

Resiliencia socioecológica y modelación dinámica de sistemas en sistemas acuáticos. Una revisión

Social-Ecological Resilience and System Dynamic Modeling in Aquatic Systems. A Review

David Ricardo Pedroza-Martínez^{a, c}, Julio Eduardo Beltrán-Vargas^b

RESUMEN

Este artículo de revisión busca identificar las tendencias presentes en la utilización de modelos de simulación dinámica como herramienta de estudio multidisciplinar de la resiliencia socioecológica en ecosistemas acuáticos. Las tendencias obtenidas de la revisión bibliográfica permiten reconocer la distribución geográfica, las dimensiones utilizadas en la construcción de los modelos, así como los enfoques de aplicación y las variables requeridas. Esta revisión fue elaborada a partir de la búsqueda sistemática de artículos relacionados en cuatro bases de datos, para un lapso de 10 años (2010-2020), a escala mundial. Como resultados se evidencia que, dentro de la clasificación establecida para los modelos de simulación dinámica, los modelos numéricos, predictivos y de eventos continuos muestran una tendencia de utilización mayor que los demás (entre el 50 y 70 %). De igual manera, frente a la resiliencia socioecológica los enfoques con mayor relación son el cambio climático, toma de decisiones y sustentabilidad; así mismo, se encontró que la mayor cantidad de publicaciones revisadas provienen de Europa (40 %), además de reconocer que para la construcción de modelos de simulación utilizados en el estudio de la resiliencia en ecosistemas acuáticos se utilizan preferentemente variables sociales, ecológicas y biofísicas, tanto de orden cuantitativo como cualitativo. Es por lo anterior, que se establece que los modelos de simulación dinámica asociados a la resiliencia socioecológica poseen un desarrollo temático orientado a la construcción de modelos mixtos que involucran variables multidimensionales para elaborar representaciones del fenómeno que permiten definir su comportamiento a escalas espacio-temporales distintas.

PALABRAS CLAVE: sistemas dinámicos; modelación; sustentabilidad; ecosistemas.

ABSTRACT

This review article seeks to identify trends in the use of dynamic simulation models as a tool for the multidisciplinary study of socioecological resilience in aquatic ecosystems. The trends obtained from the literature review allow us to recognize the geographic distribution, the dimensions used in the construction of the models, as well as the application approaches and the variables required. This review was elaborated from the systematic search of related articles in four databases, for a period of 10 years (2010-2020), worldwide. The results show that, within the classification established for dynamic simulation models, numerical, predictive and continuous event models show a higher utilization trend than the others (between 50 and 70 %). Likewise, with respect to socioecological resilience, the approaches with the greatest relationship are climate change, decision making and sustainability; likewise, it was found that the largest number of publications reviewed come from Europe (40 %), in addition to recognizing that for the construction of simulation models used in the study of resilience in aquatic ecosystems, social, ecological and biophysical variables, both quantitative and qualitative, are preferentially used. Therefore, it is established that the dynamic simulation models associated with social-ecological resilience have a thematic development oriented to the construction of mixed models that involve multidimensional variables to elaborate representations of the phenomenon that allow defining its behavior at different spatio-temporal scales.

KEY WORDS: dynamic systems; modeling; sustainability; ecosystems.

a Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Maestría en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental. Bogotá, Colombia. ORCID Pedroza-Martínez, D.R.: 0000-0003-2779-8094

b Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Grupo de Investigación INDESOS. Bogotá, Colombia. ORCID Beltrán-Vargas, J.E.: 0000-0002-9397-7894

c Autor de correspondencia: drpedrozam@correo.udistrital.edu.co

Introducción

La resiliencia socioecológica es evaluada para reconocer la capacidad potencial de un ecosistema para asumir una perturbación de orden humano o natural, sin alterar sus elementos o las relaciones que existen sí (Folke, 2016). Uno de los métodos utilizados para la estimación de la resiliencia es la modelación dinámica de sistemas, ya que con esto se puede generar la predicción y comprensión de fenómenos, para así establecer mecanismos que preservan los rangos de resiliencia a través del tiempo (Beltrán y Rangel-Churio, 2012). Sin embargo, estas herramientas requieren de precisión, además de la validación estadística de los resultados (Buchadas et al., 2017).

La aparición de perturbaciones que inciden sobre los sistemas acuáticos posibilitan el desarrollo de enfoques cuantitativos para evaluar la resiliencia del sistema, algunos de los enfoques utilizados carecen de descripciones enfocadas a las interrelaciones existentes entre los subsistemas que integran los ecosistemas (Liu, 2019). Por lo anterior, se considera que las interrelaciones entre los subsistemas son dinámicas y para caracterizar los procesos socioecológicos se debe reconocer la incidencia del tiempo sobre los elementos del sistema y sus cambios (Hannon y Ruth, 2014), además de involucrar condiciones referentes a las dimensiones espaciales, para así obtener una interpretación holística de los sistemas complejos (Cushman y McGarigal, 2019).

Por otra parte, la aplicación de la modelación dinámica de sistemas permite estimar la capacidad de resiliencia, a partir de realizar un análisis multifactorial a gran escala, donde se planifican y gestionan las condiciones contempladas dentro del sistema, para identificar los mecanismos de toma de decisiones necesarias para el manejo de los ecosistemas (Cuddington et al., 2013). Es por esto, que la modelación dinámica de sistemas es una herramienta de evaluación predictiva basada en ecuaciones que permiten describir niveles de transformación en un contexto real, a partir de la inclusión de las diferentes variables que inciden en la resiliencia socioecológica (Yue et al., 2011), lo que posibilita la explicación de fenómenos con una precisión considerable y una estimación adecuada de las relaciones entre las variables contempladas en cada sistema (Folke, 2016).

La resiliencia socioecológica se define como la capacidad que poseen los sistemas de adaptarse y transformarse frente a una perturbación (Castillo-Villanueva y Velásquez-Torres, 2015), a partir de la respuesta intrínseca del sistema frente a la reorganización de los procesos, sus componentes y sus interrelaciones (Folke et al., 2010). Para identificar esa respuesta de adaptación y transformación se aplican metodologías de evaluación que contemplan las dimensiones de la resiliencia socioecológica en ecosistemas acuáticos, caracterizadas por conformarse por una densa red de interrelaciones entre las dimensiones socio-cultural y ecológica, autoorganizados, no lineales y sometidos a la incertidumbre (Holling, 2001; Folke et al., 2002).

La modelación dinámica de sistemas posee diversas clasificaciones, una de ellas plantea que los modelos se pueden categorizar según la relación de las variables y la escala de tiempo contemplada en la modelación (continuos y discretos), así como la metodología que aplican (descriptivos, explicativos, analíticos y numéricos) (De Souza y González, 2001; Delgado, 2002). De igual manera, los modelos poseen diversos enfoques de aplicación, los cuales dependen de los fenómenos estudiados y de la naturaleza de los mismos. Los modelos dinámicos de sistemas son construidos a partir de la selección de distintas variables que interaccionan entre sí, además de permitir la representación de la estructura del sistema y su funcionamiento (Pérez-Maqueo et al., 2006), por lo que para esta revisión las variables a referenciar son todas aquellas que inciden en la resiliencia socioecológica y que se categorizan dentro de las dimensiones o de los elementos internos del ecosistema (condiciones biofísicas, sociales, humanas, ecológicas o de biodiversidad) (Bordóns et al., 2001).

Dentro de los modelos utilizados en este campo, se destacan modelos interdisciplinarios realizados por perspectiva de redes, nodos y conexiones (Farhad, 2012); así como también, modelos que aportan características e interacciones resultantes de la relación entre los ecosistemas y los seres humanos, mediados por la tecnología, el conocimiento local y la institucionalidad (Becker y Folke, 1998). Para evaluar la resiliencia, diferentes autores como Folke (2003), Berkes y Seixas (2005), y Ruiz-Ballesteros

(2011), utilizan modelos que permiten reconocer el cambio y la incertidumbre a nivel espacio-temporal (Farhad, 2012). Pese a lo anterior, aunque existen investigaciones que evalúan la resiliencia, el nivel adaptativo y de transformación que posee un sistema frente a diversas perturbaciones, este artículo de revisión busca identificar las tendencias presentes en la modelación de dinámica de sistemas acuáticos y su resiliencia socioecológica, a través de una revisión bibliográfica para los últimos 10 años (2010-2020) realizada para una escala geográfica a nivel mundial.

Materiales y métodos

Sistema de búsqueda bibliográfica

Se utilizó una metodología de búsqueda sistemática a nivel mundial, acerca de las dimensiones, tipos de modelos, los enfoques de aplicación y variables utilizadas en la construcción de modelos de simulación dinámica asociados a la resiliencia en ecosistemas acuáticos. Las bases de datos utilizadas fueron Google Scholar (GS), Scopus (SC), Springer Link (SL) y Science Direct (SD). Las combinaciones de palabras utilizadas se consultaron en idioma inglés y se organizaron en cuatro fases (Tabla 1).

Análisis bibliográfico

La búsqueda de artículos se realizó a partir del desarrollo de cuatro fases, donde se indaga acerca de distintos términos con el fin de obtener resultados con mayor relación a la temática estudiada. Con los resultados se contabilizó la cantidad de documentos referentes a la modelación dinámica de sistemas y la resiliencia socioecológica, para de esta manera calcular un índice de aparición por base de datos. Así mismo estos índices se promediaron, además de incluirlos en una escala de cuartiles a partir de lo sugerido por Ome y Zafra (2018). La búsqueda de los artículos permitió observar las tendencias dentro de los modelos de simulación dinámica como herramienta de análisis sobre la resiliencia en sus diferentes dimensiones (económica, ecológica y social), además de revisar la utilización de la modelación según sus diferentes clasificaciones, y la relación que posee con los fenómenos que estudia (enfoque de aplicación). Posteriormente, fueron seleccionados

50 documentos a partir de los siguientes criterios: a) incluir modelos dinámicos de sistemas realizados en programas o métodos especializados, b) involucrar las tres dimensiones encontradas en la revisión, c) contar con variables de orden cualitativo y cuantitativo para su análisis específico (Tabla 1).

Análisis estadístico

Fueron utilizados estadísticos descriptivos, además del índice de correlación y un modelo de regresión lineal, con el propósito de identificar qué grado de relación existe entre las diferentes fases de la búsqueda bibliográfica. Cabe destacar que en cada fase no se plantea hacer una clasificación exclusiva para cada modelo o una relación unicausal, sino que lo que se busca es evidenciar la relación existente entre los modelos según las dimensiones que contemplan, el tipo de modelación, los enfoques y las variables utilizadas.

Resultados

§ **Distribución geográfica de los artículos seleccionados según su clasificación.** La categorización para definir la distribución consta de cuatro zonas, la primera hace referencia a los continentes de Asia, Oceanía y África, la segunda a América Latina, la tercera a Norteamérica, y la cuarta a Europa. De esta manera, para cada región establecida se realizó el índice de correlación con el fin de obtener el porcentaje de utilización de los modelos según su clasificación, encontrando que en América Latina los modelos discretos, analíticos y predictivos son predominantes sobre los demás (Figura 1).

§ **Dimensiones de los modelos:** La investigación bibliográfica permite clasificar las variables involucradas en los modelos a partir de tres dimensiones: i) ecológica, ii) social, y iii) económica (Folke et al., 2002; Holling, 2001), las tres dimensiones se utilizaron paralelamente en el 64 % de los documentos elegidos para su análisis (32 documentos), donde la resiliencia socioecológica cuenta con variables que se categorizan en las tres categorías anteriores, al incluir elementos de la dimensión social y económica resultantes de

Tabla 1. Resultados de búsqueda bibliográfica referente al desarrollo temático

Fase	Palabras clave	Bases de datos										Cuartil promedio	Variación del cuartil
		SC		SD		SL		GS		Índice Q promedio	Índice Q		
		DE	Índice Q	DE	Índice Q	DE	Índice Q	DE	Índice Q				
Búsqueda general	Modelos de simulación dinámica y resiliencia	11.712	1	8.161	1	8.397	1	18.900	1	***			
	Modelos de simulación dinámica y resiliencia socioecológica	943	0,078	1.407	0,172	370	0,044	17.700	0,937	0,308	Q2	Q1-Q1-Q1-Q4	
	Modelos de simulación dinámica y resiliencia ecológica en sistemas acuáticos	177	0,194	191	0,136	233	0,630	17.500	0,989	0,487	Q2	Q1-Q1-Q3-Q4	
	Modelos de simulación dinámica y resiliencia social en sistemas acuáticos	129	0,141	117	0,083	205	0,554	17.400	0,983	0,440	Q2	Q1-Q1-Q3-Q4	
	Modelos de simulación dinámica y resiliencia económica en sistemas acuáticos	126	0,138	133	0,095	221	0,597	17.400	0,983	0,453	Q2	Q1-Q1-Q3-Q4	
	Modelos de simulación dinámica y resiliencia socioecológica en sistemas acuáticos	192	0,210	247	0,176	66	0,178	17.500	0,989	0,388	Q2	Q1-Q1-Q1-Q4	
	Modelos de simulación dinámica numéricos y resiliencia socioecológica en sistemas acuáticos	37	0,193	77	0,312	14	0,212	4.950	0,283	0,250	Q1	Q1-Q2-Q1-Q2	
	Modelos de simulación dinámica predictivos y resiliencia socioecológica en sistemas acuáticos	34	0,177	175	0,709	20	0,303	15.200	0,869	0,514	Q3	Q1-Q3-Q2-Q4	
	Modelos de simulación dinámica continuos y resiliencia socioecológica en sistemas acuáticos	18	0,094	140	0,567	29	0,439	17.400	0,994	0,524	Q3	Q1-Q3-Q2-Q4	
	Modelos de simulación dinámica analíticos y resiliencia socioecológica en sistemas acuáticos	14	0,073	85	0,344	12	0,182	16.000	0,914	0,378	Q2	Q1-Q2-Q1-Q4	
	Modelos de simulación dinámica discretos y resiliencia socioecológica en sistemas acuáticos	11	0,057	45	0,182	17	0,258	5.300	0,303	0,200	Q1	Q1-Q1-Q2-Q2	
	Modelos de simulación dinámica descriptivos y resiliencia socioecológica en sistemas acuáticos	6	0,031	25	0,101	8	0,121	15.200	0,869	0,281	Q2	Q1-Q1-Q1-Q4	
	Modelos de simulación dinámica explicativos y resiliencia socioecológica en sistemas acuáticos	2	0,010	21	0,085	6	0,091	5.110	0,292	0,120	Q1	Q1-Q1-Q1-Q2	
	Cambio climático	35	0,182	206	0,834	62	0,939	17300	0,989	0,736	Q3	Q1-Q4-Q4-Q4	
	Toma de decisiones	24	0,125	159	0,644	60	0,909	17400	0,994	0,668	Q3	Q1-Q3-Q4-Q4	
	Sustentabilidad	22	0,115	206	0,834	57	0,864	17.300	0,989	0,700	Q3	Q1-Q4-Q4-Q4	
	Servicios ecosistémicos	22	0,115	177	0,717	59	0,894	17.400	0,994	0,680	Q3	Q1-Q3-Q4-Q4	
	Actividad humana	19	0,099	196	0,794	59	0,894	17.400	0,994	0,695	Q3	Q1-Q4-Q4-Q4	
	Biodiversidad	15	0,078	158	0,640	52	0,788	17.400	0,994	0,625	Q3	Q1-Q3-Q4-Q4	
	Manejo del agua	13	0,068	227	0,919	64	0,970	8.170	0,467	0,606	Q3	Q1-Q4-Q4-Q2	
	Manejo adaptativo	12	0,063	187	0,757	54	0,818	17.400	0,994	0,658	Q3	Q1-Q4-Q4-Q4	
	Gestión ambiental	12	0,063	234	0,947	63	0,955	17.100	0,977	0,735	Q3	Q1-Q4-Q4-Q4	
	Uso del suelo	10	0,052	193	0,781	61	0,924	17.100	0,977	0,684	Q3	Q1-Q4-Q4-Q4	
	4.Enfoques de aplicación de los modelos												

*División de cuartiles: Q1= 0-0,250, Q2= 0,251-0,500, Q3= 0,501-0,750, Q4= 0,751-1,000 (Zafra et al., 2017). SC: Scopus, SD: Science Direct, SL: Springer Link, GS: Google Scholar, DE: Documentos encontrados, Índice Q: Índice de citación.

Fuente: elaboración propia

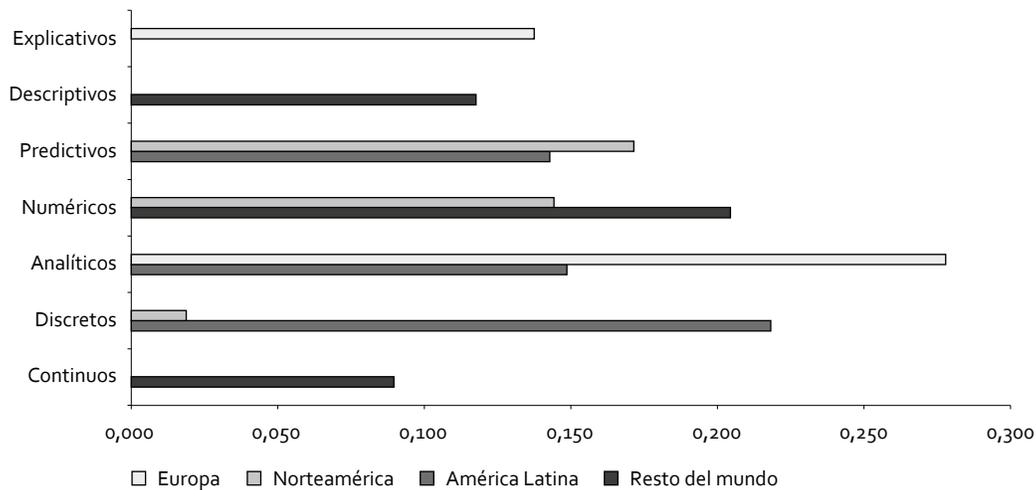


Figura 1. Índice de correlación entre la distribución geográfica y los tipos de modelación dinámica en ecosistemas acuáticos asociados a la resiliencia socioecológica

Tabla 2. Dimensiones, tipos de modelos, enfoques de aplicación y variables utilizados en el abordaje de la resiliencia socioecológica desde los modelos de simulación dinámica

Categorías	Frecuencia de aparición (%)	Sub-categorías
Dimensiones	94,0	i) Dimensión ecológica
	88,0	ii) Dimensión social
	74,0	iii) Dimensión económica
Tipos de modelos	70,0	i) Modelos continuos
	30,0	ii) Modelos discretos
	48,0	iii) Modelos analíticos
	52,0	iv) Modelos numéricos
	50,0	v) Modelos predictivos
	44,0	vi) Modelos descriptivos
	6,0	vii) Modelos explicativos
Enfoques de aplicación	18,0	i) Cambio climático (Maskrey et al., 2016; Hedelin et al., 2017; Samal et al., 2017; Subrahmanyam et al., 2017; Gunda et al., 2018; Kuil et al., 2018; Volenzo y Odiyo, 2018; Fulton et al., 2019; Mooij et al., 2019)
	10,0	ii) Toma de decisiones (Elshafei et al., 2014; Lade et al., 2015; Martin y Schlüter, 2015; Nielsen et al., 2017; Sivapalan y Blöschl, 2015)
	10,0	iii) Sustentabilidad (Filgueira et al., 2014; Essington et al., 2017; Lu et al., 2018; Zhou et al., 2019; Li et al., 2020)
	10,0	iv) Servicios ecosistémicos (Mongruel et al., 2011; Mouquet et al., 2015; Fu et al., 2018; Gao y Hailu, 2018; Müller et al., 2019)
	10,0	v) Actividad humana (Hughes et al., 2011; Hernández-Delgado, 2015; Zhang et al., 2017; Martorell-Barceló et al., 2018; Free et al., 2020)
	10,0	vi) Biodiversidad (Newton y Cantarello, 2015; Serpetti et al., 2017; Wu et al., 2017; Shoemaker et al., 2018; Saba et al., 2019)
	8,0	vii) Manejo del agua (Carpenter et al., 2015; Blair y Buytaert, 2016; Deng et al., 2018; Herman et al., 2020)
	8,0	viii) Manejo adaptativo (Halbe et al., 2013; Zia et al., 2016; Nettier et al., 2017; Miyasaka et al., 2017)
	8,0	ix) Gestión ambiental (Cooper y Dearing, 2019; Dolbeth et al., 2019; Granco et al., 2019; Hay-Mele et al., 2019)
	8,0	x) Uso del suelo (Tieskens et al., 2017; Brown et al., 2019; Holzhauer et al., 2019; Perrone et al., 2020)

Continúa

Continuación **Tabla 2.** Dimensiones, tipos de modelos, enfoques de aplicación y variables utilizados en el abordaje de la resiliencia socioecológica desde los modelos de simulación dinámica

Categorías	Frecuencia de aparición (%)	Sub-categorías
Variables y tipos de variables	Número de documentos revisados=50	84,0 i) Variables ecológicas cuantitativas. Ejemplo: tasa de fotosíntesis, producción primaria, niveles de contaminación, escorrentía, etc.
		58,0 ii) Variables ecológicas cualitativas. Ejemplo: rangos de cobertura de vegetación o de vocación del suelo, rendimiento del sistema, estado del ecosistemas, entre otros
		72,0 iii) Variables sociales cuantitativas. Ejemplo: ingresos, costos, gastos, población, etc.
		76,0 iv) Variables sociales cualitativas. Ejemplo: presencia de gobernanza local o regional, actividades de mejoramiento, nivel de participación, etc.
		74,0 v) Variables biofísicas cuantitativas. Ejemplo: calidad del agua, concentración de elementos contaminantes, rangos de precipitación y temperatura, etc.
		16,0 vi) Variables biofísicas cualitativas. Ejemplo: descripción de estados del suelo, los cuerpos de agua, el clima desde escalas subjetivas, etc.
		46,0 vii) Variables humanas cuantitativas. Ejemplo: nivel de riesgo o afectación por las problemáticas, impactos producidos al sistema, demanda de servicios, etc.
		28,0 viii) Variables humanas cualitativas. Ejemplo: apropiación, valores, principios, etc.
		40,0 ix) Variables de biodiversidad cuantitativas. Ejemplo: poblaciones fauna-flora, tasas de reproducción, mortalidad, migración, etc.
		18,0 x) Variables de biodiversidad cualitativas. Ejemplo: trayectorias históricas de la fauna y flora según las afectaciones, usos asignados para la biodiversidad, entre otros

impactos causados por la aparición de estresores sobre los ecosistemas acuáticos (dimensión ecológica), evaluados por los modelos dinámicos de sistemas y el análisis de la teoría de sistema, lo que permiten relacionar los diferentes enfoques.

§ **Tipos de modelación dinámica y enfoque de aplicación utilizados:** Bajo la clasificación propuesta por De Souza y González (2001), y Delgado (2002), se encontraron inicialmente dentro de la búsqueda dos subcategorías de modelos según la frecuencia de los eventos analizados: continuos y discretos (35 documentos, 70 %; 15 documentos, 30 %, respectivamente). De igual manera, a partir de dicha clasificación, según el paradigma utilizado para extraer los fenómenos de la realidad para el modelo, se establecen dos subcategorías: numéricos y analíticos (26 documentos, 52 %; 24 documentos, 48 %, respectivamente). La última categorización usada para los modelos se basa en el propósito que se desea alcanzar, siendo las subcategorías: predictivo, descriptivo y explicativo (35 documentos, 50 %; 22 documentos, 44 %; tres documentos, 6 %, respectivamente).

Dentro de los criterios de búsqueda se establecieron los enfoques más citados en la bibliografía consultada, el enfoque cuyo número de resultados

fue el mayor corresponde al cambio climático (nueve documentos, 18 %), en los siguientes cinco enfoques (toma de decisiones, sustentabilidad, servicios ecosistémicos, actividad humana y biodiversidad) se presentan cinco documentos para cada uno, correspondientes al 10 %; de igual manera el manejo del agua como enfoque de aplicación, al igual que el manejo adaptativo, la gestión ambiental y el uso del suelo presentaron cuatro documentos en el proceso de búsqueda, significando el 8 % para cada uno de los enfoques.

Por otra parte, además de realizar el índice de correlación se busca obtener el nivel de correspondencia entre las diferentes clasificaciones propuestas para la modelación dinámica con respecto a los enfoques de aplicación que estos posee, con lo que se evidencia que para los modelos continuos se encuentra una correlación positiva con cuatro de los enfoques revisados en este trabajo (toma de decisiones, servicios ecosistémicos, manejo adaptativo y uso del suelo), mientras que los modelos discretos se asocian los seis enfoques restantes. De esta manera, los modelos analíticos se utilizan mayormente en seis enfoques (Figura 2).

Así mismo, los modelos numéricos fueron utilizados en artículos sobre sustentabilidad, servicios

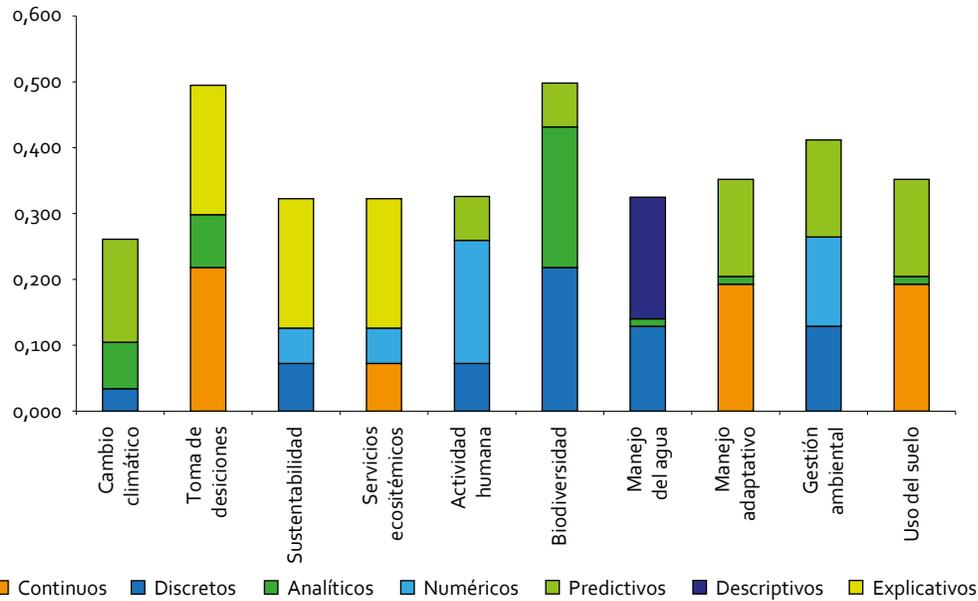


Figura 2. Tipos de modelos de simulación dinámica asociados a la resiliencia socioecológica según los enfoques de aplicación

ecosistémicos, actividad humana y gestión ambiental. Por otro lado, los modelos predictivos son mayormente utilizados en los artículos revisados, ya que seis de los enfoques los incluyen (cambio climático, actividad humana, biodiversidad, manejo adaptativo, gestión ambiental y uso del suelo). Los siguientes modelos más utilizados fueron los explicativos, además de evidenciar que los modelos descriptivos se utilizan más en documentos sobre manejo de agua (Figura 2).

§ **Tipos de variables utilizadas en la construcción de modelos de simulación dinámica asociados a la resiliencia socioecológica:** En las dimensiones sociales de los modelos consultados se incluyen variables cuantitativas y cualitativas asociadas a los actores humanos a nivel colectivo (variables económicas: ingresos, costos y gastos; presencia institucional: estrategias de acción y niveles de organización comunitarias, valores, apropiación del territorio, dependencia a los servicios ecosistémicos). Se reconoce una utilización alta de estas variables (76 % de los artículos posee variables cualitativas y 72 % variables cuantitativas), frente a esto, se puede argumentar que las variables de ambos tipos se utilizan de manera paralela por la complejidad de las problemáticas asociadas a la resiliencia. Con respecto a las variables humanas, estas se encuentran en menor medida (46 % presentan variables cuantitativas y 28 % variables

cualitativas), debido a que a nivel individual son pocas las variables que influyen directamente en la resiliencia y en la construcción de la modelación dinámica, por lo que son tomados en cuenta solamente factores repetitivos a gran escala repetitivos a lo largo del tiempo, como son las decisiones a nivel individual, actividades productivas o niveles de demanda de servicios ecosistémicos.

A nivel ecológico, la dimensión integra tres grupos de variables: de biodiversidad, ecológicas propiamente dichas y biofísicas. Las primeras indican si dentro de los modelos se tuvo en cuenta la presencia e influencia de las comunidades específicas de fauna, flora u otro grupo de vida frente a la resiliencia, de este tipo se encontraron variables cuantitativas en un 40 % (20 documentos) y las cualitativas en un 18 % (nueve documentos). Para las variables ecológicas se relaciona el comportamiento de los ecosistemas acuáticos y la incidencia del estado de sus condiciones ecológicas de manera directa sobre la modelación y la resiliencia (son asociadas a los regímenes de flujo hídrico, las tasas de contaminación y eutrofización); en este caso, se encontró que para el 84 % (42 documentos) se incluyen variables de este tipo. Igualmente, las variables relacionadas al aspecto biofísico de los sistemas acuáticos (temperatura, pH, concentración de carbono, oxígeno, nitrógeno, fósforo), son constantemente tenidas en cuenta a la hora de establecer los modelos. Las variables

cuantitativas de este tipo se encontraron en el 74 % de los documentos (37 documentos) y las variables cualitativas en un 16 % (12 documentos).

Por medio del análisis estadístico resultante de la contrastación entre los diferentes tipos de modelos de simulación dinámica y las variables utilizadas para su elaboración, la prueba de correlación permite afirmar que para los modelos continuos se utilizan variables cuantitativas a nivel social, humano, ecológico y biofísicos, mientras que para los modelos discretos las variables utilizadas son cualitativas de orden social, humano, ecológico y de biodiversidad. Por otra parte, los modelos analíticos son construidos basados en variables cualitativas a nivel humano, ecológico y de biodiversidad; a su vez, en el caso de los modelos numéricos se observa que su elaboración se basa en seis variables en total: cuantitativas sociales, humanas, ecológicas y biofísicas, además de variables cualitativas sociales y de biodiversidad. Así mismo, en los modelos descriptivos se identifica que las variables elegidas obedecen a las cuantitativas sociales, ecológicas y de biodiversidad, además de las cualitativas ecológicas (Figura 3).

Posterior a la correlación entre los diferentes tipos de modelos y las variables destacadas, se procede a realizar un análisis estadístico referente a identificar la importancia de las variables sobre la modelación

por medio de una regresión lineal múltiple, donde a partir de los valores encontrados, se establece que el rango de importancia mayor se obtuvo para las variables cualitativas de biodiversidad, seguidas por las variables cuantitativas ecológicas, cuantitativas sociales, y cualitativas humanas; además de las variables cuantitativas biofísicas y cualitativas sociales (Figura 4).

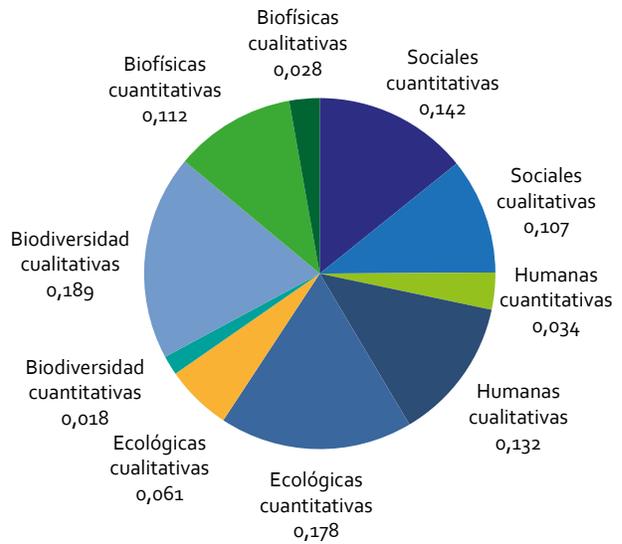


Figura 4. Porcentaje asignado para las variables utilizadas en los modelos de simulación dinámica asociados a la resiliencia socioecológica

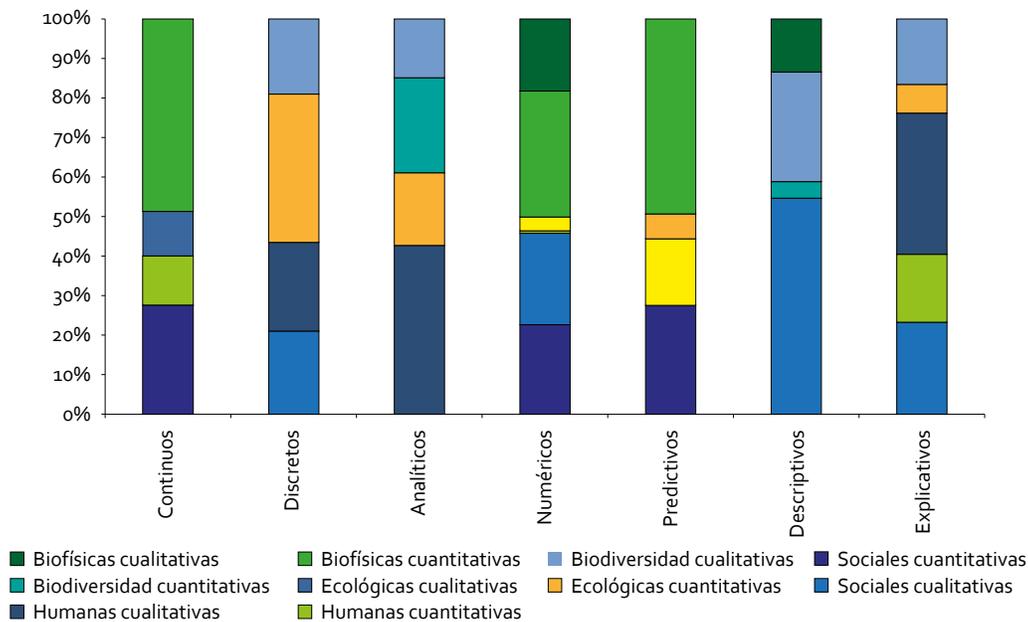


Figura 3. Porcentaje de correlación entre variables y tipos de variables con respecto a los diferentes modelos dinámicos asociados a la resiliencia socioecológica

Discusión

Dentro de la modelación dinámica construida para el abordaje de la resiliencia socioecológica, dentro de la dimensión ecológica se hace énfasis principalmente a los servicios ecosistémicos, el funcionamiento de los sistemas acuáticos, la biodiversidad y la caracterización de los ciclos biogeoquímicos (Wu et al., 2017; Zhang et al., 2017). En la dimensión social se realizó el abordaje desde las interacciones presentes en la población humana, su dinámica demográfica, sus rasgos culturales, su apropiación con los sistemas acuáticos y la dependencia de las comunidades frente a los servicios ecosistémicos (Filgueira et al., 2014; Saba et al., 2019). En la dimensión económica el desarrollo de la temática se basó en el aprovechamiento de los servicios ecosistémicos y el crecimiento económico a partir del buen estado de los sistemas acuáticos (Serpetti et al., 2017; Halbe et al., 2013). Se observó una predominancia en la inclusión de las tres dimensiones, a partir de abordar la resiliencia de manera integral frente a los factores de estrés, además de reconocer sus estados de equilibrio (Hedelin et al., 2017; Kuil et al., 2018; Volenzo y Odiyo, 2018).

Con respecto a los modelos continuos se analizó la resiliencia según eventos sucedidos constantemente, ya que las perturbaciones poseen un desarrollo histórico con trayectorias de afectación a nivel temporal, la cual es transformada a partir de cambios abruptos en su dinámica (Lade et al., 2015). Con respecto a los modelos discretos, se define que estos obedecen a enfoques hidrológicos cuyo análisis se enfoca a una escala espacio-temporal particular, donde la resiliencia se analiza a nivel de biodiversidad y los modelos de simulación son discretos, puesto que las afectaciones toman alcances que afectan a los sistemas socioecológicos a partir de un evento máximo de estrés, lo cual simboliza un punto de partida para revisar tales perturbaciones con relación a la pérdida de la biodiversidad, el funcionamiento de los ecosistemas y el manejo de los servicios ecosistémicos (Fu et al., 2018; Lu et al., 2018; Essington et al., 2017).

Para los modelos numéricos se definió una construcción desde la aplicación de ecuaciones lineales o relaciones matemáticas; Müller et al. (2019), desarrollaron un modelo de simulación dinámica a partir

de la calidad fisicoquímica del agua, determinando que según el nivel de carga de nutrientes se da la respuesta de resiliencia positiva en el sistema acuático y que se ve condicionado por las actividades productivas de los grupos humanos. Por otra parte, los modelos analíticos representan situaciones donde la biodiversidad experimenta alteraciones por condiciones fisicoquímicas en el agua, las cuales aumentan los niveles de contaminación, acidificación y eutrofización en niveles progresivos hasta causar rangos de alteración altos sobre poblaciones de peces, corales, moluscos, y crustáceos, haciendo que disminuyan sus actividades biológicas (Saba et al., 2019). Situaciones similares son reportadas por Serpetti et al. (2017) o Wu et al. (2017), quienes destacan que los estresores presentes en los sistemas acuáticos afectan gradualmente la biodiversidad.

Los modelos predictivos hallados en esta búsqueda se centran en reconocer la trayectoria de las causas y consecuencias frente a eventos de cambio climático, actividades humanas, presencia de biodiversidad, manejo adaptativo de ecosistemas, además de la gestión ambiental y el uso del suelo. Estos enfoques generan escenarios globales de análisis sobre la resiliencia, identificando impulsores biofísicos y ecológicos para realizar intervenciones multidimensionales en función de la sustentabilidad y la conservación de los cuerpos de agua (Miyasaka et al., 2017; Zia et al., 2016). Para los modelos descriptivos, se caracterizan por definir de forma detallada los procesos abordados y su efecto directo a nivel espacio-temporal sobre los sistemas a modelar. Frente a eso, se resaltan investigaciones cuya elaboración de modelos se basa en explicar los cambios en la resiliencia de los sistemas acuáticos desde un marco metodológico de modelos participativos, cuya orientación está definida para mejorar la comprensión acerca de la dinámica de los eventos y sus impactos (Perrone et al., 2020).

La tercera de las subcategorías hace referencia a los modelos de orden explicativos, los cuales enfatizan su desarrollo en manifestar el direccionamiento y funcionamiento de los modelos según los elementos que originan el fenómeno, dichos modelos son elaborados gracias a generalizaciones extensas sobre el contexto y los elementos que sugieren explicaciones a partir de datos o experimentos que

comprueban una teoría sobre el enfoque en el cual se apliquen. Ejemplos de esto, son los documentos desarrollados por Essington *et al.* (2017) o Martin y Schülter (2015), quienes elaboran mecanismos de explicación a través de modelos y bucles de retroalimentación que permiten mantener ciclos de estabilidad e integridad socioecológica, al determinar los umbrales permitidos para que el sistema siga su dinámica a partir de decisiones humanas o patrones de uso frente a los ecosistemas y sus servicios.

Con relación a los enfoques de aplicación de modelos de simulación dinámica en la evaluación de la resiliencia socioecológica, el primero de estos enfoques se refiere al cambio climático, esto sucede gracias a lo mencionado por Mooij *et al.* (2019), quienes afirman que el cambio climático posee grandes efectos sobre la integridad ecológica de los sistemas acuáticos ocasionando alteraciones reflejadas en la pérdida de biodiversidad, cambios en la dinámica trófica, variaciones en los niveles de interrelación de especies, entre otras. Al ser un efecto a escala global, se comprenden los cambios que se generan sobre los servicios ecosistémicos (Samal *et al.*, 2017; Subrahmanyam *et al.*, 2017). Por otra parte, frente a la toma de decisiones, Elshafei *et al.* (2014), enuncian que los modelos de simulación dinámica cuentan con un desarrollo temático a partir de la descripción de los impactos asociados a la gestión del agua, el balance hídrico y la calidad del agua, al identificar, cuantificar y conceptualizar los impulsores sociales para modificar la resiliencia (Lade *et al.*, 2015). Por esto, los modelos definen interacciones entre los seres humanos y el recurso hídrico mediadas por el uso de las tecnologías, el aprovechamiento económico y las directrices institucionales, siendo la dimensión social el agente que realiza los procesos establecidos (Sivapalan y Blösch, 2015).

A nivel del estudio sobre el enfoque de sustentabilidad, Li *et al.* (2020), establecen que los modelos de simulación permiten demostrar la conformación de los sistemas socioecológicos a partir de incluir las relaciones nivel socioecológico y económico, definiendo así modelos integrales multidisciplinarios que estiman condiciones necesarias para el bienestar actual y la sustentabilidad. Estos sistemas socioecológicos permiten la adaptación frente a perturbaciones múltiples por medio de mecanismos

de retroalimentación que comprenden y generan procesos de auto-organización, a partir de análisis sobre las trayectorias temporales de los impactos e identificando los factores claves, involucrando la participación de la comunidad en pro de encontrar beneficios económicos (Lu *et al.*, 2018). Al respecto de los servicios ecosistémicos como enfoque de aplicación, se observa una tendencia a realizar análisis de los procesos de disminución de los servicios ecosistémicos y la afectación que eso causa sobre la integridad de los sistemas acuáticos, enfocados en la alteración de las condiciones del agua, destacando que los flujos de materia y energía de los sistemas socioecológicos logran niveles de contaminación y eutrofización en cuerpos de agua de gran importancia, por lo que medidas de orden económico (internalización de las externalidades) son estrategias eficaces (Fu *et al.*, 2018).

Frente a la actividad humana, Martorell-Barceló *et al.* (2018), mencionan que los seres humanos generan patrones de explotación frente al uso de la biodiversidad acuática, razón por la cual los organismos establecen mecanismos de evolución y adaptación frente a las condiciones alteradas por la humanidad. Hernández-Delgado (2015), afirma que la actividad humana causa impactos negativos, ya que el crecimiento poblacional acelerado o el desarrollo económico de la sociedad conforman comportamientos de mal uso de los recursos aumentando la contaminación, la eutrofización, la explotación del suelo o del agua sobre los ecosistemas. Con respecto a la biodiversidad como enfoque de aplicación, se encuentra que la fragmentación de los ecosistemas y la expansión urbana ocasionan afectaciones directas sobre la biodiversidad acuática, por lo cual los modelos de simulación dinámica se encargan de describir alternativas de expansión humana que se apoyen en postulados de la planificación territorial para generar una resiliencia en los cuerpos de agua (Shoemaker *et al.*, 2018); por esta razón, los modelos de simulación exploran diferentes escenarios para definir un marco de riesgo adecuado para los ecosistemas, al identificar ciclos adaptativos que pueden preservar los estados de equilibrio ecológico (Wu *et al.*, 2017; Newton y Cantarello, 2015).

El enfoque concerniente al manejo del agua permite identificar que los modelos de simulación

establecen mecanismos de planeación de los recursos hídricos condicionados por impactos socioecológicos. Herman et al. (2020), definen que las estrategias infraestructurales, operativas o comportamentales generan una reducción del riesgo y la vulnerabilidad, además de lograr ensambles nuevos de interrelaciones con los sistemas acuáticos, donde se busca nuevos agentes impulsores de transformación. Deng et al. (2018), mencionan que a partir de los modelos se establecen mecanismos de acción política orientados al apoyo de procesos ambientales donde la integración de sectores de producción, asociados a la contaminación, logran la puesta en marcha de impuestos ambientales o pago por servicios, generando disminuciones en la descarga de contaminantes (Blair y Buytaert, 2016). Frente al manejo adaptativo como enfoque, se destaca que los modelos muestran trayectorias de adaptación, transformación y resiliencia de ecosistemas acuáticos a partir de cambios drásticos en el clima, los servicios ecosistémicos, y los usos del suelo (Miyasaka et al., 2017). Un ejemplo claro es el desarrollado por Nettier et al. (2017), quienes elaboran modelos frente a cambios en los patrones de resiliencia de ecosistemas mixtos según las estaciones del año, identificando que la resiliencia es un factor no cuantificable, asociado a la capacidad adaptativa que poseen los actores frente a las condiciones climáticas.

Desde el enfoque de gestión ambiental, Dolbeth et al. (2019), describen ajustes en la distribución de especies acuáticas para definir nuevas relaciones que logran mantener las cadenas tróficas, las cuales dependen del funcionamiento de los sistemas ante los estresores, con el fin de construir espacios operativos para el desarrollo sostenible. Los mecanismos de evaluación ante los cambios a nivel ecológico se basan en elementos asociados a la toma de decisiones, enfocados al uso de políticas ambientales para afrontar impactos de origen humano (Cooper y Dearing, 2019), dando una visión interdisciplinar de la problemática a través de modificaciones en el flujo de materia y energía, para lograr políticas ambientales que permitan un manejo adecuado de los recursos hídricos (Granco et al., 2019). Para el último enfoque de aplicación de los modelos de simulación dinámica asociados a la resiliencia corresponde al uso del suelo, en este caso se abordan las estrategias

de mitigación a partir de modelación predictiva ante colapsos del sistema, se establece que para ello los modelos deben explorar estos contextos integrando la sociedad como actor responsable de las alteraciones socioecológicas (Brown et al., 2019), por lo que se sugieren estrategias que vinculan los comportamientos sociales frente a la gestión de los recursos (Holzhauer et al., 2019; Tieskens et al., 2017).

Conclusiones

Las tendencias observadas en la revisión bibliográfica reconocen a la modelación como una herramienta multidimensional para evaluar la resiliencia, donde el abordaje integral y las relaciones entre las dimensiones ecológica, social y económica, permite reconocer los niveles adaptación y transformación que poseen los sistemas, según el tiempo y la intensidad de los estresores. A partir de la utilización de modelos, en cada modelación según sea el caso se cumple con el análisis de la resiliencia socioecológica de diferentes maneras y éstas dependen de la ocurrencia de los fenómenos (discretos y continuos), los mecanismos utilizados para estudiar el sistema y su resiliencia (analíticos o numéricos), y la finalidad con la que se desarrolla la modelación (predictivos, explicativos y descriptivos), además de ser utilizados a partir de la concordancia que exista entre los enfoques de aplicación y las variables seleccionadas.

La revisión bibliográfica y los posteriores análisis estadísticos permiten encontrar que dentro de las tendencias a nivel mundial, la resiliencia socioecológica es abordada desde la modelación dinámica de sistemas acuáticos que presentan diversos enfoques de aplicación como lo son cambio climático (18 %), toma de decisiones, sustentabilidad, servicios ecosistémicos, actividad humana y biodiversidad (10 % cada uno), manejo del agua, manejo adaptativo, gestión ambiental y uso del suelo (8% cada uno). En cada uno de estos enfoques, la modelación dinámica interpreta los contextos a partir de los principios de la teoría de sistemas y así se obtiene un panorama específico sobre los diferentes contextos presentados desde la relación entre las diferentes variables utilizadas.

Los modelos mayormente utilizados para evaluar la resiliencia socioecológica en sistemas acuáticos

son aquellos que en la modelación abordan fenómenos continuos en el tiempo (70 %), con el propósito de describir (50 %) los efectos de las perturbaciones sobre la resiliencia desde paradigmas que pueden ser numéricos (52 %) o analíticos (48%). La modelación también permite abordar los distintos enfoques de aplicación según su similitud al integrar la variedad de estos desde el estudio fenómenos socioecológicos desde la selección de variables cuantitativas (63 %) y cualitativas (39 %), para analizar los efectos de las transformaciones en el tiempo y definir los mecanismos de acción frente a un nivel de resiliencia, adaptación y transformación adecuadas sin alterar los sistemas acuáticos desde la perspectiva socioecológica.

Agradecimientos: A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, a su Facultad en Medio Ambiente y Recursos Naturales, a la Maestría en Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental, así como también al Grupo de Investigación INDESOS.

Conflicto de intereses: el manuscrito fue preparado y revisado exclusivamente por los autores, quienes declaran no tener ningún conflicto de interés que ponga en riesgo la validez de los resultados aquí presentados.

Referencias

- Becker, F., Folke, C., 1998. Linking social and ecological systems for resilience and sustainability. En: Becker, F., Folke, C. (Eds.), *Linking social and ecological systems: management practices and social mechanisms for building resilience*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp. 1-26.
- Beltrán, J., Rangel-Churio, O., 2012. Modelación hidrológica del humedal de Jaboque - Bogotá, D.C.(Colombia). *Caldasia* 35(1), 81-101.
- Berkes, F., Seixas, C., 2005. Building resilience in lagoon social-ecological systems: a local-levels perspective. *Ecosystems* 8, 967-974. DOI: 10.1007/s10021-005-0140-4
- Blair, P., Buytaert, W., 2016. Socio-hydrological modeling: a review asking “why, what and how?” *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20, 443-478. DOI: 10.5194/hess-20-443-2016
- Bordóns, C., Ruiz, M., Limón, D., 2001. *Teoría de sistemas*. Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- Brown, C., Seo, B., Rounsevell, M., 2019. Societal breakdown as an emergent property of large-scale behavioral models of land use change. *Earth Syst. Dynam.* 10, 809-845. DOI: 10.5194/esd-10-809-2019
- Buchadas, A., Vaz, A., Honrado, J., Alagador, D., Bastos, R., Cabral, J., Santos, M., Vicente, J., 2017. Dynamic models in research and management of biological invasions. *J. Environ. Manage.* 196, 594-606. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.03.060
- Carpenter, S., Booth, E., Gillon, S., Kucharik, C., Loheide, S., Mase, A., Motew, M., Qiu, J., Rissman, A., Seifert, J., Soyly, E., Turner, M., Wardropper, C., 2015. Plausible futures of a social-ecological system: Yahara watershed, Wisconsin, USA. *Ecol. Soc.* 20(2), 10. DOI: 10.5751/ES-07433-200210
- Castillo-Villanueva, L., Velásquez-Torres, D., 2015. Sistemas complejos adaptativos, sistemas socio-ecológicos y resiliencia. *Quivera* 17(2), 11-32.
- Cooper, G., Dearing, J., 2019. Modelling future safe and just operating spaces in regional social-ecological systems. *Sci. Total Environ.* 651(Part 2), 2105-2117. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.118
- Cuddington, K., Fortin, M.-J., Gerber, L., Hastings, A., Liebhold, A., O'Connor, M., Ray, C., 2013. Process-based models are required to manage ecological systems in a changing world. *Ecosphere*. 4(2), 1-12. DOI: 10.1890/ES12-00178.1
- Cushman, S., McGarigal, K., 2019. Metrics and models for quantifying ecological resilience at landscape scales. *Front. Ecol. Evol.* 7, 440. DOI: 10.3389/fevo.2019.00440
- De Souza, L., González del Rivero, O., 2001. Modelo de desarrollo sustentable en una comunidad rural mexicana. Grupo para Promover la Educación y el Desarrollo Sustentable, México, DF.
- Delgado Gutiérrez, J. 2002. *Análisis sistémico y su aplicación a las comunidades humanas*. CIE-DOSSAT, Madrid.
- Deng, C., Wang, H., Zhang, W., Jiao, Z., 2018. Optimizing policy for balanced industrial profit and water pollution control under a complex socioecological system using a Multiagent-based model. *Water* 10(9), 1139. DOI: 10.3390/w10091139
- Dolbeth, M., Crespo, D., Leston, S., Solan, M., 2019. Realistic scenarios of environmental disturbance lead to functionally important changes in benthic species-environment interactions. *Mar. Environ. Res.* 150, 104770. DOI: 10.1016/j.marenvres.2019.104770
- Elshafei, Y., Sivapalan, M., Tonts, M., Hipsey, M., 2014. A prototype framework for models of socio-hydrology: identification of key feedback loops a parameterization approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 2141-2166. DOI: 10.5194/hess-18-2141-2014
- Essington, T., Ciannelli, L., Heppell, S., Levin, P., McClanahan, T., Micheli, F., Plagányi, E., van Putten, I., 2017. Empiricism and modeling for marine fisheries: advancing an interdisciplinary science. *Ecosystems* 20, 237-244. DOI: 10.1007/s10021-016-0073-0
- Farhad, S., 2012. Los sistemas socio-ecológicos. Una aproximación conceptual y metodológica. Los costos

- de la crisis y alternativas en construcción. En: XIII Jornadas de Economía Crítica. Universidad de Sevilla. Sevilla, España. pp. 265-280.
- Filgueira, R., Guyondet, T., Comeau, L., Grant, J., 2014. A fully-spatial ecosystem-DEB model of oyster (*Crassostrea virginica*) carrying capacity in the Richibucto Estuary, Eastern Canada. *J. Mar. Syst.* 136, 42-54. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2014.03.015
- Folke, C., 2003. Social-ecological resilience and behavioral responses. En: Biel, A., Hansson, B., Martensson, M. (Eds.), *Individual and structural determinants of environmental practice*. Ashgate Publishers, London. pp. 226-287. DOI: 10.4324/9781315252377-9
- Folke, C., 2016. Resilience (Republished). *Ecol. Soc.* 21(4), 44. DOI: 10.5751/ES-09088-210444
- Folke, C., Carpenter, S., Elmqvist, T., Gunderson, L., Holling, C., Walker, B., Bengtsson, J., Berkes, F., Colding, J., Danell, K., Flakemark, M., Gordon, L., Kasperson, R., Kautsky, N., Kinzig, A., Levin, S., Mäler, K.-G., Moberg, F., Ohlsson, P., Olsson, P., Östrom, E., Reid, W., Rockström, J., Savenije, H., Svedin, U., 2002. Resilience and sustainable development: Building adaptive capacity in a world of transformation. Edit Norstedts Tryckeri AB, Estocolmo, pp. 25-55.
- Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., Rockström, J., 2010. Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecol. Soc.* 15(4), 20. DOI: 10.5751/ES-03610-150420
- Free, C., Mangin, T., García, J., Ojea, E., Burden, M., Costello, C., Gaines, S., 2020. Realistic fisheries management reforms could mitigate the impacts of climate change in most countries. *PLoS ONE* 15(3), e0224347. DOI: 10.1371/journal.pone.0224347
- Fu, Y., Zhao, J., Peng, W., Zhu, G., Quan, Z., Li, C., 2018. Spatial modelling of the regulating function of the Huangqihai Lake wetland ecosystem. *J. Hydrol.* 564, 283-293. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.07.017
- Fulton, E., Blanchard, J., Melbourne-Thomas, J., Plagányi, E., Tulloch, V., 2019. Where the ecological Gaps Remain, a modelers' perspective. *Front. Ecol. Evol.* 7, 424. DOI: 10.3389/fevo.2019.00424
- Gao, L., Hailu, A., 2017. Site closure management strategies and the responsiveness of conservation outcomes in recreational fishing. *J. Environ. Manage.* 207, 10-22. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.11.003
- Granco, G., Heier, J., Bergtold, J., Daniels, M., Sanderson, M., Sheshukov, A., Mather, M., Caldas, M., Ramsey, S., Lehrter II, R., Haukos, D., Gao, J., Chatterjee, S., Nifong, J., Aistrup, J., 2019. Evaluating environmental change and behavioral decision-making for sustainability policy using an agent-based model: A case study for the Smoky Hill River Watershed, Kansas. *Sci. Total Environ.* 695, 133769. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133769
- Gunda, T., Turner, B., Tidwell, V., 2018. The influential role of sociocultural feedbacks on community-managed irrigation system behaviors during times of water stress. *Water Resour. Res.* 54(4), 2697-2714. DOI: 10.1002/2017WR021223
- Halbe, J., Pahl-Wostl, C., Sendzimir, J., Adamowski, J., 2013. Towards adaptive and integrated management paradigms to meet the challenges of water governance. *Water Soc. Technol.* 67(11), 2651-2660. DOI: 10.2166/wst.2013.146
- Hannon, B., Ruth, M., 2014. Modeling dynamic biological systems. 2a ed. Springer International Publishing, Nueva York. DOI: 10.1007/978-3-319-05615-9
- Hay-Mele, B., Russo, L., D'Alelio, D., 2019. Combining marine ecology and economy to roadmap the integrated coastal management: A systematic literature review. *Sustainability* 11(16), 4393. DOI: 10.3390/su11164393
- Hedelin, B., Evers, M., Alkan-Olsson, J., Jonson, A., 2017. Participatory modelling for sustainable development: Key issues derived from five cases of natural resource and disaster risk management. *Environ. Sci. Policy* 76, 185-196. DOI: 10.1016/j.envsci.2017.07.001
- Herman, J., Quinn, J., Steinschneider, S., Giuliani, M., Fletcher, S., 2020. Climate adaptation as a control problem: Review and perspectives on dynamic water resources planning under uncertainty. *Water Resour. Res.* 56, e24389. DOI: 10.1029/2019WR025502
- Hernández-Delgado, E., 2015. The emerging threats of climate change on tropical coastal ecosystem services, public health, local economies and livelihood sustainability of small islands: Cumulative impacts and synergies. *Mar. Pollut. Bull.* 101(1), 5-28. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2015.09.018
- Holling, C., 2001. Understanding the complexity of economic, ecological and social systems. *Ecosystems* 4, 390-405. DOI: 10.1007/s10021-001-0101-5
- Holzhauser, S., Brown, C., Rounsevell, M., 2019. Modelling dynamic effects of multi-scale institutions on land use change. *Reg. Environ. Change* 19, 733-746. DOI: 10.1007/s10113-018-1424-5
- Hughes, Z., Fenichel, E., Gerber, L., 2011. The potential impact of labor choices on the efficacy marine conservation strategies. *PLoS ONE* 6(8), e23722. DOI: 10.1371/journal.pone.0023722
- Kuil, L., Evans, T., McCord, P., Salinas, J., Blöschl, G., 2018. Exploring the Influence of smallholders' perceptions regarding water availability on crop choice and water allocation through socio-hydrological modeling. *Water Resour. Res.* 54(4), 2580-2604. DOI: 10.1002/2017WR021420
- Lade, S., Niiranen, S., Hentati-Sundberg, J., Blenckner, T., Boonstra, W., Orach, K., Quaas, M., Österblom, H., Schlüter, M., 2015. An empirical model of the Baltic Sea reveals the importance of social dynamics

- for ecological regime shifts. *Proc. Natl. Am. Sci. USA* 112, 11120-11125. DOI: 10.1073/pnas.1504954112
- Li, T., Dong, Y., Liu, Z., 2020. A review of social-ecological system resilience: Mechanism, assessment and management. *Sci. Total Environ.* 723, 138113. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138113
- Liu, D., 2019. Evaluating the dynamic resilience process of a regional water resource system through the nexus approach and resilience routing analysis. *J. Hydrol.* 578, 124028. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124028
- Lu, S., Shang, Y., Li, W., Wu, X., Zhang, H., 2018. Basic theories and methods of watershed ecological regulation and control system. *J. Water Clim. Change* 9(2), 293-306. DOI: 10.2166/wcc.2018.051
- Martin, R., Schlüter, M., 2015. Combining system dynamics and agent-based modeling to analyze social-ecological interactions-an example from modeling restoration of a shallow lake. *Front. Environ. Sci.* 3, 66. DOI: 10.3389/fenvs.2015.00066
- Martorell-Barceló, M., Campos-Candela, A., Alós, J., 2018. Fitness consequences of fish circadian behavioral variation in exploited marine environments. *PeerJ* 6, e4814. DOI: 10.7717/peerj.4814
- Maskrey, S., Mount, N., Thorne, C., Dryden, I., 2016. Participatory modelling for stakeholder involvement in the development of flood risk management intervention options. *Environ. Model. Softw.* 82, 275-294. DOI: 10.1016/j.envsoft.2016.04.027
- Miyasaka, T., Bao, Q., Okuro, T., Zhao, X., Takeuchi, K., 2017. Agent-based modeling of complex social-ecological feedback loops to assess multi-dimensional trade-offs in dryland ecosystem services. *Landscape Ecol.* 32, 707-727. DOI: 10.1007/s10980-017-0495-x
- Mongruel, R., Prou, J., Ballé-Beganton, J., Lample, M., Van Houtte-Brunier, A., Réthoret, H., Pérez Agúndez, J., Vernier, F., Bordenave, P., Bacher, C., 2011. Modeling soft institutional change and the improvement of freshwater governance in the coastal zone. *Ecol. Soc.* 16(4), 15. DOI: 10.5751/ES-04294-160415
- Mooij, W., van Wijk, D., Beusen, A., Brederveld, R., Chang, M., Cobben, M., DeAngelis, D., Downing, S., Green, P., Gsell, A., Huttunen, I., Janse, J., Janssen, A., Hengeweld, G., Kong, X., Kramer, L., Kuiper, J., Langan, B., Nolet, B., Nuijten, R., Strokal, M., Troost, T., van Dam, A., Teurlinckx, S., 2019. Modeling water quality in the Anthropocene: Directions for the next-generation aquatic ecosystem models. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 36, 85-95. DOI: 10.1016/j.cosust.2018.10.012
- Mouquet, N., Lagadeuc, Y., Devictor, V., Doyen, L., Duputié, A., Evellard, D., Faure, D., Garnier, E., Gimenez, O., Huneman, P., Jabot, F., Jarne, P., Joly, D., Julliard, R., Kéfi, S., Kergoat, G., Lavorei, S., Le Gall, L., Meslin, L., Morand, S., Morin, X., Morlon, H., Pinay, G., Pradel, R., Schurr, F., Thuiller, W., Loreau, M., 2015. Predictive ecology in a changing world. *J. Appl. Ecol.* 52(5), 1293-1310. DOI: 10.1111/1365-2664.12482
- Müller, H., Hamilton, D., Doole, G., Abell, J., McBride, C., 2019. Economic and ecosystem costs and benefits of alternative land use and management scenarios in the Lake Rotorua, New Zealand, catchment. *Glob. Environ. Change* 54, 102-112. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2018.10.013
- Nettier, B., Dobremez, L., Lavorel, S., Brunschwig, G., 2017. Resilience as a framework for analyzing the adaptation of mountain summer pasture systems to climate change. *Ecol. Soc.* 22(4), 25. DOI: 10.5751/ES-09625-220425
- Newton, A., Cantarello, E., 2015. Restoration of forest resilience: An achievable goal? *New For.* 46, 645-668. DOI: 10.1007/s11056-015-9489-1
- Nielsen, J., Thunberg, E., Holland, D., Schmidt, J., Fulton, E., Bastardie, F., Punt, A., Allen, I., Bartelings, H., Bertignac, M., Bethke, E., Bossier, S., Buckworth, R., Carpenter, G., Christensen, A., Christensen, V., Da-Rocha, J., Deng, R., Dichmont, J., Doering, R., Esteban, A., Fernandes, J., Frost, H., García, D., Gasche, L., Gascuel, D., Gourguet, S., Groeneveld, R., Guillén, J., Guyader, O., Hamon, K., Hoff, A., Horbowy, J., Hutton, T., Lehuta, S., Little, L., Leonart, J., Macher, C., Mackinson, S., Mahevas, S., Marchal, P., Mato-Amboage, R., Mapstone, B., Maynou, F., Merzéréaud, M., Palacz, A., Pascoe, S., Paulrud, A., Plaganyi, E., Prellezo, R., Van Putten, E., Quas, M., Ravn-Jensen, L., Sánchez, S., SImons, S., Thébaud, O., Tomczak, M., Ulrich, C., van Dijk, D., Vermard, Y., Voss, R., Waldo, S., 2017. Integrated ecological-economic fisheries models-evaluation, review and challenges for implementation. *Fish Fish.* 19(1), 1-29. DOI: 10.1111/faf.12232
- Ome Barrera, O., Zafra Mejía, C., 2018. Factores clave en procesos de biorremediación para la depuración de aguas residuales. Una revisión. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 21(2), 573-585. DOI: 10.31910/rudca.v21.n2.2018.1037
- Pérez-Maqueo, M., Delfín, C., Fregoso, A., Equihua, E., 2006. Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos. *Gac. Ecol.* 78, 65-84.
- Perrone, A., Inam, A., Albano, R., Adamowski, J., Sole, A., 2020. A participatory system dynamic modeling approach to facilitate collaborative flood risk management: A case study in the Bradano River (Italy). *J. Hydrol.* 580, 124354. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124354
- Ruiz-Ballesteros, E., 2011. Social-ecological resilience and community-based tourism: An approach from Agua Blanca, Ecuador. *Tour. Manag.* 32(3), 655-666. DOI: 10.1016/j.tourman.2010.05.021

- Saba, G., Goldsmith, K., Cooley, S., Grosse, D., Meseck, S., Miller, A., Phelan, B., Poach, M., Renault, R., St. Laurent, K., Teste, J., Weis, J., Zimmerman, R., 2019. Recommended priorities for research on ecological impacts of ocean coastal acidification in the U.S. Mid-Atlantic. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 225, 106188. DOI: 10.1016/j.ecss.2019.04.022
- Samal, N., Wollheim, W., Zuidema, S., Stewart, R., Zhou, Z., Mineau, M., Borsuk, M., Gardner, K., Glidden, S., Huang, T., Lutz, D., Mavrommati, G., Thorn, A., Wake, C., Huber, M., 2017. A coupled terrestrial and aquatic biogeophysical model of the Upper Merrimack River watershed, New Hampshire, to inform ecosystem services evaluation and management under climate and land-cover change. *Ecol. Soc.* 22(4), 18. DOI: 10.5751/ES-09662-220418
- Serpetti, N., Baudron, A., Burrows, M., Payne, B., He-laouët, P., Fernandes, P., Heymans, J., 2017. Impact of ocean warming on sustainable fisheries management informs the ecosystem approach to fisheries. *Sci. Rep.* 7, 13438. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13220-7>
- Shoemaker, D., BenDor, T., Meentemeyer, R., 2018. Anticipating trade-offs between urban patterns and ecosystem service production: Scenario analyses of sprawl alternatives for a rapidly urbanizing region. *Comput. Environ. Urban Syst.* 74, 114-125. DOI: 10.1016/j.compenurbysys.2018.10.003
- Sivapalan, M., Blöschl, G., 2015. Time scale interactions and the coevolution of humans and water. *Water Resour. Res.* 51(9), 6988-7022. DOI: 10.1002/2015WR017896
- Subrahmanyam, S., Adams, A., Raman, A., Hodkings, D., Heffernan, M., 2017. Ecological modelling of a wetland for phytoremediation Cu, Zn and Mn in a gold-copper mine site using *Typha domingensis* (Poales: Typhaceae) near Orange, NSW, Australia. *Eur. J. Ecol.* 3(2), 77-91. DOI: 10.1515/eje-2017-0016
- Tieskens, K., Shaw, B., Haer, T., Schulp, C., Verburg, P., 2017. Cultural landscapes of the future: Using agent-based modeling to discuss and develop the use and management of the cultural landscape of South West Devon. *Landscape Ecol.* 32, 2113-2132. DOI: 10.1007/s10980-017-0502-2
- Volenzo, T., Odiyo, J., 2018. Ecological public health and participatory planning and assessment dilemmas: The case of water resources management. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15(8), 1635. DOI: 10.3390/ijerph15081635
- Wu, P., Mengersen, K., McMahon, K., Kendrick, G., Chartrand, K., York, P., Rasheed, M., Caley, M., 2017. Timing anthropogenic stressors to mitigate their impact on marine ecosystem resilience. *Nat. Commun.* 8, 1263. DOI: 10.1038/s41467-017-01306-9
- Yue, T.-X., Jorgensen, S., Larocque, G., 2011. Progress in global ecological modeling. *Ecol. Model.* 222(14), 2172-2177. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2010.06.008
- Zafra, C., Temprano, J., Tejero, I., 2017. The physical factors affecting heavy metals accumulated in the sediment deposited on road surfaces in dry weather: A review. *Urban Water J.* 14(6), 639-649. DOI: 10.1080/1573062X.2016.1223320
- Zhang, J., Sun, J., Ma, B., Du, W., 2017. Assessing the ecological vulnerability of the upper reaches of the Minjiang River. *PLoS ONE* 12(7), e0181825. DOI: 10.1371/journal.pone.0181825
- Zhou, B., Wu, J., Anderies, J., 2019. Sustainable landscapes and landscape sustainability: A tale of two concepts. *Landscape Urban Plann.* 189, 274-284. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2019.05.005
- Zia, A., Bombliès, A., Schroth, A., Koliba, C., Isles, P., Tsai, Y., Mohammed, I., Bucini, G., Clemens, P., Turnbull, S., Rodgers, M., Hamed, A., Beckage, B., Winter, J., Adair, C., Galford, G., Rizzo, D., Van Houten, J., 2016. Coupled impacts of climate and land use change across a river-lake continuum: insights from an integrated assessment model of Lake Champlain Missisquoi Basin, 2000-2040. *Environ. Res. Lett.* 11, 114026. DOI: 10.1088/1748-9326/11/11/114026