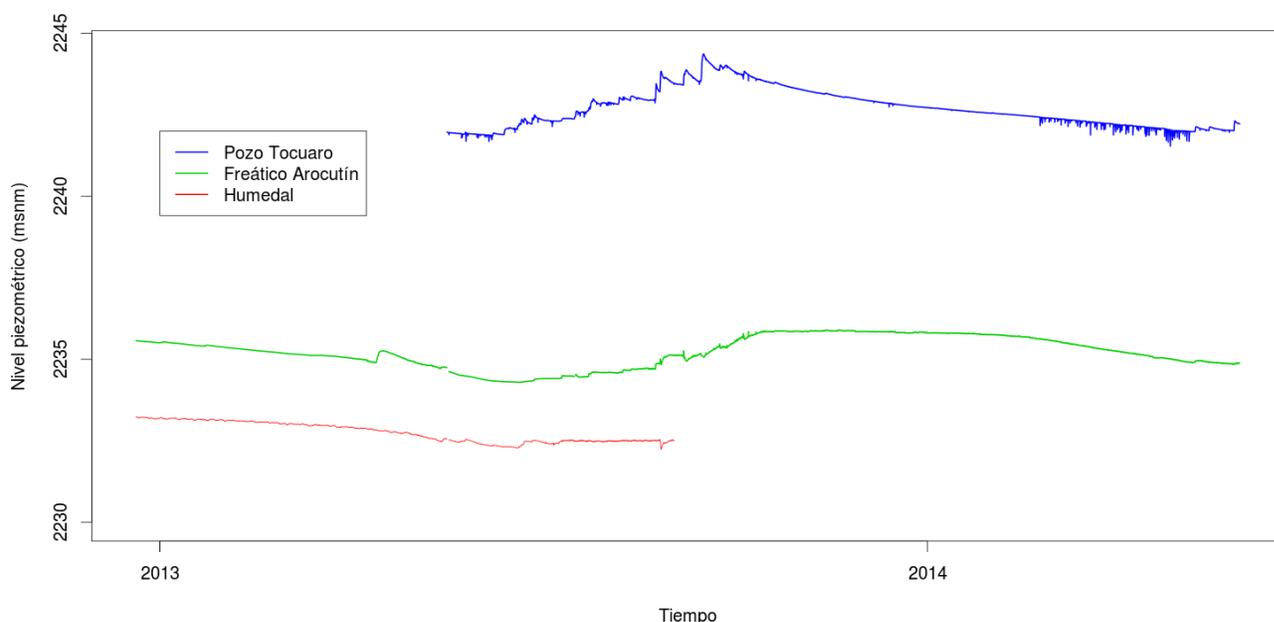


**Figura 8.6.** Series de tiempo de los piezómetros instalados en el humedal, freático en Arocutín y el pozo de Tócuaro. Se presentan los niveles piezométricos correspondientes en metros sobre nivel del mar.

La elevación promedio del nivel piezométrico para el pozo Tócuaro se encontró todo el tiempo por debajo del nivel de la superficie topográfica y fue de 2242.68 msnm con máximo y mínimo de 2241.536 y 2244.365 msnm. El nivel piezométrico presentó una variación total de 2.83 m entre los niveles más bajos y más altos de la serie. En la Figura 8.7 puede apreciarse la elevación absoluta de los niveles piezométricos monitoreados en el proyecto. La diferencia entre el nivel promedio del humedal y el pozo Tócuaro fue de 9.93 m.

El freático de Arocutín se encontró también por debajo de la superficie topográfica y osciló entre 2234.286 y 2235.898 msnm. Es decir, 1.612 m, mientras que el nivel promedio se ubicó en 2235.223 msnm. La diferencia entre el nivel promedio del pozo Tócuaro y del freático Arocutín fue de 7.457 m.

En el caso del humedal, los registros indican que oscila entre 2230.772 y 2233.239 msnm, es decir 2.467 m entre el punto más bajo y más alto. Cabe mencionar que en el caso del humedal, el espejo de agua sobresale de la superficie topográfica entre los meses de julio y enero.



**Figura 8.7.** Comparación entre los niveles piezométricos para el pozo Tócuaro, el freático Arocutín y el humedal del lago de Pátzcuaro.

Los niveles piezométricos confirman la presencia de flujo subsuperficial originado en la parte sur de la cuenca, muy probablemente en el derrame de lavas conocido como malpaís de Arocutín. La Figura 8.8 ilustra este concepto.

El agua de lluvia se infiltra rápidamente en el derrame de lava del malpaís de Arocutín y fluye subsuperficialmente hacia el humedal. La variación de los niveles piezométricos en el pozo Tócuaro (Figuras 8.6 y 8.7) indican que la respuesta del acuífero abierto a los eventos de precipitación es muy rápida. La estructura de la serie de tiempo indica la ocurrencia de incrementos abruptos de nivel, así como la ocurrencia de extracción de agua del pozo monitoreado, principalmente durante la época de estiaje; entre marzo y mayo de 2014.

Sin embargo, la forma del miembro de recesión del hidrograma indica que la extracción de agua de dicho pozo no afecta significativamente el flujo subsuperficial hacia el humedal. Es importante procesar los datos de bombeo para poder hacer una estimación de la conductividad del acuífero. Los datos piezométricos confirman la presencia de flujo subsuperficial proveniente de la parte sur de la cuenca que abastece al humedal.



**Figura 8.8.** Ubicación de los sitios de monitoreo piezométrico y dirección del flujo subsuperficial.

## 9. Manejo del humedal

El plan de manejo de un área particular tiene como objetivo principal la rehabilitación de un ecosistema que se encuentra en un estado funcional inestable mediante acciones que permitan su transformación en un estado funcional de alta estabilidad. Un ecosistema funcional se caracteriza por sostener procesos naturales autosuficientes y permanentes, además de asociarse con eficiencia entre sus diferentes componentes (Ksuffman et al. 1997).

Las dos causas principales que ocasionan el deterioro de un ecosistema acuático son principalmente las diferentes actividades productivas que incorporan tanto el aprovechamiento del agua como del suelo. La cuenca de captación es afectada por las prácticas de uso del suelo en donde las actividades forestales, la agricultura y el pastoreo son incompatibles y destructivas, mientras que en el uso del agua la desviación de los tributarios, el vertido de aguas de desecho, además del azolve aceleran la degradación del hábitat acuático.

Por lo anterior, es de fundamental importancia la generación de criterios que permitan mantener los sistemas acuáticos en un estado lo mayor saludable posible, así como definir estrategias eficientes que permitan una restauración ecológica para el mantenimiento de la biodiversidad y productividad acuática.

En Pátzcuaro se ha venido luchando por reforestar la cuenca, desazolvar en etapas anuales y de conglomerar la terracería en las zonas medias de la cuenca. Aún se cuenta con alguna reserva de pinos y oyameles, sin embargo, la tala inmoderada de bosques, la pesca exacerbada y la alta tasa de crecimiento demográfico son fenómenos comunes en el deterioro de los ecosistemas de la cuenca del lago de Pátzcuaro, incluido el humedal, ello aunado a bajos niveles de ingreso percibidos por sus habitantes, el uso de técnicas inadecuadas para la preservación de las especies y el incremento de la demanda de productos comerciales de la región, ha originado mayores niveles de degradación de los recursos con los que se cuentan en la cuenca.

Se presume que un 70 % de los recursos de la cuenca se encuentran en graves condiciones de degradación y de falta de bienestar social, convirtiéndose en un círculo vicioso que amenaza con una importante descomposición social y un mayor deterioro del ecosistema.

Por varios años el lago de Pátzcuaro y su cuenca han mantenido programas permanentes de recuperación. Por lo tanto, el propósito del presente estudio es la generación de criterios que permitan la restauración ecológica y el manejo de humedal, para beneficio del lago y de la región. Ante este reto, se requiere de planificar y programar el desarrollo sustentable a partir de la caracterización diagnóstica del área y atendiendo a lo establecido en la normatividad ambiental. Sin embargo, este capítulo sólo está enfocado a diseñar alternativas para el humedal.

Los ecosistemas acuáticos presentan estadíos evolutivos sucesivos: oligotrofia, mesotrofia, eutrofización específica e hipertrofización, de acuerdo al índice de productividad natural de la condición de nutrientes. En este estudio el humedal fue determinado como en un proceso de evolución de mesotrofia a eutrofia, dado que los procesos directos de desecamiento, la extracción de agua que alimenta al humedal, la deforestación, las actividades agrícolas, el uso de fertilizantes en las tierras aledañas y muchos otros cambios, han propiciado el acarreo de nutrientes y sedimentos. Ello ha acelerado la productividad natural y los cambios en el perfil morfobatimétrico de la zona sur. Razón por la cual se ha acelerado el proceso de eutrofización, debido a la falta de medidas prontas y adecuadas para contener este efecto.

Pátzcuaro posee aún una actividad pesquera heredada por la cultura Purépecha que aporta los conocimientos sobre el instrumental, ya sea original o adaptado, aunque la riqueza pesquera ha venido disminuyendo.

Las técnicas más utilizadas en la pesca eran tsikiata, cherémekua (red agallera), parákatecha y uarokua keri (chinchorro). En lo que a especies acuáticas se refiere, antes de los 80s existían el pescado blanco, el charal, el huerepo, el charal rayado, el chehua, el tirhú, el choromu y el panza azul. Y ya para mediados de los 80s con la introducción

de 4 especies distintas al hábitat del lago se originó una alteración en el ecosistema y se afectó la diversidad de la fauna nativa, quedando solamente el pez blanco, el huerepo, la trucha, la acúmara.

En 1982 se capturaron en Pátzcuaro 120 toneladas de pez blanco, en 2000 la captura total alcanzó con mucho esfuerzo las 8 toneladas y para el año 2010 apenas si se capturaron 2 toneladas. Se estima una pérdida económica anual superior a los 3 millones de dólares que afecta a una comunidad de 1500 pescadores y sus industrias anexas. En el caso del lago de Pátzcuaro, uno de los lagos mexicanos con mayor diversidad de peces, la extinción de especies nativas es cada vez más evidente y la necesidad de crear alternativas de producción es cada vez más apremiante.

La captura de especies nativas ha disminuido considerablemente en un periodo de 30 años debido principalmente al deterioro ambiental, manejo inadecuado de la pesquería incluyendo la sobrepesca y la introducción de especies exóticas.

En materia de legislación ambiental los instrumentos jurídicos que más se han utilizado para la gestión ambiental son el ordenamiento ecológico, la evaluación de impacto ambiental, el estudio de riesgo y la declaratoria de área natural protegida. Ello ha permitido de alguna manera replantear el nuevo modelo de desarrollo con protección ambiental.

La preservación y explotación sustentable de los recursos naturales ocupa un lugar preponderante en la actualidad. Por ello se ha tratado de compatibilizar la promoción del crecimiento económico con la protección del entorno ecológico, a través del establecimiento de un marco jurídico, normativo e institucional que impulse la adopción de prácticas productivas basadas en el aprovechamiento racional y responsable de los recursos naturales y en la protección del medio ambiente.

El objetivo de este capítulo es definir y proponer las estrategias, acciones y medidas que garanticen la preservación y restauración del humedal RAMSAR Sur del Lago de Pátzcuaro. Cabe señalar que este capítulo, también se encuentra incluido en el Manual de Humedal Ribereño que se elaboró como parte de este Proyecto.

## **9.1 Organización**

Es de fundamental importancia la creación de un Consejo Técnico Local. En este espacio es requisito que exista la participación social en donde la corresponsabilidad sea un elemento estructural para la toma de decisiones. Este Consejo deberá de ser integrado en una jerarquía horizontal por representantes de:

- a) H. Ayuntamientos.
- b) Organizaciones sociales y productivas más representativas y participativas.
- c) Usuarios.
- d) Representantes de las principales Universidades y Centros de Investigación.
- e) Representantes de Instituciones del Gobierno Federal incluyendo CNA, SAGARPA, SEDESOL, SEMARNAT, SEP, INAH, CONAFOR, SECTUR y CONACULTA.
- f) Representantes de las Instituciones del Gobierno Estatal incluyendo COMPESCA, SUMA, la Secretaría de Educación en el Estado, así como Secretaria de Desarrollo Social.
- g) Organizaciones no gubernamentales que se distingan por su firme compromiso de participar en la restauración de la zona.

Cabe señalar que actualmente en la región se cuenta con la *Comisión de Cuenca del Lago de Pátzcuaro*, que al igual que los Consejos de Cuenca, son órganos colegiados de integración mixta y no están subordinados a la Comisión Nacional del Agua o a los Organismos de Cuenca, (párrafo segundo del inciso D del Artículo 13 BIS 1 de la Ley de Aguas Nacionales). Sin embargo, las Comisiones de Cuenca son órganos auxiliares y subordinados de los Consejos de Cuenca, que se constituyen con carácter temporal o permanente, al nivel de subcuenca y unidades hidrológicas de menor orden, respectivamente; es decir, en territorios de menor tamaño que el de la cuenca, pero que forman parte de su área tributaria de drenaje. Se forman para la atención de problemas que por su gravedad o complejidad requieren de acciones específicas o especializadas. (Artículo 34 de las Reglas de Organización y Funcionamiento de los Consejos de Cuenca). Aunque abarca toda la cuenca del lago de Pátzcuaro, se encuentra subordinada al Consejo de Cuenca del Lerma-Santiago, y sus acciones están inclinadas a los sitios de mayor concentración de población; por lo que resulta trascendente la formación de un Consejo Técnico Local del humedal de Pátzcuaro, que fuese el responsable de ésta unidad ambiental tan importante de la región y no dudando de que pudiera formar parte de la Comisión de Cuenca ya existente para fortalecer la atención a esta zona que se encuentra poco atendida en todos sus sectores.

De acuerdo al artículo 21 la Federación y el estado diseñarán, desarrollarán y aplicarán instrumentos económicos para cumplir con los objetivos del programa de manejo de la una zona o región, en busca de promover el cambio en la conducta de la población de tal manera que se desarrollen actividades que sean compatibles con las características del territorio, otorgando incentivos a quienes realicen acciones de protección, conservación y restauración ambiental.

En este espacio de decisión se reunirán los representantes debidamente acreditados y con capacidad de decisión por parte de su representado con el objeto de planear, analizar, aprobar, evaluar y dar seguimiento a la totalidad de los proyectos productivos y de manejo de la zona (Figura 9.1). La consolidación y reconocimiento legal de este Consejo permitirá que esta instancia pueda gestionar recursos económicos en el extranjero o en el territorio nacional para el manejo sustentable área.



**Figura 9.1.** Estructura de organización

Para actuar bajo un marco legal de participación el Comité Técnico local deberá de ser aprobado por el C. Gobernador del Estado, posteriormente se celebrarán convenios de colaboración intermunicipal en donde el Comité Técnico Local será la estructura de toma de decisiones para el desarrollo del humedal.

De la misma manera el Gobierno Federal deberá celebrar convenios de transferencia de funciones o de colaboración en donde la Ley lo permita con el Gobierno Estatal para apoyar el desarrollo local y la planeación del uso del suelo en el área. En este sentido el Gobierno Federal deberá reconocer dentro de estos convenios de colaboración la figura organizativa del Comité Técnico Local como el espacio político y administrativo que orienta e integra los esfuerzos de las instituciones a favor del bienestar social del humedal sur del lago de Pátzcuaro.

En el caso de los dos Gobiernos Municipales, que inciden en el área del humedal, deberán de sumar sus esfuerzos con sus unidades equivalentes con el objeto de unir las acciones en las diferentes unidades ambientales que son reconocidas y delimitadas dentro del polígono que se recomienda como unidad de manejo. Los Gobiernos Municipales dentro de sus atribuciones deberá firmar un convenio de colaboración municipal en donde parte de sus acciones operativas y de administración serán destinadas para el manejo del humedal.

#### **a) El Gobierno Federal**

El Gobierno Federal participará en todos aquellos espacios en donde tiene atribuciones de manejo como es el caso de las aguas nacionales, la zona federales de litoral así como en los terrenos forestales de la zona. En este sentido aplicará lo que la normatividad federal le confiere. Sin embargo, sus acciones deberán de ser analizadas y consultadas con el Comité Técnico Local de manera que se busque una auténtica vinculación institucional. Sus programas operativos anuales serán integrados al trabajo regional a través de un taller anual de planeación y programación de presupuestos organizado por el Comité Técnico Local.

Las concesiones para particulares y organizaciones sociales en el caso del uso del agua y permisos de aprovechamientos forestales deberán de ser evaluadas y aprobadas por el Comité Técnico Local.

#### **b) El Gobierno Estatal**

Las dependencias del Gobierno Estatal participarán en aquellas acciones en donde la soberanía del estado faculta al ejecutivo estatal, incluyendo el uso del suelo, el desarrollo de infraestructura y el desarrollo local. De la misma manera que con el Gobierno Federal sus acciones y programas deberán estar estrechamente asociados con el modelo de desarrollo de la región y ser aprobado por el Comité Técnico Local.

#### **c) Los Gobiernos Municipales**

Los Gobiernos Municipales de Pátzcuaro y Erongarícuaro tendrán representación en el Comité Técnico Local bajo la perspectiva de que es el humedal el que representa la unidad de administración y permitirá que ambos municipios reciban los beneficios de la integración y suma de esfuerzos.

#### **d) Las organizaciones sociales**

La organización social como agrupación productiva y figura legal del sector que representa podrá formar parte del Comité Técnico Local en donde sus representantes acreditados deberán de llevar a consulta cada una de las recomendaciones y acuerdos que el Comité Técnico asuma durante su administración. La presentación del acta de Asamblea con las firmas correspondientes será requerida para la votación y aprobación de programas operativos en el Comité Técnico con el objeto de minimizar los riesgos de conflicto de intereses durante el desarrollo de las acciones en las localidades.

#### **e) La academia**

Los académicos e investigadores tienen como responsabilidad el proporcionar la información científica y tecnológica actualizada y oportuna para que el Comité Técnico Local tome de manera apropiada las decisiones correspondientes respecto a las diferentes acciones de manejo. De la misma manera deberán de comunicar al Comité sobre los proyectos de investigación que se desarrollan en la región así como los montos y los tiempos de obtención de resultados. La representatividad de la academia será en función de aquellas instituciones educativas que se distingan por su compromiso y calidad de trabajo relacionado con el humedal.

#### **f) Las organizaciones no gubernamentales (ONG)**

En el espacio del Comité Técnico Local la figura de la ONG tiene como responsabilidad principal la generación de conciencia e identidad con las localidades. De la misma manera su participación será orientada hacia la difusión y transmisión a la sociedad de los conocimientos, acuerdos y planes de trabajo a través de la infraestructura de su agrupación.

La ONG podrá participar también en la gestión de fondos económicos para la mejor operatividad del Comité Técnico y sus planes de trabajo. De la misma manera su participación será dirigida hacia la organización de talleres de participación ciudadana.

### **g) La evaluación técnica**

La unidad de evaluación técnica representa el grupo colegiado del Comité Técnico Local en donde todos los proyectos deberán de ser analizados, evaluados y dictaminados para su factibilidad y aplicación local. La integración de esta unidad será en función de aquellos profesionales y organizaciones que representen una figura honorable, de calidad técnica y de certidumbre para el desarrollo local.

## **9.2 Estrategias y líneas de acción**

Para el diseño de estrategias y actividades es necesario la zonificación del humedal, dependiendo de los requerimientos de cada área en particular, es por ello que a continuación se plantean acciones por zonas específicas en el humedal.

### *9.2.1 Zona de restauración*

En esta zona se realizarán actividades de preservación, restauración, investigación, educación ecológica y se deberán limitar las actividades de aprovechamiento que alteren la dinámica natural de ecosistema incluyendo el turismo ecológico.

Para las actividades de restauración de la cobertura vegetal deberá coordinarse con la Secretaría en materia forestal, quien deberá realizar un acuerdo o convenio entre el gobierno federal y estatal para coordinar (Artículo 7 de la Ley Forestal) la organización de un inventario forestal de la microcuenca del humedal, con la finalidad que esto permita la evolución de los programas de restauración y conservación realizados en el área, así mismo este registro será público. (Artículo 10 bis de la Ley Forestal).

La forestación y reforestación deberá cumplirse con lo dispuesto en los Artículos 15 y Artículo 19 Bis 3 de la Ley Forestal donde queda prohibido la forestación con propósitos de producción comercial en sustitución de la vegetación natural de los terrenos forestales.

Para los programas de conservación propuestos en esta zona deberá tomarse en cuenta la opinión del consejo local el cual puede promover actividades tendientes a incrementar la calidad y eficiencia en la conservación. (Artículo 19 bis 9 de la ley federal)

También se consideran acciones preventivas que la secretaría en materia forestal supervisará, coordinará y ejecutará para la prevención, combate y control de incendios y promoverá la asistencia al gobierno estatal y municipal en términos de acuerdos y convenios. (Artículo 28 ley forestal).

Dentro de las acciones se considera un programa de vigilancia que contempla la sanidad forestal donde los ejidatarios, así como titulares y responsables de la administración están obligados a ejecutar trabajos de sanidad forestal conforme a los lineamientos que se den a conocer por la secretaría. (Artículo 31 Ley Forestal)

Dentro del Artículo 34 de la Ley Forestal la Secretaría escuchando la opinión del consejo deberá promover los programas e instrumentos económicos que se requieran para fomentar las labores de conservación, protección, restauración y aprovechamiento sustentable.

Así mismo los programas de desarrollo forestal deberán ser coordinados por el gobierno estatal y con participación de los municipios, así como del sector social y privado con el objeto de restaurar y aumentar los recursos forestales y biodiversidad en el territorio, realizando y apoyando las acciones que disminuyan la erosión y aumentar la recarga de acuíferos. (Artículo 36 ley forestal).

Una estrategia más es la creación de viveros para la propagación de especies sobre todo nativas que sean adecuadas para la recuperación de las especies de la zona, estos serán operados por el gobierno del estado y los municipios de acuerdo al Artículo 37 de la ley forestal.

La Secretaría en coordinación de la Secretaría de Educación pública y demás dependencia educativas y de investigación promoverá, coordinará y realizará campañas

de difusión y eventos orientados a la participación social en programas de desarrollo sostenido de las actividades forestales, así como promover programas educativos en materia de conservación, protección, restauración y aprovechamiento forestal, además de propiciar la divulgación, el uso y reconocimiento de métodos para el aprovechamiento forestal sostenido, se deberán apoyar actividades de investigación y formación de recursos humanos, promoviendo la transferencia de tecnología. (Artículo 42 y 43 de la ley forestal).

También se deberá referir al Artículo 161 al 165 de la misma ley donde la Secretaría realizará actos de inspección y vigilancia. Se tendrá la obligación de cumplir con las NOM-059-ECOL-2000, NOM-061-ECOL-1994, NOM-062-ECOL-1994 y NOM-004-CNA-1996.

#### *9.2.2 Zona de protección*

En esta zona se realizarán actividades de preservación, protección y aprovechamiento sustentable, investigación, turismo, recreación y educación ambiental, además de programas de veda de flora y fauna silvestre (Artículo 81 y 82 de la LGEEPA). En los procesos de deterioro se deberá sujetar a lo establecido en el Artículo 78. Para el caso de uso sustentable deberá aplicarse el Artículo 88, 90, 93 y 94 donde se establecen los criterios de aprovechamiento, expedición de NOM para el establecimiento y manejo de zonas, evitar y controlar procesos de eutrofización, así como explotación y administración.

Para poder realizar las actividades de protección en el humedal se deberá celebrar convenios y acuerdos de colaboración con la CNA adecuados para cada uno de las diferentes actividades. Una de las labores a realizar como primer paso, para la recuperación del humedal, es la expropiación de áreas de ocupación temporal, total o parcial y la delimitación de zonas que son ocupadas ilegalmente que actualmente tiene un uso inadecuado causando deterioro en este ecosistema, igualmente se requiere de establecer y ordenar los distritos de riego, reglamentar la extracción de agua y utilización de esta, para esto se requiere que la CNA aplique el artículo 6 de la ley de aguas

nacionales y cuando estos sean bienes ejidales o comunales se procederá en los términos de la Ley Agraria. Otra medida que se deberá realizar es el ordenamiento de la zona federal, aprovechando que se tiene el registro del nivel de aguas máximas ordinarias del lago y del humedal, se deberá verificar y validar el deslinde de la zona litoral federal y determinar el uso adecuado de esta zona sin la construcción de infraestructura permanente. La Comisión Nacional del Agua regulará las concesiones para uso y aprovechamiento temporal de los terrenos ganados por desecación (artículos 116 y 118 de la Ley de Aguas Nacionales).

Debido a que el humedal representa un lugar de anidación, refugio y alimento para la fauna acuática, tomando un gran interés en las aves acuáticas migratorias y endémicas y en las especies de peces endémicos que aún existen, se propone establecer por conducto de la CNA temporadas de veda o de reserva de aguas con la finalidad de proteger y restaurar el ecosistema, así como preservar la fuente de agua. (Artículo 38 al 40 Ley de aguas nacionales).

Además deberán de aplicarse los artículos 96 donde la Secretaría expedirá las NOM para la protección de los ecosistemas acuáticos con los sectores productivos y las comunidades, así como establecer viveros y reservas de especies de flora y fauna silvestre. Deberán aplicarse los artículos 182 al 184 del reglamento de ley de aguas nacionales que citan aspectos de vigilancia e inspección para el cumplimiento de las NOM-001-ECOL-1996, NOM-002-ECOL-1996, NOM-003-ECOL-1997, NOM-004-CNA-1996, NOM-059-ECOL-2000, NOM-061-ECOL-1994 y NOM-062-ECOL-1994.

Es indispensable realizar labores de recuperación de manantiales y pozos así como de la red hídrica de la microcuenca los cuales aportan agua de alta calidad al humedal y por ende hacia el lago. Para la recuperación de estos manantiales, se recomienda realizar labores de limpieza y rehabilitación de ellos de forma manual ya que de esta manera se asegura el menor impacto sobre los mismos.

Para el manejo de estos cuerpos de agua de competencia federal ya que no son cuerpos receptores de aguas residuales, se coordinará el Gobierno Federal con el Estado y Municipios para realizar las acciones de rehabilitación. El Artículo 7 de la Ley de Aguas Nacionales en su capítulo II se declara de utilidad pública la protección, mejoramiento y conservación de acuíferos, así como restablecer el equilibrio hidrológico incluido las limitaciones de extracción, vedas y reservas y el cambio de uso de agua. De acuerdo al Artículo 38 de la Ley Aguas Nacionales es deber del Ejecutivo Federal conforme a lo dispuesto en el Artículo 6° declarar las reservas de agua en los siguientes casos de interés público; fracción II para proteger o restaurar un ecosistema.

Otra acción de manejo es la disposición y el tratamiento de aguas residuales de las localidades aledañas al humedal, que en su mayoría son domésticas, para lo cual se recomienda que se realicen programas de alcantarillado y drenaje para reorientar las aguas de desecho. Activar a un 100% la planta de tratamiento para agua residual que se encuentra junto al Muelle San Pedrito y en el límite Este del humedal, ya que en la actualidad solamente funciona a un 60% de su capacidad y aprovechar la capacidad sortiva del humedal natural en la depuración de las aguas. Esta actividad es de competencia estatal y municipal, ya que es atributo de éstos los programas de tratamiento de aguas residuales antes de descargar a un cuerpo de agua (Artículo 1 Ley de Agua Estatal).

Deberá realizarse un registro detallado tanto de ubicación, como de profundidad y flujo de agua de las tomas de agua para uso doméstico o de riego, así mismo revisar y evaluar los permisos de extracción de agua. Con la finalidad de recuperar el volumen de ingreso de agua al humedal deberán sustituirse las técnicas actuales y prácticas de riego por otras más adecuadas donde el uso del agua sea más eficiente y menos consumativo el cual estará a cargo del Ejecutivo Federal de acuerdo al Artículo 15 capítulo único de la programación hidráulica.

Se recomienda establecer estaciones de monitoreo permanente de calidad de agua y nivel de aguas del humedal con la finalidad de contar con los registros necesarios de disponibilidad de aguas y definir la congruencia de autorizar permisos de extracción

con volúmenes reales de disponibilidad. Esta acción se encuentra sustentada en el Artículo 136 del Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales donde se establece el registro y monitoreo continuo y la verificación del estado de conservación tanto de las redes de drenaje y alcantarillado, además de realizarse un registro donde se inscriben los títulos de concesiones, asignaciones y permisos (Artículo 54 reglamento de la ley de aguas nacionales). De la misma manera se deberá cumplir con las Normas Oficiales Mexicanas de calidad de agua, así como aplicarse los artículos 161 al 165 que citan aspectos de vigilancia e inspección y cumplir con las NOM-001-ECOL-1996, NOM-002-ECOL-1996, NOM-003-ECOL-1997.

Ya que el humedal en conjunto con el lago de Pátzcuaro representan una fuente de trabajo para el sector pesquero se recomienda establecer más zonas de reservas acuícolas. También deberá realizarse el Ordenamiento Pesquero estableciendo el uso de artes de pesca adecuados, el tamaño de malla, las especies biológicas sujetas al aprovechamiento, época de veda y los trabajos de investigación (capítulo III del Artículo 21 de la Ley de Pesca) para la protección de las especies nativas del lago, así como establecer los paquetes tecnológicos adecuados con fines de repoblación y conservación de las especies.

### *9.2.3 Zona de aprovechamiento sustentable*

Para esta zona se propone el manejo de agostaderos, agricultura de ladera y en especial el uso de labranza de conservación. Los agostaderos implican un área considerable de terrenos del humedal desecados y que actualmente está en uso de pastoreo extensivo, sin embargo el ganado ovino y caprino ha degradado el suelo y su cubierta vegetal.

Por lo tanto, se requiere con urgencia realizar pastizaciones, colocar cercas, ordenar el pastoreo mediante una reclasificación de agostaderos y crear un padrón de ganaderos que aprovechan dichas área para saber el número total de cabezas que deben admitirse por zona en función de su capacidad de carga o coeficiente de agostadero. El agua utilizada para actividades agrícolas deberá tramitarse la concesión de agua para

riego ante la Comisión Nacional del Agua (Artículo 87) y se registrarán por lo dispuesto en la ley y reglamento de aguas nacionales y NOM-001-ECOL-1996, NOM-002-ECOL-1996, NOM-003-ECOL-1997NOM-004-CNA-1996, pues en la actualidad los usuarios sólo llegan con sus bombas a gasolina para hacer la extracción directa a sus sembradíos cuando estos lo requieren.

La agricultura de ladera debe realizarse incluyendo un gran componente de labranza de conservación, esto implica el uso del menor número de implementos agrícolas posibles, la adición de materia orgánica, el trazo forzoso de curvas de nivel y la siembra de cultivos de cobertura que proteja el suelo. Se deben incluir obras para evitar la erosión como terrazas con protección de tronco y rama, además de banco y de base ancha.

Para estas zonas deberá realizarse una revisión de la Ley Agraria y respetarse las leyes forestales ya citadas para aprovechamiento sustentable de las zonas de recuperación, asimismo deberán incluirse a la Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Rural, al Estado y H. Ayuntamiento que tendrán la función de vigilar el cumplimiento de las disposiciones sanitario animales, promoviendo nueva tecnología y mejoramiento de la producción pecuaria, así como el cumplimiento de las Normas oficiales de la Ley Ganadera del Estado.

Además de cumplir con el Artículo 24 donde los programas ganaderos deberán sujetarse a acciones de conservación de agostaderos procurando evitar la erosión del suelo por sobrepastoreo y procurando que los programas sean llevados a cabo en conformidad con el Plan Nacional de Desarrollo (Artículo 25). Los productores pecuarios tendrán la obligación de conservar los recursos naturales relacionados con la actividad ganadera en conformidad con las Normas Oficiales Mexicanas en materia ecológica.

#### *9.2.4 Zona de uso público*

En esta zona los criterios por aplicar son diferentes debido a que se requiere una profunda educación en la protección ambiental y en el manejo de los recursos naturales. Para ello debe implementarse un programa de educación continua, ya sea en centros

educativos convencionales o en sitios creados exclusivamente para este objetivo. La forma de abordar los temas debe ser completamente práctica a base de talleres y foros prácticos.

Se requiere de programas para mejorar y cubrir las necesidades de servicios de alcantarillado, disponibilidad de agua, para lo cual se realizarán convenios y acuerdos con la Comisión Nacional del Agua y el Municipio la asignación de la administración de sistemas de agua potable y alcantarillado (Artículo 82), para lo cual el municipio deberá cumplir con lo establecido en el Artículo 83 de la Ley de Aguas Nacionales.

Al tener esta función es deber del Municipio el tratamiento de aguas residuales de esta zona previa a su descarga al sistema humedal-lago conforme a lo dispuesto por la Comisión Nacional del Agua, cumpliendo con las Normas Oficiales Mexicanas establecidas para calidad de agua NOM-001-ECOL-1996, NOM-002-ECOL-1996, NOM-003-ECOL-1997, NOM-004-CNA-1996. El Ayuntamiento tendrá la atribución de prestar el servicio de agua potable, alcantarillado, tratamiento y disposición del agua de acuerdo al Artículo 13 de la Ley de Agua Estatal.

Así mismo y de acuerdo al programa de desarrollo urbano se requiere de ordenar la actividad turística y mejorar la infraestructura de la misma. Es necesario ampliar los programas específicos de restauración y recuperación de edificios históricos para rescatar las raíces culturales de las localidades y poder tener un mejor desarrollo turístico, pues en la actualidad toda esta actividad sólo se impulsa en las ciudades de Pátzcuaro, Quiroga y Tzintzuntzán.

Para lo anterior la Secretaria de Turismo en coordinación con Gobierno Estatal y Municipal formulará programas de desarrollo turístico local, potencializando las actividades artesanales fomentando la creación de cooperativas comunitarias que presten este servicio en esta zona y junto con el Gobierno Federal, Estatal, Municipal y Privado impulsará la dotación de la infraestructura más adecuada para la zona (Artículo 13 al 16 Ley Federal de Turismo).

La educación en los centros urbanos y rurales es importante para el desarrollo local, esta acción está a cargo de la Secretaría de Educación, la cual tendrá la obligación de mejorar la calidad educativa y financiamiento de programas de educación. En materia de educación ambiental la Secretaria de Educación con la Secretaría del Medio Ambiente tendrá el atributo de fomentar talleres de carácter ambiental.

### 9.3. Modelo para el desarrollo sustentable del humedal

Para el manejo del humedal se establecen seis estrategias estructurales, a partir de las cuales se diseñarán programas y acciones específicas dentro de dos dimensiones del comportamiento humano, la toma de conciencia o dimensión ética y la toma del control político o autogestión administrativa para transitar con certidumbre hacia un modelo de desarrollo sustentable no sólo del ecosistema de humedal, sino también de toda la cuenca de Pátzcuaro. (Figura 9.2.)



Figura 9.2. Diagrama de programas y acciones

Dentro de este esquema se recomienda la implementación de programas procurando la participación de los diferentes sectores (gubernamental, académico, no gubernamental y organizaciones sociales, etc). A continuación se muestran las fichas que enlistan los programas propuestos a corto (3 años), mediano (6 años) y largo plazo (10 años):

### 9.3.1. Programa de investigación

En este programa deberán de participar los H. Ayuntamientos, COMPECSA, SEMARNAT, CNA, INI, SAGARPA, Secretaria de Desarrollo Social, instituciones de investigación y Universidades, y Organizaciones NO Gubernamentales implicadas en los trabajos de la cuenca.

<b>Corto plazo</b>	<b>Mediano plazo</b>	<b>Largo plazo</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Completar el diagnóstico local del humedal</li> <li>• Establecer los Proyectos prioritarios para la investigación en el humedal</li> <li>• Análisis del Valor ecosistémico de los bienes que proporciona el humedal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigación aplicada para la tecnología apropiada</li> <li>• Investigación aplicada para la optimización del uso del agua.</li> <li>• Investigación aplicada para el saneamiento de agua</li> <li>• Investigación básica y aplicada para establecer un modelo de aprovechamiento de los recursos que ofrece el humedal.</li> <li>• Actualización del catálogo de aves locales y migratorias para turismo ecológico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo integral de potencial productivo del humedal Sur de Pátzcuaro</li> <li>• Paquetes tecnológicos de aprovechamiento sustentable de especies nativas del humedal.</li> <li>• Modelo sustentable de cultura del agua en Pátzcuaro</li> <li>• Biotecnología vegetal</li> </ul>

### 9.3.2. Programa de educación ambiental

En este programa deberán de participar los H. Ayuntamientos, COMPESCA, SEMARNAT, CNA, INI, SAGARPA, la Secretaría de Educación, Secretaria de Desarrollo Social, instituciones de investigación y Universidades, y Organizaciones NO Gubernamentales implicadas en los trabajos de la cuenca.

<b>Corto plazo</b>	<b>Mediano plazo</b>	<b>Largo plazo</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Análisis del Diagnóstico local de alfabetización</li><li>• Estudio de percepción pública ambiental</li><li>• Talleres de análisis de la problemática ambiental del humedal</li><li>• Definición de proyectos prioritarios</li><li>• Sistematización del conocimiento empírico</li><li>• Identificación del potencial sustentable de los recursos naturales que ofrece el humedal</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Establecimiento del modelo integral de Educación Ambiental para el humedal</li><li>• Definición del modelo integral productivo y de conservación.</li><li>• Capacitación técnica local</li><li>• Establecimiento de un programa de difusión para la Educación Ambiental específica del humedal</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Fortalecimiento de los elementos potenciales del desarrollo local</li><li>• Manejo productivo de unidades de gestión ambiental y uso múltiple del ecosistema de humedal</li><li>• Generación de tecnología apropiada para el humedal</li></ul>

### 9.3.3. Programa agroecológico

En este programa deberán de participar los H. Ayuntamientos, COMPESCA, SEMARNAT, CONAFOR, CNA, INI, SAGARPA, FIRA, FIRCO y Organizaciones sociales productivas

<b>Corto plazo</b>	<b>Mediano plazo</b>	<b>Largo plazo</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementación del Programa de Ordenamiento Ecológico Municipal y de los comunitarios ya existentes.</li> <li>• Acatamiento a las Unidades de Gestión Ambiental (UGA) ya establecidas.</li> <li>• Incorporación de abonos orgánicos en los procesos productivos</li> <li>• Implementación de siembra de cortinas de árboles para reducir efectos erosivos.</li> <li>• Implementación del modelo de labranza mínima.</li> <li>• Programa de mejoramiento genético del ganado criollo</li> <li>• Programa de establecimiento de viveros forestales comunitarios para reforestación.</li> <li>• Programa local de combate a incendios forestales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incremento local de la cobertura vegetal</li> <li>• Selección de cultivos tolerantes a deficiencias nutricionales y climáticas</li> <li>• Alternancia de cultivos</li> <li>• Programa de tecnología forestal, pesquera y agropecuaria apropiadas</li> <li>• Programa local de agostaderos y ganado estabulado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo de control biológico</li> <li>• Modelo de fertilización orgánica</li> <li>• Establecimiento del calendario de siembra y capacidad de carga</li> <li>• Programa de cultivos mixtos</li> <li>• Diseño del modelo de control de malezas</li> <li>• Programa permanente de manejo de la actividad forestal agropecuaria y pesquera.</li> <li>• Programa permanente de reforestación y de servicios ambientales</li> </ul>

#### 9.3.4. Transferencia de tecnología apropiada

En este programa deberán participar los H. Ayuntamientos, COMPECA, SEMARNAT, SAGARPA, CONAFOR, SAGARPA, SEDESOL, FIRA, y Organizaciones sociales productivas.

<b>Corto plazo</b>	<b>Mediano plazo</b>	<b>Largo plazo</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Diagnóstico tecnológico, productivo y rentabilidad local.</li><li>• Identificación de alternativas para la tecnología local</li><li>• Desarrollo de parcelas y granjas experimentales</li><li>• Establecimiento de unidades piloto de producción con tecnología apropiada</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Programa de difusión y capacitación técnica</li><li>• Generación de infraestructura básica local</li><li>• Sistema de asistencia técnica para la producción local</li><li>• Generación de mecanismos locales para la transferencia de tecnología apropiada</li><li>• Evaluación de procesos locales</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Fortalecimiento del modelo local de tecnología apropiada orientado hacia la autosuficiencia y hacia el equilibrio con el humedal</li></ul>

### 9.3.5. Programa de organización social

En este programa deberán participar los H. Ayuntamientos, SEMARNAT, SAGARPA, IMTA, CONAFOR, IEG, SDA, SEDESOL, FIRA, FIRCO y Organizaciones sociales productivas.

<b>Corto plazo</b>	<b>Mediano plazo</b>	<b>Largo plazo</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Fortalecimiento de las formas de organización social locales.</li><li>• Generación de normatividad compatible con la realidad social.</li><li>• Legalización de la tenencia de la tierra.</li><li>• Resolución de conflictos por tenencia de la tierra, sobre todo en las áreas del humedal.</li><li>• Definición de estrategias de comercialización de la producción local</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Programa de capacitación para la activa participación social</li><li>• Establecimiento de Comités de Vigilancia</li><li>• Programa de nuevos flujos comerciales.</li><li>• Programa de vinculación institucional</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Consolidación de la Organización Social como unidad de autogestión y producción local</li></ul>

### 9.3.6. Programa de desarrollo urbano

En este programa deberán participar los H. Ayuntamientos, SEMARNAT, SEDESOL, CNA, CONAFOR, SSA, IMSS, ISSSTE, Secretaría de Comunicaciones y Transporte, Secretaría de Turismo, INAH, CONACULTA y Organizaciones sociales productiva, Secretaria De Desarrollo Social y Humano, Coordinadora de Turismo del Estado.

<b>Corto plazo</b>	<b>Mediano plazo</b>	<b>Largo plazo</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Actualizar el diagnóstico rural de las localidades aledañas al humedal</li> <li>• Integración municipal y social para un mejor desarrollo de las localidades rurales</li> <li>• Identificación de proyectos prioritarios.</li> <li>• Mejoramiento de la vialidad y accesos carreteros</li> <li>• Mejorar el programa de salud y servicios médicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo de compatible de reforestación rural</li> <li>• Modelo eficiente de captación de aguas residuales y saneamiento de las mismas.</li> <li>• Modelo local recreativo y de turismo rural.</li> <li>• Modelo de rescate cultural y de identidad local.</li> <li>• Desarrollo de la infraestructura turística compatible con el humedal.</li> <li>• Estrategias de regulación del crecimiento rural, sobre todo en los terrenos del humedal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consolidación del modelo de localidades rurales sustentables</li> </ul>

### 9.3.7. Aprovechamiento de los recursos ecosistémicos del humedal

En este programa deberán participar los H. Ayuntamientos, COMPECA, SEMARNAT, SEDESOL, SAGARPA, CNA, CONAFOR, Secretaría de Turismo y Organizaciones sociales productivas, Secretaria de Desarrollo Social.

<b>Corto plazo</b>	<b>Mediano plazo</b>	<b>Largo plazo</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Actualización del diagnóstico biológico-</li> <li>• Aplicación del Ordenamiento territorial municipal</li> <li>• Fortalecimiento de las cooperativas u organizaciones locales</li> <li>• Nuevos vías de comercialización de la producción local</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Programa de reproducción de especies nativas de flora y fauna</li> <li>• Manejo integral y sustentable del humedal.</li> <li>• Programa local de desarrollo de infraestructura pesquera y de sanidad acuícola.</li> <li>• Incorporación actividades recreativas como pesca deportiva y avistamiento de aves</li> <li>• Ordenación local de los servicios turísticos y de actividades acuáticas recreativas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo de producción compatible con el humedal.</li> <li>• Integración de actividades económicas afines al humedal</li> </ul>

### 9.3.8. Restauración y Saneamiento

En este programa deberán participar los H. Ayuntamientos, COMPESCA, SEMARNAT, SEDESOL, SAGARPA, CNA, Organizaciones sociales productivas, Secretaria de Desarrollo Social.

<b>Corto plazo</b>	<b>Mediano plazo</b>	<b>Largo plazo</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Diagnóstico de unidades espaciales de erosión</li><li>• Padrón permanente de descargas de aguas residuales</li><li>• Evaluación permanente del balance hidrológico del humedal.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Colecta de las aguas residuales.</li><li>• Programa de construcción de sistemas de prevención de azolve y avenidas</li><li>• Programa de rehabilitación de manantiales.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Programa permanente de evaluación de la calidad de agua del humedal.</li><li>• Modelo eficiente de irrigación local</li><li>• Programa local de control de agroquímicos y fertilizantes.</li></ul>

### 9.3.9. Programa de protección

En este programa deberán participar los H. Ayuntamientos, COMPECA, SEMARNAT, FIRA, SEDESOL, SAGARPA, CNA, Organizaciones sociales productivas, Secretaria de Desarrollo Social.

<b>Corto plazo</b>	<b>Mediano plazo</b>	<b>Largo plazo</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Establecimiento de unidades espaciales de protección</li> <li>• Catálogo local de biodiversidad</li> <li>• Recuperación física de la zonas del humedal</li> <li>• Programa de aprovechamiento de flora y fauna silvestre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Programa de limitación del crecimiento vegetal sobre las aguas abiertas del lago.</li> <li>• Programa de protección de aves acuáticas locales y migratorias</li> <li>• Establecimiento de Unidades de Manejo Ambiental para la producción de fauna silvestre</li> <li>• Establecimiento de Jardines Botánicos locales</li> <li>• Establecimiento del Consejo Técnico para la Conservación del humedal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo sustentable de conservación local</li> <li>• Consolidación de unidades naturales para el mantenimiento de los servicios ecosistémicos del humedal.</li> </ul>

### 9.3.10. Programa Artesanal

En este programa deberán participar los H. Ayuntamientos, SEDESOL, INAH, Secretaría de Turismo, CONACULTA, Secretaría de Educación, Secretaría de Economía y Organizaciones sociales productivas, y Coordinadora de Turismo.

<b>Corto plazo</b>	<b>Mediano plazo</b>	<b>Largo plazo</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Catálogo local de artesanías</li><li>• Catálogo local de materia prima para la actividad artesanal</li><li>• Programa de rescate del conocimiento empírico y técnicas tradicionales</li><li>• Establecimiento de la organización social artesanal</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Generación de nuevos flujos de mercado para la artesanía local</li><li>• Programa de promoción de la artesanía local</li><li>• Feria local de artesanos</li><li>• Programa de capacitación artesanal para la innovación de productos</li><li>• Programa de diseño, calidad y presentación de productos</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Consolidación de la artesanía como actividad productiva rentable y compatible con el humedal</li><li>• Modelo de optimización y certificación de calidad en la artesanía local.</li></ul>

### 9.3.11 Inspección y Vigilancia

En este programa deberán participar los H. Ayuntamientos, SEDESOL, INAH, Secretaría de Educación, CONACULTA, Secretaría de Economía y Organizaciones sociales productivas y Coordinadora de Turismo

<b>Corto plazo</b>	<b>Mediano plazo</b>	<b>Largo plazo</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Realizar convenios con el gobierno estatal y municipal para la actividades de Inspección y vigilancia</li><li>• Crear un cuerpo de Inspección y Vigilancia en las localidades aledañas al humedal.</li><li>• Establecer cursos de capacitación para el cuerpo de Inspección y vigilancia local</li><li>• Crear un fondo financiero para solventar las labores de inspección y vigilancia</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Capacitación del cuerpo de Inspección y vigilancia.</li><li>• Programa de inspección</li><li>• Calendarización de Inspección</li><li>• Programas de saneamiento</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Establecer estaciones de vigilancia</li><li>• Establecer temporadas de veda</li><li>• Registro de organizaciones usuarias de los recursos del humedal.</li></ul>

### 9.3.12 Diversificación productiva

<b>Corto plazo</b>	<b>Mediano plazo</b>	<b>Largo plazo</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudios de diagnóstico por sectores</li> <li>• Gestión de financiamiento sobre programas de cooperación para los sectores.</li> <li>• Programas de capacitación y entrenamiento para la diversificación productiva en el área del humedal</li> <li>• Identificar y priorizar trabajos de investigación aplicada orientada al aprovechamiento de las especies silvestres del humedal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Promover acuerdos de simplificación administrativa para proyectos prioritarios.</li> <li>• Gestiones y concertación con gobierno estatal y municipales</li> <li>• Promover sistemas de certificación, acreditación de producción amigable con el ambiente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Promover las oportunidades identificadas.</li> <li>• Participación de los productores rurales en acciones para la protección de la vida silvestre a través del establecimiento de criaderos y viveros</li> <li>• Ecoturismo compatible</li> </ul>

## **9.4. Mecanismos de instrumentación**

### *9.4.1. Programa de investigación*

El programa de información científica a corto plazo deberá calendarizar proyectos con aspectos pendientes a diagnosticar en el humedal, como por ejemplo listados florísticos, faunísticos, de captura de carbono y estudios socioeconómicos que permitan conocer la problemática real de los habitantes de la ribera del humedal. Así como proyectos prioritarios de para mejorar las actividades productivas, y el aprovechamiento de las especies locales.

El Programa de Biotecnología surge una vez que se tiene un diagnóstico total de la problemática local, para ubicar de manera clara y real su actividad de investigación científica y tecnológica, todo ello dentro del marco institucional e involucrada dentro de las prioridades de desarrollo de los diversos sectores productivos tanto primarios como secundarios de las actividades agrícolas, pecuarias y forestales en el humedal.

Es necesario considerar la realización de estudios orientados a generar productos, subproductos, procesos y tecnologías que apoyen a los diversos sectores locales. Para ello se deberán desarrollar diversas estrategias con el propósito de ofertar, biofertilizantes, aumentar y mejorar la producción de alimentos. Además de desarrollar investigación en control y manejo de las plagas y parásitos que afectan al sector agropecuario a través de metabolitos microbianos, metabolitos vegetales y microorganismos entomopatógenos

A mediano plazo de realizarán proyectos dirigidos a tecnología aplicada, índices de bienestar social y ordenamiento comunitario.

### *9.4.2. Programa de educación ambiental*

Este programa desarrollará acciones orientadas hacia la educación ambiental y hacia el equilibrio de los desarrollos urbanos con los procesos ambientales locales mediante Talleres comunitarios de educación ambiental así como ejecutar a corto plazo los reglamentos de separación de basura, descargas de aguas, reforestación, construcción y pavimentación. Para que a largo plazo se pueda llegar al fortalecimiento de los elementos potenciales del desarrollo local y al uso múltiple del ecosistema.

#### *9.4.3. Programa agroecológico*

Se requiere de aplicar primeramente lo recomendado por el ordenamiento territorial de la Cuenca, y si es que se tiene, el de los municipios y dar seguimiento a las políticas ambientales que establecen la Unidades de Gestión Ambiental (UGA), así mismo se debe cambiar las técnicas de riego por otras más eficientes como aspersión, goteo o ferti-irrigación. También deberán emplearse técnicas de labranza mínima, terrazas y agricultura en curvas de nivel y hacer uso de la investigación aplicada para lograr el control de malezas; así como promover los programas permanentes de manejo forestal, manejo agropecuario y manejo de los servicios ambientales del humedal.

#### *9.4.4. Transferencia de tecnología apropiada*

Aquí se plantea el ensayo experimental piloto con procedimientos de evaluación y seguimiento en áreas definidas en relación a técnicas productivas que incluyen agricultura orgánica, labranza mínima, coeficientes de agostadero, silvicultura, pesca y aprovechamiento de los recursos que ofrece el humedal.

#### *9.4.5. Programa de organización social*

Promover la organización de los usuarios directos del humedal por producto y en cooperativas, lo que les permitirá acceder a financiamientos conjuntos, adquisición de elementos para el trabajo, comercializar mayor volumen, la apertura de nuevos mercados, tener mayor participación ciudadana en los espacios que se requiera para transitar hacia la creación de unidades autónomas.

#### *9.4.6. Programa de desarrollo urbano*

En este programa se desarrollarán acciones orientadas hacia la educación ambiental y se realizará mediante programas que contemplarán talleres y seminarios modelos de crecimiento, integración de la ciudadanía, así como el rescate de la identidad cultural local. A mediano plazo se debe impulsar el turismo rentable aprovechando las áreas de recreación que durante esta gestión administrativa (2012/2015) ya fueron establecidas en el Canal de Erongarícuaro. Favorecer el desarrollo de la infraestructura necesaria y ambientalmente compatible con el humedal para potencializar el aprovechamiento del escenario natural redirigir el desarrollo de los servicios secundarios que complementan

esta actividad en ésta misma línea. Deberá de establecerse un programa planificado de crecimiento de las localidades cercanas al humedal, priorizando el establecimiento de zonas de reserva ecológica, zonas de restauración, zonas de recarga de acuíferos.

#### *9.4.7. Aprovechamiento de los recursos ecosistémicos del humedal*

A través de la evaluación y diagnóstico de los recursos biológicos existentes así como de su potencial de uso, será posible disponer de información oportuna, actualizada, precisa y dinámica para el diseño de un plan productivo, eficiente y compatible que permita el aprovechamiento de los distintos recursos que ofrece el humedal, con el objeto de disminuir el deterioro y favorecer las actividades orientadas hacia la recuperación y conservación. Se considera que los resultados del estudio tienen un impacto social directo, mejorando la economía de los locales, debido a que un alto porcentaje de la población rivereña vive de los recursos que logra extraer del humedal.

#### *9.4.8. Restauración y Saneamiento*

La propuesta de este programa va dirigido a realizar esfuerzos para mejorar la calidad ambiental y disminuir el deterioro para lo cual se determinan áreas para la retención de suelo erosionado, reforestación, para la captación de aguas residuales, disposición eficiente de residuos sólidos, planes de separación y reciclaje de basura. Programas de biofertilizantes y control de químicos agrícolas, Programas de captación de agua y reúso de la misma.

#### *9.4.9 Programa de protección*

Este programa deberá considerar respuestas a factores socioeconómicos y ambientales, interacciones bióticas y abióticas; y prácticas de manejo para poder realizar la evaluación de riesgo de los recursos naturales de la cuenca, además de localizar y puntualizar las causas del deterioro para poder implementar programas de conservación. Pero y sobre todo la recuperación física de los terrenos del humedal hacia tierra y hacia el lago limitar el crecimiento de la vegetación para favorecer la coexistencia de ambos ecosistemas

#### 9.4.10. *Programa Artesanal*

Las acciones en este programa deberán ser orientadas a la definición de un estilo local de trabajo artesanal, actualizar y capacitar a los productores artesanales, favorecer la creación de una escuela del oficio. Promoción de la artesanía local en ferias y exposiciones locales, regionales y del país (La administración actual (2012/2015) ya implementó la primera feria artesanal del municipio de Erongarícuaro, celebrada en Septiembre de 2014, se espera que se continúe con esta actividad para promover los productos locales). A mediano plazo ya se contará con mecanismos de control de calidad y estrategias generales de financiamiento y apoyo artesanal para a largo plazo contar con una artesanía consolidada, rentable y local.

#### 9.4.11. *Inspección y Vigilancia*

La preocupación de mantener e incrementar la calidad y cantidad de agua en el lago de Pátzcuaro se ha intensificado, y convertido en un complejo problema, ya que su cuenca sufre de un severo deterioro y desbalance hídrico, además de presentar baja calidad de agua. Una de las preocupaciones más importantes es el de proteger, sobre todo, aquellos ecosistemas de alta fragilidad y que favorezcan la captación y el ingreso de agua de *buena calidad* al lago y que mantenga en lo posible el balance hídrico del ecosistema. El humedal es un elemento fundamental para ello sin embargo, no deben dejarse de lado los programas específicos donde se tomen en cuenta cambios niveles de agua y se anticipen sus efectos, así mismo se contemplen los cambios en biodiversidad, cobertura vegetal de la cuenca, la calidad de agua. Desde este punto de vista se requiere de un programa de inspección y vigilancia permanente el cual siga un proceso repetitivo de observaciones del medio ambiente (físicoquímico y biológico), con un programa calendarizado y en estaciones preestablecidas, utilizando métodos estandarizados oficiales. Este programa deberá considerar respuestas a factores climáticos, interacciones bióticas y abióticas; y prácticas de manejo para poder realizar la evaluación de riesgo del recurso, además de localizar la causa de estrés.

#### 9.4.12. *Diversificación productiva*

La promoción hacia la diversificación productiva y la conservación, dará lugar a la creación de fuentes de empleo e ingresos y por consiguiente a una mayor captación de

recursos vía pago de impuestos y derechos fiscales, mismos que podrían canalizarse a proyectos específicos del área generadora. De esa manera será posible crear un círculo que armonice y justifique la inversión, la conservación y el aprovechamiento.

Los criaderos, invernaderos y viveros se realizarán solamente con control sobre todo el ciclo de vida en áreas amplias dentro del hábitat natural y con la alteración mínima de éste. La importancia de estas unidades radica tanto en la conservación del hábitat como de las especies.

El Ecoturismo es una alternativa de diversificación productiva, en estas actividades, la flora y fauna silvestres en sus diferentes manifestaciones tienen un papel muy relevante. El ecoturismo puede definirse como un excelente instrumento de manejo de los ecosistemas y los recursos naturales el cual consiste en el uso no consuntivo de los atributos escénicos y paisajísticos de la naturaleza. Donde bien se puede incluir al humedal de Pátzcuaro que al rehabilitarse puede ser viable para esta actividad debido a su belleza escénica. Parte del financiamiento para las actividades de conservación y desarrollo, podría provenir de actividades eco turísticas, incluyendo en sus programas de manejo ligadas a la educación ambiental.

## **9.5. Fuentes de financiamiento**

Durante décadas los esfuerzos para la protección de ecosistemas estratégicos se concentraron principalmente en decretar, bajo algún régimen, áreas de protección. Sin embargo, históricamente la mayoría de las áreas protegidas carecieron de los apoyos necesarios para su adecuada operación, como son los planes de manejo, personal y presupuesto suficiente, pues dichos esfuerzos no estuvieron inscritos dentro de un marco de política ambiental que los integrara.

En la década de los años noventa y en particular durante los últimos diez años, se reiniciaron esfuerzos orientados al establecimiento de las condiciones institucionales, legales, de participaciones sociales, financieras y operativas para dichas áreas.

Las áreas que actualmente son protegidas, han adquirido desde entonces una importancia reflejada en los esfuerzos por garantizar que los decretos cumplan con su función, es decir, proteger las zonas del territorio que por ser superficies con ecosistemas originales poco alterados y con una gran riqueza biológica y paisajística han sido declaradas en alguna de las categorías de protección y sujetas a algún régimen previsto en la normatividad vigente ambiental.

Sin embargo, se considera de fundamental importancia impulsar un nuevo enfoque basado en la promoción de una amplia participación de la sociedad, en la búsqueda de nuevos esquemas de gestión administración y financiamiento de las áreas que permita, a largo plazo, consolidar y ampliar el sistema de protección.

La presencia permanente de personal profesionalizado en las a restaurar ha contribuido a disminuir las presiones y a prevenir situaciones adversas. Ha sido un proceso complejo y paulatino ya que para ello se requieren recursos. El equipo que se involucra en la administración de las áreas debe de estar básicamente constituido por personal profesional dedicado a la conservación y al manejo de los recursos naturales, que conocen el área, que la han estudiado e incluso habitado.

Este es uno de los mayores activos de las zonas de restauración además de la participación social que en muchos casos se ha logrado alcanzar para su adecuación administrativa. Para cubrir las actividades básicas de un área de interés ha sido indispensable contar con suficientes recursos económicos.

Para el cumplimiento de los objetivos de protección y manejo es fundamental disponer de recursos financieros ya que cada unidad de manejo ambiental requiere de apoyos económicos para solucionar problemas de acuerdo con sus características.

Las alternativas que hasta el momento se identifican para el financiamiento son las siguientes, (no dudando de que existen muchas más a las que se pueda tener acceso):

#### *9.5.1 Aportaciones federales*

Es evidente que existe un subsidio federal permanente para el lago de Pátzcuaro, pero la mayor parte de ese fondo se aplica en las ciudades más grandes de la zona. Un primer paso es buscar el apoyo, a través de ese subsidio, una asignación económica que permita apoyar las actividades de protección conservación y manejo del humedal.

#### *9.5.2 Aportaciones estatales*

De la misma manera que la aportación federal el Ejecutivo del Estado deberá incorporar un presupuesto básico de operación para el financiamiento de actividades a desarrollar en el humedal, considerando que las acciones primarias de manejo dependen de los subsidios iniciales que el Gobierno del Estado pueda asignar.

#### *9.5.3 Aportaciones municipales*

El Comité Técnico Local podrá gestionar un presupuesto mínimo que los municipios de Pátzcuaro y Erongarícuaro pueden asignar como complemento al presupuesto para el humedal.

#### *9.5.4 Aportación de la iniciativa privada*

Aprovechando los incentivos fiscales vigentes sobre la protección al ambiente se reconoce la posibilidad de vincular a la iniciativa privada, incluyendo la industria alimenticia, la industria automotriz, la industria petrolera, la industria textil, los promotores turísticos, la industria del papel, la industria de la construcción y los grandes consorcios comerciales, pueden contribuir en especie con donaciones económicas para la protección del área.

#### *9.5.5 Organismos internacionales*

Uno de los grandes motivos para que el humedal del SUR de Pátzcuaro fuese registrado como Humedal de importancia internacional RAMSAR fue la presencia de las especies endémicas en el ecosistema acuático, como el pez blanco y el achoque. Lo anterior representa una excelente oportunidad de adquirir financiamiento externo a través de organizaciones internacionales, que cuales pueden apoyar programas de conservación a través del Comité Técnico Local. Esto es factible por ejemplo con la organización

RAMSAR quienes además aportar recursos económicos, proporcionan asesorías técnicas para el mejoramiento de las acciones que se realizan en el humedal.

Entre las organizaciones internacionales que procuran el financiamiento de áreas para manejo, con el requisito esencial de que exista corresponsabilidad ciudadana en el manejo de los recursos naturales locales se encuentran la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (CCA), Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), etc.

#### *9.5.6 Financiamiento para la captura de carbono*

México ha firmado acuerdos como el de Kyoto, Japón en relación a promover la disminución de los efectos del Cambio Climático Global. Para ello existen fundaciones especializadas que funcionan como gestorías entre ellas destaca el Banco Mundial, para el pago de regalías por las campañas exitosas de reforestación y el porcentaje de captura de carbono atmosférico al mantener la cobertura forestal local. Para acceder a este financiamiento se requiere un estudio especializado y detallado de la cantidad de carbono que captura el humedal para los pagos correspondientes.

#### *9.5.7 Servicios de turismo y paradores*

La actividad turística que se promueva en la zona del humedal deberá considerar la necesidad de aportar algún porcentaje de sus ingresos para apoyar los programas de investigación, protección, restauración, vigilancia y cuidado del ecosistema. Una vez que esta actividad vaya consolidándose, puede irse incrementado dicha aportación.

#### *9.5.8 Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza A.C.*

Organización no gubernamental binacional y que dedica sus esfuerzos para el pago de proyectos de conservación ecológica en donde existen evidencias de participación social y beneficios de desarrollo para la región. Para ello es necesario que la figura del Comité Técnico local se encuentre vigente como agrupación integral para el manejo del humedal.

#### *9.5.10 Comisión Nacional para el Estudio de la Biodiversidad*

Organización del gobierno federal encargada del financiamiento para el estudio y generación de información para el conocimiento de la diversidad biológica del territorio nacional. Para ello es requisito esencial contar con un grupo académico sólido el cual puede realizar estudios y contribuir al conocimiento local y regional. Tal y como ocurrió con el desarrollo del presente proyecto.