

El análisis estructural para evaluar indicadores dentro de la GIRH en la microcuenca "Villa Victoria" (Estado de México)

Structural analysis to evaluate indicators within IWRM in the "Villa Victoria" watershed (Estado de México)

Dafne Luna-Pérez ^{a1}, Francisco Zepeda-Mondragón ^{a2}, Yered Gybram Canchola-Pantoja ^{a3}

^aUniversidad Autónoma del Estado de México, Cerro Coatepec s/n Ciudad Universitaria, Toluca, Estado de México, CP. 50510. México.

E-mail: ^{a1}dlnunap001@alumno.uaemex.mx, ^{a2}fzpedam@uaemex.mx, ^{a3}ygcancholap@uaemex.mx

*Autor para correspondencia

Recibido: 08/12/2021

Aceptado: 26/09/2022

Publicado: 31/10/2022

Citar como: Luna-Pérez, D., Zepeda-Mondragón, F., Canchola-Pantoja, Y.G. 2022. Structural analysis to evaluate indicators within IWRM in the "Villa Victoria" watershed (Estado de México). *Ingeniería del agua*, 26(4), 245-260. <https://doi.org/10.4995/la.2022.16832>

RESUMEN

Ante la necesidad de resolver los problemas hídricos, y los grandes retos en términos de la gestión del agua, es necesario implementar una metodología que se desarrolle desde una perspectiva sistémica; en donde la GIRH (Gestión Integrada de los Recursos Hídricos) asume un rol muy importante. El objetivo de este estudio consistió en evaluar los indicadores en el esquema PEIR (Presión, Estado, Impacto, Respuesta) determinantes en el escenario GIRH en la microcuenca "Villa Victoria", a través del método de análisis estructural, mediante la herramienta MICMAC (Matriz de Impactos Cruzados Matriz Aplicada a una Clasificación). A través de la cual, se pudo estudiar la relación de 20 indicadores, encontrando las variables influyentes y dependientes, que fueron esenciales para entender la estructura y dinámica del sistema, en donde 12 resultaron claves. Los cuales muestran, que la población se ve marcada por desigualdades sociales que reflejan pobreza además un índice de marginación alta que exacerba la desigualdad social en la distribución de servicios como por ejemplo la cobertura de agua potable y drenaje y a su vez el crecimiento poblacional también se constituye como componente fundamental que agrava la insuficiencia en la prestación de servicios.

Palabras claves: MICMAC, AEPA, PEIR, sistema.

ABSTRACT

Given the need to solve water problems, and the great challenges in terms of water management, it is necessary to implement a methodology that is developed from a systemic perspective; where IWRM (Integrated Management of Water Resources) assumes a very important role. The objective of this study was to evaluate the indicators in the PEIR scheme (Pressure, State, Impact, Response) determining factors in the IWRM scenario in the "Villa Victoria" watershed, through the method of structural analysis, using the MICMAC tool (Matriz of Crossed Impacts Matrix Applied to a Classification Through which it was possible to study the relationship of 20 indicators, finding the influential and dependent variables, which were essential to understand the structure and dynamics of the system, where 12 were key. which show that the population is marked by social inequalities that reflect poverty as well as a high marginalization index that exacerbates social inequality in the distribution of services such as coverage of potable water and drainage and in turn population growth also serves as fundamental component that aggravates the insufficiency in the provision of services.

Keys word: MICMAC, AEPA, PEIR, system.

INTRODUCCIÓN

“El estudio del agua es tan antiguo como la civilización, traza sus orígenes hasta varios milenios antes de cristo: El interés por los recursos del agua es ancestral: cuna de la civilización” (Batalla y Sala, 1999). Las ideas básicas de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos se acercan a los 100 años (Giordano y Shah, 2014). Estas son un punto de partida para considerar las mejoras en la gobernanza del agua y su manejo, además son un llamado a administrar el agua de manera integral, gestionarla en todos los sectores y garantizar una amplia participación en la toma de decisiones (Giordano y Shah, 2014).

La GIRH se puede definir como el “proceso que promueve la gestión y el desarrollo coordinados del agua, la tierra y los recursos relacionados. Lo anterior, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas”; es decir sistemática a través de las partes interesadas local, regional y nacional (GWP, 2008). En otras palabras, es un medio para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS), permitiendo la colaboración entre los sectores, además de fomentar la participación de grupos de interés, la transparencia y la gestión local rentable (CONAGUA, 2004).

Bajo este fundamento teórico está basado el presente trabajo. Cuyo objetivo se centra en evaluar indicadores que intervienen en el proceso GIRH en la microcuenca Villa Victoria- San José del Rincón, en el Estado de México, a través del método de análisis estructural con la herramienta MICMAC (Matriz de Impactos Cruzados Matriz Aplicada a una Clasificación) (GWP, 2008). Para el cual fue necesario: realizar una caracterización en el área de estudio, social, económica y ambiental, seguido de identificar y discutir los indicadores del esquema PEIR (Presión, Estado, Impacto, Respuesta) determinantes en el escenario GIRH que permitan simplificar el sistema de gestión del agua y representarlo espacialmente.

Se evaluaron y representaron espacialmente los indicadores que influyen en el proceso GIRH en la microcuenca Villa Victoria – San José del Rincón, con la finalidad de contribuir con la gobernanza local del agua para una adecuada distribución de los recursos hídricos, propiciando su manejo sustentable. Para que los actores involucrados (población, comisiones de cuenca, gobierno local), tengan herramientas que les permitan visualizar el comportamiento de la microcuenca y puedan tomar decisiones del territorio fundamentadas. Enfatizando, que el área de estudio no cuenta con una herramienta que ayude a integrar la información de indicadores en el contexto de la gestión del agua. Por lo que, el visualizador web es una alternativa viable que promueve la adhesión a pautas de gestión de la información.

En México, se han estudiado diferentes metodologías para la evaluación de indicadores en la GIRH. Como es el caso de la “Guía de Planeación estratégica de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la cuenca Lerma – Chapala Santiago”. La cual consistió en un apoyo metodológico para la toma de decisiones, así como la construcción y desarrollo de la planeación estratégica. En ella emplearon el esquema de indicadores PEIR, que permite expresar vínculos causa-efecto existentes entre los diferentes factores que intervienen, logrando analizar la situación general y diseñando un conjunto de estrategias para buscar la GIRH (Díaz-Delgado *et al.*, 2009). Sin embargo, la priorización de indicadores se realizó a través de la jerarquización de estos, de forma directa. Por lo cual, no describe la relación de todos los elementos constitutivos. Además, no analiza la evolución del sistema para una proyección a futuro, y tampoco su comportamiento espacial.

Manzano *et al.* (2019), realizaron un análisis estructural del sistema de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en la cuenca del río Nenetzingo (México), mediante MICMAC y una perspectiva de planificación estratégica. Esta herramienta permitió dilucidar la estructura, además fue importante para lograr la sostenibilidad de los recursos hídricos y fortalecer las medidas de planificación a corto y a largo plazo, facilitando la definición de escenarios para la implementación. Dicha metodología se retomó para el presente trabajo, sin embargo, como elemento diferenciador, los indicadores se expresaron en el esquema PEIR y se representaron espacialmente en un visualizador web.

Los indicadores PEIR expresaron los vínculos existentes entre los diferentes factores que intervienen en la solución de la problemática hídrica de la microcuenca “Villa Victoria” y estos sirven como constructores del conocimiento además como instrumentos necesarios para el diseño e implementación y evaluación de las políticas públicas (Díaz *et al.*, 2011). Mientras que, otros esquemas de evaluación o de mediciones aisladas del territorio son desarticulados cuando se consideran las conexiones existentes entre los aspectos ambientales, económicos y sociales (Díaz-Delgado *et al.*, 2009).

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio y problemática

La microcuenca Villa Victoria – San José del Rincón se localiza en el oeste del Estado de México, con coordenadas geográficas de 19° 26' de latitud norte y 100°00' de longitud oeste, tiene una altitud de 2570 m s.n.m. Ubicado entre los municipios de Villa Victoria y San José del Rincón principalmente, además de San Felipe del Progreso, Amanalco de Becerra, Almoloya de Juárez y Villa de Allende (INEGI, 2020). Pertenecer a la Región Hidrológica 18 Balsas de la cuenca hidrológica del Río Cutzamala, subcuenca Río Tilostoc como se muestra en la Figura 1.

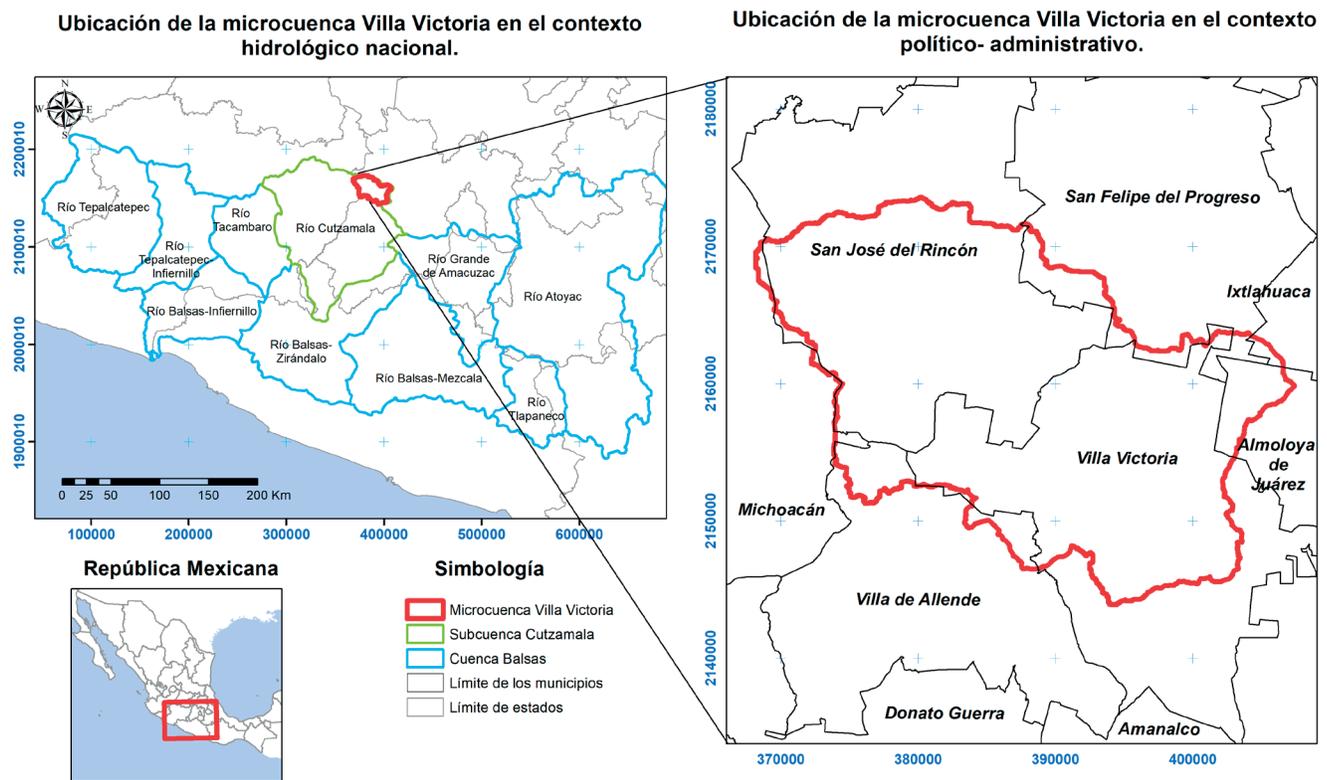


Figura 1 | Localización en el contexto hidrológico y político-administrativo de la microcuenca Villa Victoria. Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2020).

En el área de estudio existen factores limitantes como la pobreza, el acceso desigual del agua, una financiación inadecuada e información deficiente sobre el estado de los recursos hídricos acerca de su uso y manejo, las cuales implican restricciones en la GIRH y los objetivos de desarrollo sustentable (UNESCO, 2015). Es importante enfatizar que la microcuenca Villa Victoria-San José del Rincón se enfrenta a múltiples necesidades desatendidas que resultan en carencias de acceso a agua potable y saneamiento, aunado a una crisis de gobernanza. Por lo que, tener acceso a suficiente agua limpia y segura es uno de los mayores retos a los que se enfrenta día con día. La crisis del agua se ha convertido en un factor limitante para: la salud, la seguridad ambiental, desarrollo, mantenimiento de los ecosistemas incluyendo la estabilidad social y política.

La microcuenca Villa Victoria- San José del Rincón cuenta con la riqueza hídrica para satisfacer a toda la población asentada dentro de su área, ya que cuenta con la presa Villa Victoria (SMA, 2018). Es una de las que integran el Sistema Cutzamala “Es un sistema de almacenamiento, conducción, potabilización y distribución de agua. Es una de las obras de ingeniería civil más grande del mundo, está integrado por 7 presas y 6 plantas de bombeo” (CONAGUA, 2011). Sin embargo, los habitantes de la

microcuenca Villa Victoria no tienen acceso al agua potable de dicha presa. Los datos obtenidos del INEGI (2020), demuestran que la cobertura de agua potable municipal es del 77.79%, el porcentaje de población en situación de pobreza es de 71.7% y el 66.8% tiene carencias por acceso a servicios básicos en la vivienda (CONEVAL, 2015). El Plan de Desarrollo Municipal (2016), argumenta que los factores que afectan el suministro del recurso hídrico en el área de estudio son: la gran dispersión de la población y las pendientes que presenta el territorio, por lo que la introducción de infraestructura de agua potable y el saneamiento resultan altamente costosos.

Indudablemente hay una carencia de hidrosolidaridad, conceptualizada como: la ética que orienta multidimensionalmente y para la cual se requiere una mejor comprensión del sitio de los flujos hidrológicos y su dinámica en el sistema. Esta es necesaria en el área de estudio, para resolver los problemas relacionados con el agua, manteniendo un equilibrio solidario entre los intereses sociales y ambientales (Gerlak *et al.*, 2011). En este sentido una herramienta que visualice espacialmente variables que influyan en el proceso GIRH en la microcuenca Villa Victoria, podría fungir como un espacio donde se brinde información, que pueda ser utilizada, desarrollada y gestionada en procesos que mejoren su condición.

MÉTODOS

La metodología empleada, se elaboró mediante el método de análisis estructural. El cual se define como un método cualitativo de estructuración, que condesciende la posibilidad de describir un sistema mediante el uso de una matriz que interconecta sus componentes y logra una representación exhaustiva del sistema, con la perspectiva de provocar el cambio en el futuro, además sirve de apoyo a la toma de decisiones (Godet, 2000). Este permitió tener una representación amplia del sistema, para reducir la complejidad de la representación a sus variables, conociendo a su vez la estructura de sus relaciones (Manzano *et al.*, 2019).

El análisis estructural se basa en ver la realidad como un sistema y establecer las relaciones de causalidad existentes entre las variables que lo componen (Mojica, 2005). Entendiendo por sistema, al conjunto de elementos que se encuentran relacionados entre sí (Godet, 1993). En otras palabras, es un grupo que interactúa y forma un todo o que se encuentran bajo la influencia de fuerzas en alguna relación definida (Johansen-Bertoglio, 2012).

El análisis estructural del sistema de gestión del agua se generó a través de la herramienta de MICMAC. Esta es una herramienta basada en el método del análisis estructural, diseñado para enlazar ideas. Este permite describir el sistema gracias a una matriz que integra a todos sus elementos constitutivos. Por lo tanto, estudia las relaciones con la finalidad de encontrar las variables influyentes, dependientes y esenciales para entender su evolución y predecir su comportamiento a futuro (Zepeda *et al.*, 2017).

Mediante la herramienta de MICMAC se generaron tres matrices las cuales son: Matriz de Influencia Directa (MID), Matriz de Influencia Indirecta (MII) y Matriz de Influencia Total (MIT). La primera permite llevar a cabo el proceso de comparación mediante matrices cruzadas, es decir, la influencia directa que tiene una variable sobre otra (Zepeda *et al.*, 2017). La MII indica cual es la relación y conocer la secuencia de una variable con otra dentro del sistema y se ingresó un número máximo de tres interacciones para realizar el algebra de matrices. La MIT muestra los valores resultantes de la suma de la MII y de la Matriz Resultado MR (división de la MII entre su valor más alto, estandarizando los valores de "0" a "1"), obteniendo el peso específico de cada variable (Zepeda *et al.*, 2017).

El objetivo del método MIMAC es identificar las variables más motrices y dependientes, construyendo así una tipología de las variables mediante clasificaciones directas e indirectas (Manzano *et al.*, 2019). En el punto medio genera cuatro cuadrantes para realizar clasificación de la relación influencia-dependencia de las variables. Este gráfico nombrado también como plano de motricidad, se divide en cinco secciones:

- Entrada: Influyen sobre las otras variables del resto del sistema, pero ninguna variable influye sobre ellas, estas son impulsoras de la dinámica del sistema y su comportamiento influye en los demás componentes del sistema.

- **Enlace:** Influye sobre otras variables principalmente de las de salida y a su vez reciben una considerable influencia de otras variables del mismo sistema sobre todo de las de entrada. Son inestables ya que su comportamiento puede ser influenciado por distintas variables de forma directa o indirecta o mediante ciclos de retroalimentación.
- **Pelotón:** Son variables que no se puede definir claramente como influyentes o dependientes, por lo cual no pertenecen a los grupos de variables anteriores.
- **Salida:** Son dependientes del comportamiento de las variables de entrada y enlace y poco influyentes en el comportamiento de alguna otra variable.
- **Excluidas:** No tienen influencia considerable sobre el resto de los componentes del sistema y expresan poca dependencia por lo que cualquier acción sobre ellas no repercute en el sistema y viceversa.

Incluye las variables clave (entrada, enlace, salida) definidas como aquellas que permiten reducir la complejidad del sistema ante un amplio número de variables involucradas, pero conservando una estructura que permita analizar su dinámica (Figura 2) (Godet, 1993). Y las que se clasifican y no son consideradas para su seguimiento y monitoreo (excluidas, pelotón).

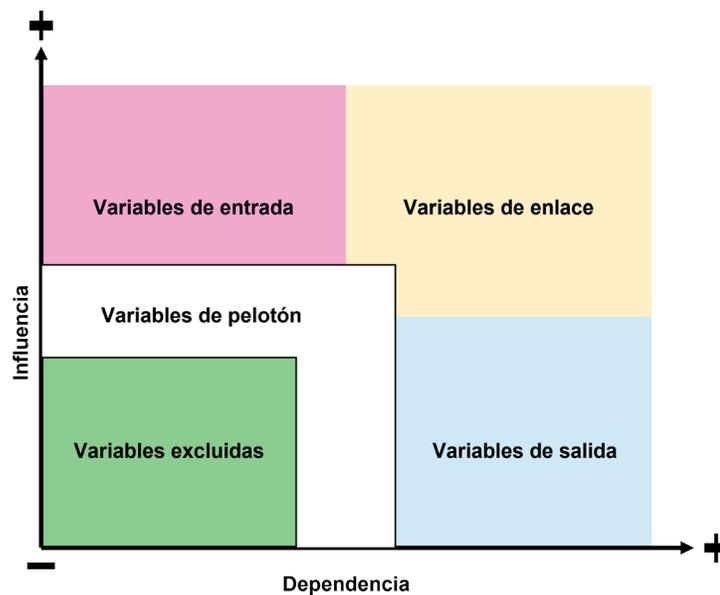


Figura 2 | Plano de motricidad. Fuente: Elaboración propia.

El desarrollo metodológico de la investigación se dividió en tres fases: en la primera; se propusieron las Áreas Estratégicas de Planeación y Articulación (AEPA) que comprendieron la problemática del área de estudio; así como también se identificaron indicadores que permitieron conocer el estado actual de los recursos a través de la cuantificación de variables y la construcción de escenarios futuros para que pueda ser más eficiente a toma de decisiones frente a la problemática actual hídrica. En la segunda; se realizó la comparación mediante una matriz cruzada de cada uno de los indicadores evaluando su relación. Y finalmente en la tercera; se analizó la tendencia espacial y se generó cartografía que permitió modelar la situación del recurso hídrico en la microcuenca migrando la información a una plataforma *web-mapping*. Dichas fases se pueden observar en la Figura 3.

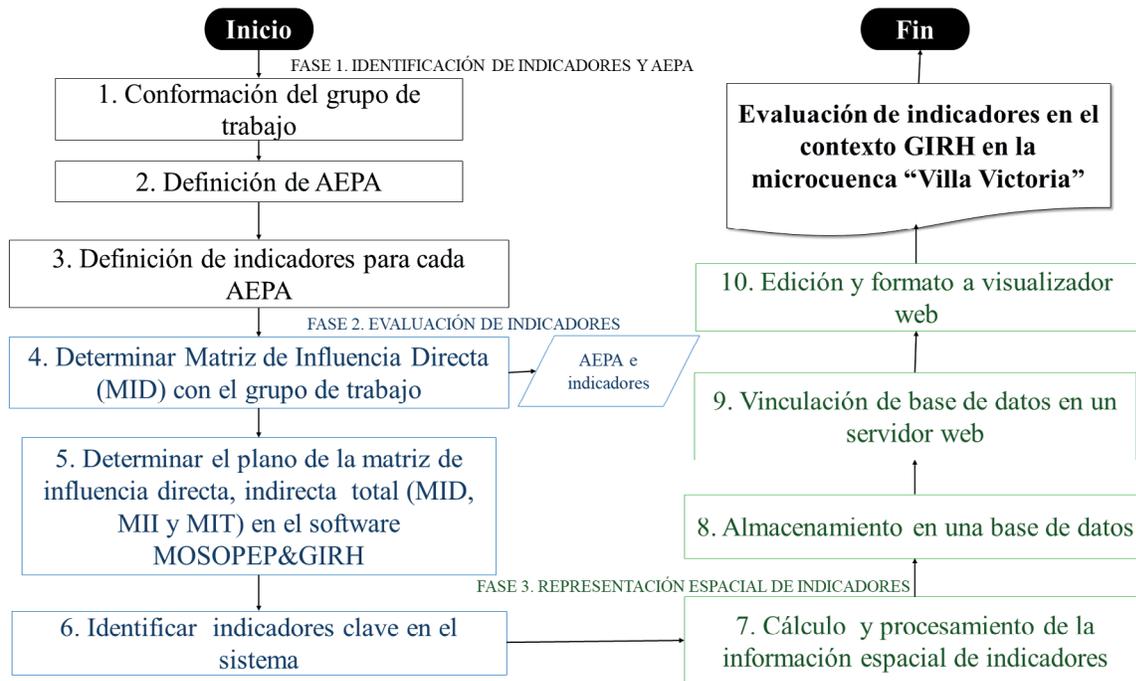


Figura 3 | Diagrama general de la metodología. Fuente: Elaboración propia.

Fase uno: Identificación de AEPA e indicadores

Analizar la problemática hídrica de la microcuenca, fue importante para iniciar con la fase 1 y a su vez en el proceso para la GIRH, debido a que de esta forma se pudo caracterizar la situación actual y se dedujeron los ajustes que son necesarios en el futuro (Díaz *et al.*, 2011). En esta fase se definieron las AEPA (Áreas Estratégicas de Planeación y Articulación) o bien áreas críticas de análisis y resultados, que son unidades temáticas de gestión, que facilitan promover y consolidar el trabajo. Uno de sus propósitos es comprender de forma global la problemática, identificando los temas que las caracterizan (Díaz *et al.*, 2011).

El sistema de indicadores se definió mediante el esquema PEIR, que es una herramienta metodológica que actúa como constructor del conocimiento y es útil para el diseño, implementación y evaluación de políticas públicas. Estos expresan vínculos de causa y efecto entre los diferentes factores que intervienen en la solución de un problema, proporcionando información útil para mejorar el conocimiento de la cuenca al verla como un sistema además de la construcción de consensos en torno a los objetivos y metas para intervenir en los procesos y con ella organizar y generar información para diagnosticar, evaluar y dar seguimiento a los resultados derivados (Díaz *et al.*, 2009). Los indicadores de este sistema son: 1) estado ¿Qué está pasando? (condiciones ambientales); 2) presión: responde a la pregunta ¿Por qué está pasando? (causas); 3) impacto ¿Cuáles son las consecuencias? (en temas de salud, economía, sociedad y ecología); 4) respuesta ¿Cuál es y cuál debería ser la respuesta?

La fase uno se definió a través de talleres con los actores clave del área de estudio los cuales fueron: Dirección de Agua Potable y Saneamiento de Villa Victoria, además, de la Comisión de Cuenca Villa Victoria – San José del Rincón. Debido a que según el artículo 15 de la Constitución Política Mexicana el municipio es el encargado de suministrar agua potable a sus habitantes. Así mismo, en la Ley de Aguas Nacionales en el artículo 13° señala que la comisión de cuenca es el encargado de discutir las estrategias, prioridades, políticas, líneas de acción, en mejora de aspectos relativos a la GIRH y coadyuvar en la vigilancia del cumplimiento del Plan Hídrico de la Cuenca hidrológica.

Se realizaron tres talleres; en el primero se definió la misión, visión, y valores, con la finalidad de crear la perspectiva futura, de lo que se desea y puede alcanzar a cumplir en forma exitosa; en el segundo se caracterizó la situación actual de la microcuenca

“Villa Victoria”. Y finalmente en la tercera, se definieron las AEPAs y los indicadores en el esquema PEIR planteados en un árbol de problemas con el grupo de trabajo (Figura 4).

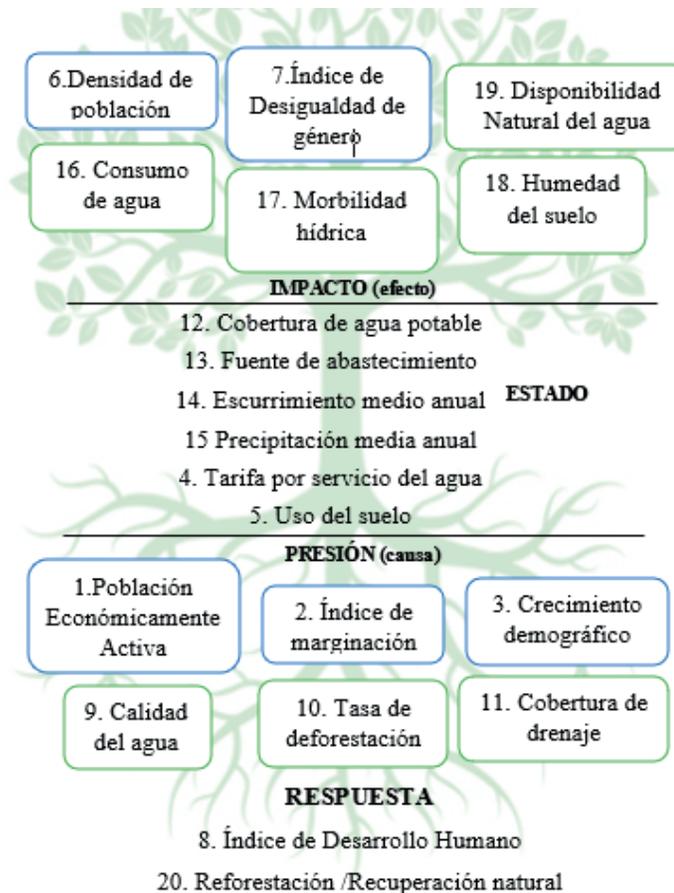


Figura 4 | Árbol de problemas. Fuente: Elaboración propia.

Fase dos: Evaluación de indicadores

El proceso de evaluación de indicadores se realizó con la finalidad de describir el comportamiento del sistema, mediante el apoyo de una matriz que integra todos los indicadores involucrados. Desarrollado a través de la herramienta MICMAC, incluida en software de MoSoPEP-GIRH & CMI, cuyo objetivo fue encontrar las variables con mayor influencia y dependencia, que permitieron entender la evolución del sistema.

En el software MoSoPEP-GIRH & CMI, se describió cada indicador (concepto, unidad de medida y objetivo), posteriormente se realizó un proceso de comparación, mediante un consenso con el grupo de trabajo, mediante una MID. Esta permitió llevar a cabo un proceso de comparación mediante matrices cruzadas, con la pregunta ¿la variable del eje X, tiene influencia directa sobre la variable del eje Y? Si tenía influencia se colocaba el número “1” y en caso contrario se colocaba el número “0”. Una vez terminada la comparación con el grupo de trabajo se procesó la información en el software, para obtener las siguientes gráficas: MID MII, MIT.

El grupo de trabajo realizó el proceso de evaluación de indicadores. Este estuvo conformado por expertos en temas en ciencias del agua, que forman parte del Sistema Nacional de Investigadores por la Universidad Autónoma del Estado de México y que conocían la problemática situacional de la microcuenca. Es importante señalar que la conformación del grupo de trabajo sirvió

para iniciar con un proceso de planeación estratégica, la cual, según Morrisey (1996) lo describe como la unión del pensamiento intuitivo y el analítico que da lugar a las proyecciones de las posiciones futuras que se desea lograr a partir de los cuales, el grupo de trabajo es esencial para iniciar con el proceso de planeación estratégica con el enfoque GIRH.

Fase tres: Representación espacial de indicadores

La fase tres, permitió representar espacialmente la situación del recurso hídrico de la microcuenca “Villa Victoria”. Dicha representación se generó a través de cuatro procesos: el primero fue el cálculo y procesamiento de la información espacial de los indicadores clave a través de ArcGIS Pro con herramientas de gestión de datos y de análisis espacial; el segundo fue su almacenamiento en una base de datos geoespacial; el tercero fue la vinculación de la base de datos en un servidor web y en el cuarto se le dio edición y formato al visualizador web.

Para el proceso referente al cálculo y procesamiento de la información espacial fue necesario documentar cada uno de los indicadores en cuanto a los conceptos y variables que involucran, así como su expresión matemática, necesarios para su cálculo y factibilidad para obtener los resultados en un entorno de Sistemas de Información Geográfica SIG, a través del software ArcGIS. Posteriormente se almacenaron en una base de datos geoespacial con la finalidad de almacenar atributos que permitan visualizar los datos en un mapa.

La base de datos geoespacial se vinculó en el software ArcGIS online, el cual está basado en la nube para crear y compartir mapas web interactivos. Al resultado de este proceso se le dio edición y formato para su posterior consulta. Finalmente, es importante destacar que su principal función fue la difusión de la información, de una forma fácil para cualquier usuario, haciendo más complementario y explícito la ubicación e indicadores para atender las problemáticas presentes. Además, de que esta información se pueda proyectar a futuro y los tomadores de decisiones puedan realizar una gestión sostenible del agua en la microcuenca.

RESULTADOS

Identificación de AEPA e indicadores

Se identificaron dos AEPA, las cuales fueron hidrológico ambiental y socioeconómica, debido a que tienen los aspectos estratégicos más críticos y relevantes que acontecen en la microcuenca Villa Victoria- San José del Rincón además se enfocaron en aspectos del futuro y con factores que lleven a un desarrollo positivo. La primera, articula y se relaciona con el entorno en el que están inmersos los recursos naturales y su uso, también considera factores como las características fisiográficas del área de estudio. Mientras que la segunda orienta la planeación, mejora de las condiciones de la población, así como la organización, la participación, la equidad, los bienes y servicios, finanzas entre otras.

De cada AEPA se definieron indicadores PEIR, dando como resultado 30 indicadores, con los que se efectuó una evaluación con el grupo de trabajo (segregando a aquellos en los cuales no se dispusieron datos para su cálculo, al momento de desarrollo de la investigación). Resultado de este proceso se obtuvieron 20 indicadores para trabajar. Resaltando que el grupo de trabajo estuvo conformado por ocho expertos en GIRH y de esta manera evitar algún sesgo.

Tabla 1 | Indicadores en el sistema PEIR.

AEPA SOCIOECONÓMICA				
Indicador	Concepto		Unidad de medida	Fuente de información y/o fórmula.
Presión				
1	Población Económicamente Activa	Personas de 12 años o más que tienen trabajo o buscaron trabajo (INEGI,2020).	Número de personas	Censo de población y vivienda INEGI (2020)

(Tabla 1, continúa en la página siguiente)

(Tabla 1, continúa de la página anterior)

AEPA SOCIOECONÓMICA			
Indicador	Concepto	Unidad de medida	Fuente de información y/o fórmula.
2	Índice de marginación	Fenómeno estructural y multidimensional expresado en la distribución desigual del progreso en la estructura productiva y la exclusión social. En otras palabras, la carencia de oportunidades sociales y la ausencia de capacidades para adquirirlas, así como la inaccesibilidad a bienes y servicios (CONAPO, 2015)	Muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto (0-1) $IM = \frac{\sum_{i=1}^9 I_{ij}}{9}$ <i>IM</i> : valor del índice de marginación de la unidad geográfica <i>i</i> , e. <i>I_{ij}</i> = es el valor del <i>j</i> -ésimo indicador de la unidad geográfica <i>i</i> . (CONAPO, 2015)
3	Crecimiento demográfico	El crecimiento demográfico es un fenómeno social que forma parte de la dinámica de la población. Es el ritmo al que la población aumenta o disminuye durante un período dado, debido al efecto de la natalidad, la mortalidad y las migraciones (CEPAL, 2018).	No. Habitantes por año $TCP = ((Pob\ i/f)^{1/5} - 1)(100)$ <i>TCP</i> : Tasa de crecimiento poblacional <i>Pob i</i> : Población inicial <i>Pob f</i> : Población final (INEGI, 2020)
Estado			
4	Tarifa por el servicio de agua	Precio unitario autorizado que pagan los usuarios por el servicio de agua potable (Ley del agua para el Estado de México y municipios, 2013).	\$ Censo de población y vivienda (INEGI, 2010)
5	Uso de suelo	Ocupación de una superficie determinada que representa un elemento fundamental para el desarrollo que conforma su estructura urbana o rural (PAOT, 2013).	km ² (INEGI, 2017)
Impacto			
6	Densidad de población	Medida de distribución de población (Es el número de habitantes por unidad de superficie existente en la unidad espacial de referencia) en el área de estudio (León, 2015).	habitantes/km ² <i>DP</i> = población / superficie <i>DP</i> = Densidad de población
7	Índice de desigualdad de género	Desventaja que pueden experimentar las mujeres respecto de los hombres en tres dimensiones: salud reproductiva, empoderamiento y mercado laboral (PNUD, 2014).	Muy alto, alto, medio y bajo (0-1) Consejo Nacional de Población
Respuesta			
8	Índice de desarrollo humano	Es un índice compuesto en tres dimensiones básicas del desarrollo humano: la capacidad de tener una vida larga y saludable, la capacidad de adquirir conocimientos y la capacidad de lograr un nivel de vida digno (PNUD, 2014).	Muy alto, alto, medio y bajo (0-1) $IDH = (IS + IE + IIPC) / 3$ <i>IS</i> : Índice de sobrevivencia. <i>IE</i> : Índice de escolaridad <i>IIPC</i> : Índice de ingresos per cápita
AEPA HIDROLÓGICA AMBIENTAL			
Presión			
9	Calidad de agua	Características y/o parámetros fisicoquímicos y biológicos del recurso hídrico que determinan su calidad (Castillo <i>et al.</i> 2017).	Muy mala, mala, media, buena, excelente Sistema Nacional del Agua
10	Tasa de deforestación	La reducción de la superficie arbórea, que implica la pérdida de cobertura forestal a largo plazo o permanente. Puede ser causada y mantenida por una perturbación continua inducida por el ser humano o natural (Schoene <i>et al.</i> , 2007).	km ² /año Comisión Nacional Forestal
11	Cobertura de drenaje	Porcentaje de viviendas habitadas, conectadas a una red de alcantarillado (INEGI, 2020).	% Censo de población y vivienda 2020 (INEGI, 2020)
Estado			
12	Cobertura de agua potable	Porcentaje de viviendas habitadas con disponibilidad y acceso a agua potable (INEGI, 2020).	% Censo de población y vivienda (INEGI, 2020)
13	Fuente de abastecimiento	Fuentes de abastecimiento de agua potable del área de estudio.	Número Censo de población y vivienda (INEGI, 2020)
14	Escorrentamiento medio anual	Volumen medio anual de agua que en forma natural que proviene de una cuenca hidrológica, subcuenta o microcuenca (NOM-011-CONAGUA, 2015)	mm (INEGI, 2020)

(Tabla 1, continúa en la página siguiente)

(Tabla 1, continúa de la página anterior)

AEPA SOCIOECONÓMICA																				
Indicador	Concepto	Unidad de medida	Fuente de información y/o fórmula.																	
15	Precipitación media anual	Cantidad de agua en forma de lluvia, nieve, aguanieve y granizo que llega a la superficie (Breña, 2004).	mL	(CONAGUA, 2020)																
Impacto																				
16	Consumo de agua	Volumen de agua utilizado para todos los fines domésticos habituales, incluidos el consumo, el baño y la preparación de alimentos (OMS, 2018)	m ³	$Consumo = C_{zr} + C_{zm} + C_{zp}$ $C_{zr} = \text{Población zona residencial} * a$ $C_{zm} = \text{Población zona media} * b$ $C_{zp} = \text{Población zona popular} * c$																
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Temperatura del área de estudio C°</th> <th>a</th> <th>b</th> <th>c</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>>22</td> <td>400</td> <td>230</td> <td>185</td> </tr> <tr> <td>18≤22</td> <td>300</td> <td>205</td> <td>130</td> </tr> <tr> <td><18</td> <td>250</td> <td>195</td> <td>100</td> </tr> </tbody> </table>			Temperatura del área de estudio C°	a	b	c	>22	400	230	185	18≤22	300	205	130	<18	250	195	100
Temperatura del área de estudio C°	a	b	c																	
>22	400	230	185																	
18≤22	300	205	130																	
<18	250	195	100																	
17	Morbilidad hídrica	Presencia de enfermedades o discapacidades causadas por el agua en un individuo o población. Esta se puede medir por incidencia o prevalencia. La incidencia se refiere a la aparición de una enfermedad y la prevalencia a la presencia de la enfermedad (WHO, 2017).	Número	Secretaría de Salud de México																
18	Humedad en el suelo	Agua contenida en la parte no saturada del suelo (entre la superficie del suelo y el nivel del agua subterránea) (Lobato, 2015)	%	INEGI																
19	Disponibilidad natural del agua	Es el volumen de agua superficial y subterránea que se renueva por medios naturales (SEMARNAT, 2012).	m ³ /hab/año	INEGI																
Respuesta																				
20	Reforestación/Regeneración natural	La reforestación es un conjunto de acciones que se llevan a cabo para recuperar la salud, estructura y función de la superficie forestal, mientras que la recuperación natural es la capacidad del bosque para regenerarse (SEMARNAT, 2018).	km ² /año	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad																

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 1 se describen los 20 indicadores PEIR. Estos permitieron obtener una valoración cuantitativa o cualitativa del sistema de GIRH en la microcuenca. Cabe destacar que estos se utilizaron para diagnosticar y evaluar en el contexto espacial del área de estudio y fueron obtenidos a partir de los talleres antes mencionados con los actores clave del área de estudio.

Evaluación y representación espacial de indicadores

La evaluación de los indicadores determinantes en el sistema se efectuó mediante el llenado de la MID. La cual permitió llevar a cabo el proceso de comparación mediante matrices cruzadas. La MID que se observa en la Figura 5, fue resultado de la comparación y multiplicidad de respuestas que dieron el grupo de trabajo. Se planteó bajo la siguiente cuestión ¿el indicador del eje x tiene influencia directa con el indicador del eje y? Se considera como "0" (sin relación) o "1" (con relación).

El gráfico resultante de la MID se aprecia en la Figura 6. Este permite visualizar las interacciones de los indicadores involucrados en el sistema y permite evaluar su relación entre ellos. Los indicadores que tienen una mayor relación sobre los demás son: cobertura de agua potable y crecimiento demográfico, que son los que tienen el mayor número de influencia y dependencia. Por lo cual, implican y corresponden a los retos del sistema para propiciar su cambio y llegar a un nivel óptimo. Por otra parte, es importante señalar que la dirección de las flechas indica cual es la relación entre variables de forma directa o indirecta, visualizándose en el sentido que marca la flecha.

Los indicadores que influyen directa e indirectamente en el crecimiento demográfico son: la población económicamente activa, índice de marginación, uso de suelo, densidad de población, el índice de desigualdad de género, el índice de desarrollo

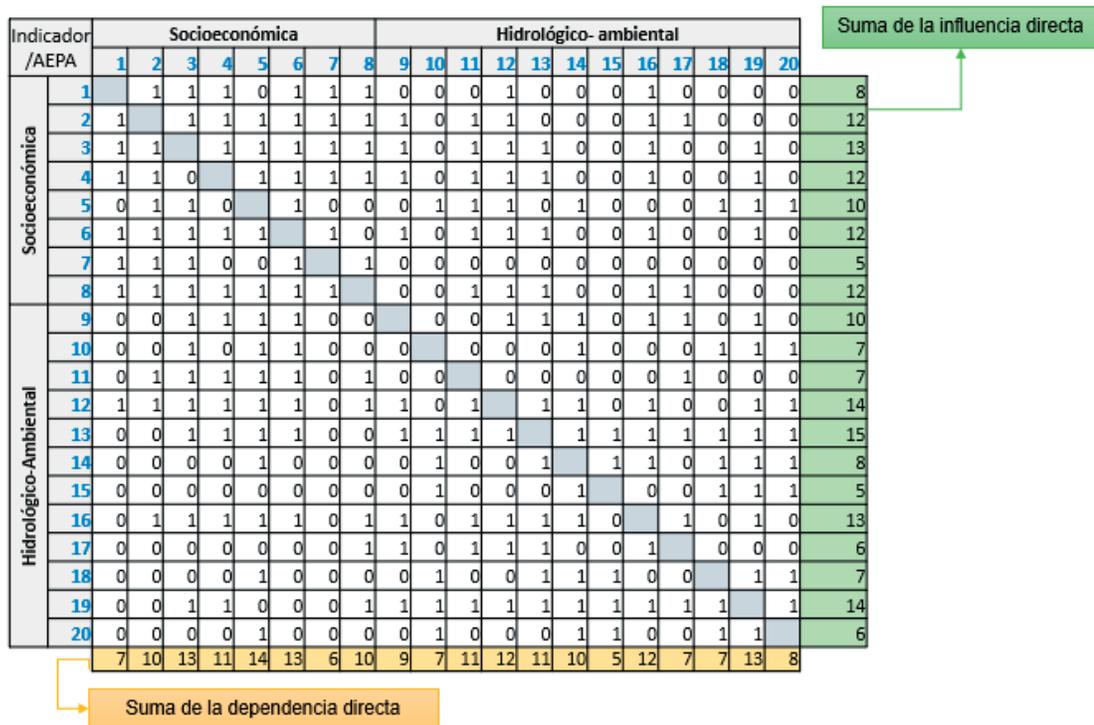


Figura 5 | Matriz de Influencia Directa. Fuente: Elaboración propia.

humano, la tasa de deforestación, cobertura de agua y drenaje y finalmente el consumo de agua. Mientras que en el indicador de cobertura de agua potable tiene una relación influyente con el índice de marginación, el uso de suelo, el índice de desarrollo humano, el consumo de agua y la morbilidad hídrica y dependiente con el crecimiento demográfico, la tarifa por servicio del agua, la densidad de población, la calidad del agua, las fuentes de abastecimiento y la disponibilidad natural del agua (Figura 6).

Como parte de los resultados correspondientes se observa que el sistema tiene un comportamiento inestable (Figura 7). Debido a que no se encuentran indicadores de entrada que son determinantes, impulsores y propulsores en la dinámica del sistema, en otras palabras, ninguna variable influye sobre ellos y su comportamiento afecta en los demás componentes del sistema (no son modificables por factores internos). A su vez, se encontraron 11 indicadores enlace (índice de marginación, crecimiento demográfico, tarifa por servicio de agua, uso de suelo, densidad de población, índice de desarrollo humano y calidad del agua) que son por naturaleza inestables, ya que su comportamiento puede ser influenciado por distintas variables de forma directa, indirecta o mediante ciclos de retroalimentación. Por lo cual, no pueden anticiparse con un cierto grado de certeza, volviendo inestable al sistema. Por otro lado, la cobertura de drenaje que es una variable de salida muy dependiente y bajamente influyente que requiere seguimiento y monitoreo. Además, este es muy sensible a la evaluación de las variables de enlace.

Los indicadores de: morbilidad, tasa de deforestación, humedad del suelo, reforestación/ recuperación natural del suelo, Índice de Desigualdad de Género, precipitación media anual, población económicamente activa y el escurrimiento medio anual. No detienen la evolución del sistema, pero tampoco permiten obtener ninguna ventaja de este, es decir, no tienen influencia considerable sobre el resto de los componentes del sistema y expresan poca dependencia. Lo cual implicó que las variables se excluyeran debido a que cualquier acción sobre ellas no repercute en el sistema y viceversa.

Se identificaron 12 indicadores claves que son: índice de marginación, crecimiento demográfico, tarifa por servicio del agua, uso de suelo, densidad de población, índice de desarrollo humano, calidad del agua, cobertura de drenaje, cobertura de agua potable, fuente de abastecimiento y consumo de agua. Los cuales se representaron espacialmente a través de mapas, que se

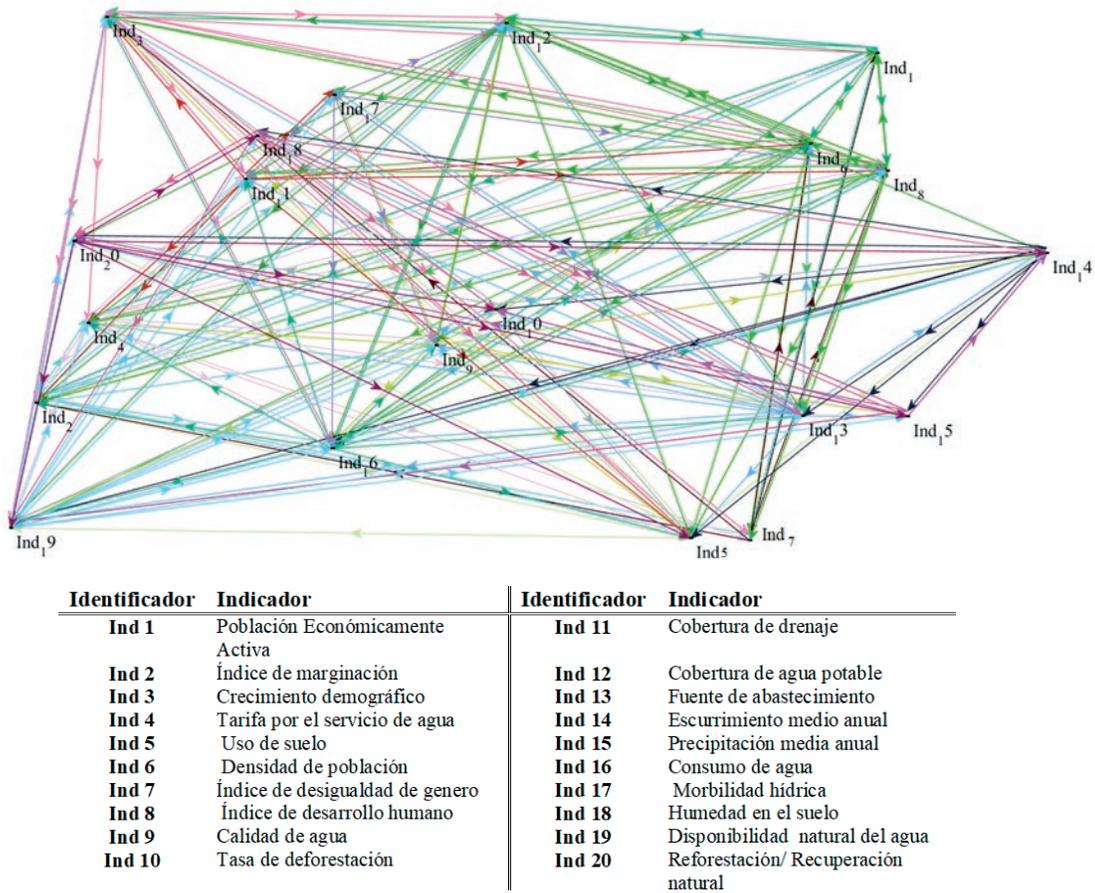


Figura 6 | Gráfico de la Matriz de Influencia Directa. Fuente: Elaboración propia.

encuentran publicados en la página <https://arcg.is/mz0Wa>. La escala temporal va del año 2015 al 2020 por localidad o municipio según corresponda el acceso y la información obtenida más reciente.

DISCUSIÓN

El análisis estructural, en la microcuenca “Villa Victoria”, fue una herramienta esencial para reducir la complejidad y conocer la dinámica del sistema GIRH, a través de indicadores clave. Los cuales fueron: índice de marginación, tarifa por servicio del agua, uso de suelo, densidad de población, índice de desarrollo humano, calidad del agua, fuentes de abastecimiento, consumo de agua, disponibilidad natural del agua, cobertura de drenaje, cobertura de agua potable y crecimiento demográfico. Estos reflejaron, que la población se ve marcada por desigualdades sociales que reflejan pobreza además un índice de marginación alto que exacerba la desigualdad social en la distribución de servicios como por ejemplo la cobertura de agua potable y drenaje, a su vez el crecimiento poblacional también funge como componente fundamental que agrava la insuficiencia en la prestación de servicios. En general, una inadecuada administración de este líquido vital que desencadena insuficiencia en su abastecimiento y calidad.

Los indicadores clave más dependientes e influyentes y por consiguiente más altas en el sistema GIRH que fueron: la cobertura de agua potable y el crecimiento poblacional, por lo que las decisiones tomadas sobre ellas perturban a otras variables clave como el índice de marginación que es un indicador de presión y que presenta las condiciones más desfavorables en el sistema, la tarifa por servicio de agua, el índice de desarrollo humano y el consumo doméstico de agua. Por otra parte, el indicador de cobertura de drenaje se determinó como una variable de salida que es muy dependiente y poco influyente y la cual se debe abordar

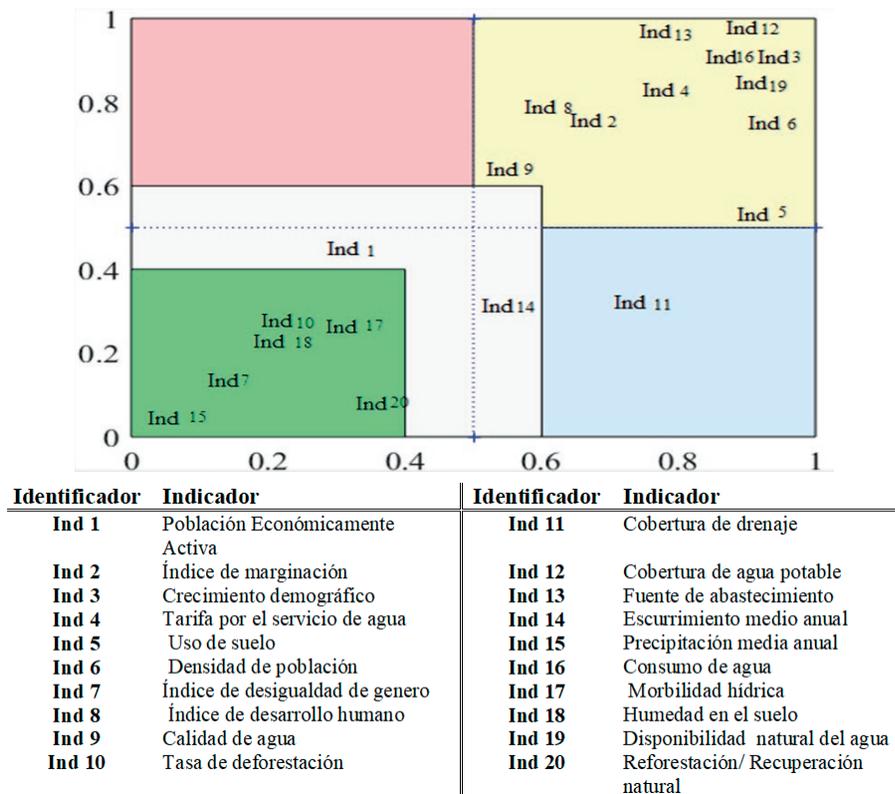


Figura 7 | Plano de Influencia y dependencia de la Matriz de Influencia Total. Fuente: Elaboración propia.

a través de los indicadores del crecimiento demográfico, tarifa por servicio de agua, disponibilidad natural del agua e índice de marginación. Dichos indicadores, enmarcan grandes retos para la gobernanza, e indican la necesidad de acciones reactivas o preventivas que mitiguen o prevengan los problemas relacionados con el agua. Sin embargo, es un gran desafío la transformación sistemática y coordinada para disminuir la alta carencia de oportunidades sociales, aunado a la inaccesibilidad de bienes y servicios.

Una buena gobernanza es una condición previa para la implementación de estrategias que equilibren las necesidades competitivas de sostenibilidad ambiental, crecimiento económico y equidad en el acceso. Esta fungiría, como un elemento fundamental en la microcuenca "Villa Victoria" para la planificación y asignación de recursos entre los municipios ribereños y esta es vital para minimizar la marginación con el fin de equilibrar las necesidades de los diferentes grupos que comparten los recursos hídricos. Para lo cual es importante la participación tanto del gobierno, así como de los diferentes actores en la toma de decisiones.

Por otra parte, es importante añadir que los retos GIRH, en el área de estudio se relacionan con encontrar esquemas alternativos para los servicios de saneamiento y acceso del agua potable. Estos pueden consistir en un saneamiento sostenible mediante baños secos y biofiltros en las viviendas para aguas grises además de la captación de agua de lluvia, lo cual beneficiaría a la población y restaría control centralizado al municipio, así mismo la disminución de sus ingresos y al mismo tiempo exigiría responsabilidad de cada usuario para instalar y mantener sus sistemas de saneamiento. Ya que las deficiencias en la prestación de servicios según el Plan de Desarrollo Municipal (2018), se deben a la dispersión de la población y las pendientes abruptas que presenta el territorio, por lo que introducir infraestructura hidráulica sería costoso.

La cosecha de lluvia coadyuvaría en la agricultura, ya que puede ser fundamental para el buen aprovechamiento del agua ya que la captura y almacenamiento evitan desperdicios y el drenaje de las tierras elimina la acumulación de cantidades excesivas de agua y evita consecuentemente los daños producidos en los cultivos y los suelos. Destacando que en el área de estudio el 68.53% del uso de suelo de su superficie es agrícola. Sin embargo, existen limitaciones para su implementación ya que sus ejecuciones

dependen de la voluntad política y el interés de la población en efectuarlos. Además, otro factor restrictivo es la aguda falta de financiamiento y los largos plazos de ejecución.

CONCLUSIONES

La GIRH actualmente es esencial dentro de los distintos sectores que integran la sociedad, por lo que emplear herramientas que permitan evaluar indicadores de la microcuenca, permitirá conocer el comportamiento de la dinámica social, económica, ambiental, etc. Además, con la participación social e incorporando los puntos de vista de los tomadores de decisiones, así como de los habitantes afectados. Este puede fungir como una herramienta, que les sirva para analizar, opinar, proponer alternativas a la solución de conflictos y problemas en sus comunidades, consolidando los sistemas gobernanza, que atiendan las necesidades y desafíos que presenta la GIRH en el área de estudio.

El análisis estructural, mediante la herramienta MICMAC, fue fundamental para identificar a los indicadores que constituyen el sistema GIRH en la microcuenca. De esta forma se identifican con certeza los que tienen mayor importancia dentro del sistema, simplificando los puntos estratégicos de acción que se pueden tomar para mejorar las condiciones de calidad de vida de la población local.

Dichos indicadores son ampliamente utilizados en la GIRH, para conocer la dinámica de un sistema, en donde también se analizan escenarios para poder evaluarlos y proponer estrategias, proyectos, programas y acciones para atender las necesidades actuales de las cuencas que son un eje fundamental para el proceso de planeación estratégica. Estos, representaron una alternativa que gestiona la información y que además permite mejorar y contribuir con exactitud la localización y estado de cada uno, los cuales se pueden proyectar hacia futuro y con ello para atender las necesidades actuales de las cuencas que son un eje fundamental para el proceso de planeación estratégica. Es importante resaltar que se puede emplear de manera adaptativa en otras regiones, microcuencas o cuencas hidrográficas.

La representación espacial de indicadores clave mostrada en un visualizador web, es una herramienta que se puede emplear de manera adaptativa. Esta, puede ser un canal de información y participación para las comunidades. De esta manera, se podrán atender las necesidades y desafíos que presenta la GIRH el área de estudio. Sin embargo, es importante mencionar que, para su éxito en la implementación, es necesario la voluntad política y participación ciudadana.

Existen otros portales web espaciales como el de INEGI, o el Sistema Nacional de Agua, sin embargo, la información es para consultas a nivel nacional, no se muestra a nivel localidad, ni indicadores importantes que intervienen en la GIRH como (tasa de crecimiento poblacional, cobertura de agua, drenaje, índice de desarrollo humano, fuentes de abastecimiento de agua, etc.) en el área de estudio. El visualizador web creado en el presente trabajo, puede fungir como un instrumento crucial dentro de la GIRH en la microcuenca Villa Victoria, ya que es un canal de difusión de la información, que permite analizar, evaluar y monitorear indicadores para mejorar e impulsar estrategias, así como programas y proyectos públicos.

Finalmente, la evaluación de indicadores en el esquema PEIR, implicó utilizar mecanismos de valoración sistemáticos de los recursos hídricos disponibles, que aseguraran un instrumento de información del recurso. Con el cual se comprenda el funcionamiento de los indicadores clave mencionados que influyeron en el proceso GIRH en la microcuenca “Villa Victoria” para que los actores involucrados puedan asegurar y tomar decisiones acertadas, así como emplear esta herramienta acorde a sus necesidades, aceptando consecuentemente la responsabilidad de sus acciones que se toman con respecto a la gestión del recurso.

REFERENCIAS

- Batalla, R., Sala, M. 1999. *Teoría y métodos en Geografía Física*. Síntesis, México.
- Breña, A.P., 2004. *Precipitación y recursos hidráulicos en México*. Ciudad de México, México.

- Castillo, B.E., Gervacio, H.J., Bedolla, R.S., García, Y.B., Mendoza, E.A. 2017. Evaluación de la calidad del agua en el canal meádrico lagunar de Coyuca de Benítez, Gro. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 4(5), 57-59.
- CEPAL. 2018. *Migración Internacional. Observatorio demográfico de América Latina*. Observatorio Demográfico, Santiago Chile.
- CONAGUA. 2004. *Determinación la disponibilidad del agua en Villa Victoria y Valle de Bravo, Estado de México*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103132/DR_1501.pdf
- CONAGUA. 2011. *Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento*. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/situacion-del-subsector-agua-potable-drenaje-y-saneamiento#:~:text=Situaci%C3%B3n%20del%20Subsector%20Agua%20Potable%2C%20Drenaje%20y%20Saneamiento.,donde%20acceder%20a%20los%20servicios%20resulta%20m%C3%A1s%20complicado>.
- CONAGUA. 2022. *Precipitación*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/pronostico-climatico/precipitacion-form>
- CONAPO. 2015. *Índice de marginación por entidad federativa y municipios 2015*. <https://www.gob.mx/conapo/documentos/indice-de-marginacion-2015-284579>
- CONEVAL. 2015. *Pobreza a nivel municipio 2010 y 2015*. <https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Pobreza-municipal.aspx#:~:text=En%20711%20municipios%20los%20niveles%20de%20pobreza%20disminuyeron,municipios%2C%20mientras%20que%20aument%C3%B3%20en%202012%20municipios.%202>
- Díaz, D.C., Esteller, M.V., Velasco, C.A., Martínez, V.J., Arriaga, J.C.M., Vilchis, F.A.Y., Manzano, S.L.R., Colín, M.M., Miranda, J.S., Uribe, C.M.L.W., Peña, H.A. 2009. Guía de planeación estratégica participativa para la gestión integrada de los recursos hídricos de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago. UAEMex, México.
- Díaz, C., Esteller, M., Velasco, A., Arriaga, C., Martínez, J., Colín, M.,... Ramírez, J. 2011. Resultados preliminares de la implementación de la guía de planeación estratégica participativa para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago. En: *Retos de la investigación del agua en México* (Ú. Oswald, ed.). México, 573-582.
- DOF. 1917. *Constitución política de los estados unidos mexicanos*. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/>
- Gerlak, A.K., Varady, R.G., Petit, O., Haverland, A.C. 2011. Hydrosolidarity and Beyond: Can Ethics and Equity Find a Place in Today's Water Resource Management? *Water International*, 36(3), 251-255. <https://doi.org/10.1080/02508060.2011.586552>
- Giordano, M., Shah, T. 2014. From IWRM back to integrated water resources management. *International Journal of Water Resources Development*, 30(3), 364-376. <https://doi.org/10.1080/07900627.2013.851521>
- Godet, M. 1993. *De la anticipación a la acción: manual de prospectiva y estrategia*. MARCOMBO, España.
- Godet, M. 2000. *La caja de herramientas de la prospectiva estratégica*. Laboratoire d'Investigation Prospective et Stratégique, Francia.
- GWP. 2008. *Principios de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos*. https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2011/10/principios_gestion_integrada_recursos_hidricos.pdf
- INEGI. 2010. *Censo de población y Vivienda 2010*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010>
- INEGI. 2017. *Uso de suelo y vegetación*. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo>
- INEGI. 2020. *Censo de población y Vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020>
- Johansen-Bertoglio, O. 2012. *Introducción a la teoría general de sistemas*. Limusa. Distrito Federal, México.
- León L.A. 2015. *Análisis Económico de la Población. Demografía*. Departamento Académico de Economía, Lambayeque, Perú.
- Ley de Agua para el Estado de México y Municipios. <https://legislacion.edomex.gob.mx/>.
- Ley de aguas Nacionales. <https://www.diputados.gob.mx/>.
- Lobato, R., 2015. *Estimación de humedad en el suelo con base en imágenes de satélite*, México.

- Manzano-Solís, L.R., Díaz-Delgado, C., Gómez-Albores, M.A., Mastachi-Loza, C.A., Soares, D. 2019. Use of structural systems analysis for the integrated water resources management in the Nenetzingo river watershed, México. *Land Use Policy*, 87(104029), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104029>
- Mojica, F.J. 2005. *La construcción del futuro: Concepto y modelo de prospectiva estratégica, territorial y tecnológica*. Ciencia y tecnología, Bogotá, Colombia.
- Morrisey, G. 1996. *Planeación estratégica*. Prentice - Hall Hispanoamericana, México.
- Norma Oficial Mexicana. 2015. NOM-011-CONAGUA-2015, Diario Oficial de la Federación.
- OMS. 2022. *Agua para consumo humano*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>.
- PAOT. 2013. *Boletín Jurídico PAOT*. <https://paot.org.mx/>.
- PNUD. 2014. *Indicadores de Desarrollo Humano y Género en México: nueva metodología*. <https://www.undp.org/es/mexico/publications/indicadores-de-desarrollo-humano-y-g%C3%A9nero-en-m%C3%A9xico-nueva-metodolog%C3%ADa>.
- Schoene D., Killmann W., Heiner von L., Mette L. 2007. *Definitional issues related to reducing emissions from deforestation in developing countries*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.
- SEMARNAT. 2012. *Compendio de estadísticas de la situación del medio ambiente en México*. Informe de la situación del medio ambiente en México, Ciudad de México, México.
- SEMARNAT. 2018. *Que es la restauración forestal*. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/que-es-la-restauracion-forestal?idiom=es>
- SMA. 2018. Descripción Estado de México. En: *Iniciativa ante el Cambio Climático en el Estado de México*. (B. Ordoñez, ed.). PIINCC, UNAM. México, 19-43.
- UNESCO. 2015. *Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015: agua para un mundo sostenible*. Perugia, Italia.
- WHO. 2017. *Monitoring health for the SDGs, Sustainable Development Goals*. Geneva, Francia.
- Zepeda, F. 2017. *El cuadro de mando integral como herramienta para la implementación, seguimiento y evaluación de los recursos hídricos* (tesis de doctorado). Universidad Autónoma del Estado de México.