

# ELEMENTOS PARA ELABORAR UN ESTUDIO DE VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LAS REGIONES EN MÉXICO

Rafael Borrayo López<sup>1</sup>

## Resumen.

Este ensayo es producto de una revisión de la literatura especializada sobre la vulnerabilidad al cambio climático, parte de un proyecto de mayor alcance. Se concluye sobre la enorme confusión existente en las definiciones y usos del concepto de vulnerabilidad. Se propone un marco analítico (formal) que permite superar esta situación y se proponen aplicaciones de referencia (compatibles) que permitirán ser implementadas para el estudio sobre vulnerabilidad al cambio climático de las regiones en México.

Este ensayo se conforma de notas que forman parte del diseño de un proyecto de mayor alcance sobre la vulnerabilidad al cambio climático de las regiones en México. Son el resultado de una revisión de la literatura especializada cuyo foco fue colocado en ofrecer respuestas iniciales a las preguntas como las siguientes: ¿Cuál es el significado del concepto de vulnerabilidad? ¿Cuál es la utilidad de los estudios de vulnerabilidad para la concepción de política pública? ¿Por qué es necesario marco analítico (formal)? ¿Cuáles son los enfoques para medir la vulnerabilidad? ¿Hay metodologías consistentes para realizar estudios de evaluación de la vulnerabilidad de un sistema?

Las nociones de *vulnerabilidad* y *sustentabilidad*<sup>2</sup> han evolucionado acelerada y paralelamente hacia conceptualizaciones más rigurosas y precisas durante las últimas tres década. En el ámbito de la sustentabilidad, no es necesario enumerar los avances alcanzados desde los enfoques teóricos hasta las aplicaciones de política pasando por los diseños institucionales en la materia, a pesar de las insuficientes. Sin embargo, el ámbito de la vulnerabilidad me parece

---

<sup>1</sup> Investigador de tiempo completo del Instituto de Investigaciones Económicas, Universidad Nacional Autónoma de México. [mara@servidor.unam.mx](mailto:mara@servidor.unam.mx).

<sup>2</sup> Por 'noción' se entiende un primer acercamiento (pre-analítico), intuitivo, que parte de la idea de uso común y coloquial, para elaborar después conceptos aceptables para el análisis y las aplicaciones; por lo que la palabra vulnerabilidad refiere inicialmente a la capacidad o grado con el cual un sistema es posible que experimente un daño originado por la exposición a un potencial de daño (Turner II et al., 2003); y la palabra sustentabilidad nos remite a la idea central de mantenimiento de la capacidad de un sistema conjunto economía-medio ambiente (SE-SA) de tal manera que se satisfaga las necesidades y deseos de humanos en el largo plazo (Common, 2005). Mientras que la noción de DS, en la versión popular del Informe Brundtland, involucra esencialmente la forma (estilo o patrón) de crecimiento económico que permitiría satisfacer las necesidades y deseos de las generaciones actuales sin comprometer la capacidad del sistema conjunto SE-SA para las generaciones futuras.

que su desarrollo analítico ha sido más lento, con menos “consensos” sobre su conceptualización y sus aplicaciones.

Aunque ambos conceptos traslapan dominios de conocimiento y terminologías, el concepto de sustentabilidad ha ligado más su evolución a las teorías económica y ecológica, mientras que la experiencia interdisciplinaria asociada al concepto de vulnerabilidad es más amplia e incorpora de manera sustantiva la dimensión de la acción humana, institucional o de las capacidades construidas para la adaptación al cambio climático y otros eventos adversos.

La vulnerabilidad es un concepto nodal que se ha empleado en diferentes campos de conocimiento. La literatura ubica sus raíces en la geografía y la investigación en el campo de los impactos (daños) naturales, pero desde los años noventa se ha extendido hacia otras áreas de investigación tales como: ecología, salud pública, pobreza y desarrollo, gestión de desastres, seguridad alimentaria, cambios de uso del suelo y, más recientemente, en estudios de vulnerabilidad al cambio climático. Estos últimos, gradualmente se han convertido en un campo estudio de políticas públicas con instrumentos de política que tienen esta focalización. Además, tienen un acentuado carácter prospectivo, un reconocimiento implícito al hecho de que siempre prevenir resulta menos costoso para una sociedad que remediar los impactos de un conjunto de daños potenciales.

Sin embargo, tal extensión del uso no ha corrido al parejo con la unificación y precisión de los conceptos y sus aplicaciones. Es usual encontrar una gran variedad de definiciones y usos del concepto, desde los muy descriptivos, propios de las ciencias naturales, hasta los ligados a las ciencias sociales (incluye la economía) que tienden a usar un modelo explicativo específico.

Toda sociedad enfrenta un futuro siempre desconocido y, regularmente, manifiesta una insuficiente capacidad de prevención y defensa que vuelve las consecuencias de eventos perturbadores cada vez más intensos. Los hechos abruma y sorprenden tanto más cuanto el futuro se nos presente desconocido, esencialmente, por nuestra significativa incomprensión sobre los procesos de interdependencia entre sistemas sociales (incluye a la economía) y los sistemas biofísicos o ambientales (ecosistemas). En palabras de Adger: “... *While policy-makers always express surprise at events, many of these are predictable or at least ‘imaginable’...*” (2006; p-276). Con esto quiero describir, sintéticamente, un aspecto esencial del contexto y el contenido amplio que implica el concepto de *vulnerabilidad*.

Durante su evolución, el concepto de vulnerabilidad al cambio climático ha estado relacionado o equiparado a conceptos como: resiliencia, marginalidad, susceptibilidad, adaptabilidad, fragilidad, riesgo, además de, exposición, sensibilidad y criticidad (Füssel, 2007). Como inicialmente puede apreciarse, la existencia de más de una conceptualización, terminologías diversas, así como de múltiples metodologías para elaborar aplicaciones, ha resultado en un conjunto de problemas severos que han impedido la concreción de marcos analíticos más consistentes para la concepción de política pública.

Considero que los estudios de vulnerabilidad se han vuelto gradualmente un recurso indispensable de política pública porque ayudan a mejorar el control (gobierno) de la sociedad sobre procesos de interdependencia entre un *sistema acoplado o conjunto social-ambiental (SS-SA)*<sup>3</sup>. Un mejor conocimiento sobre estos procesos permitirá alcanzar un mejor control sobre lo que hoy es *predecible* y transformar gradualmente lo *imaginable* al ámbito de lo predecible, que es la tarea principal de la *gestión (social) de la vulnerabilidad de un sistema SS-SA*.

Una sociedad es menos vulnerable si de manera sistemática reduce su exposición a riesgos mediante estrategias de política (acción humana) preventivas y correctivas, que se inspiran e implementan un *principio precautorio*, éticamente justificado en razón de la incertidumbre y el reconocimiento de la existencia de umbrales del sistema conjunto SS-SA.

### **Breves antecedentes y objetivos del ensayo**

De una revisión de la literatura sobre la ‘vulnerabilidad al cambio climático’ es usual concluir que abundan las definiciones, las conceptualizaciones y las aplicaciones, que se manifiestan en la comunicación de resultados como una enorme confusión, interpretaciones y mediciones diversas, algunas sin métrica y que, por lo tanto, son imprecisas para diseñar política pública (confiable), sobre todo si una recomendación se traduce, por ejemplo, en el desembolso de recursos económicos (“gasto” de inversión en infraestructura) para la defensa o protección de la sociedad.

---

<sup>3</sup> Tal control general nos remite a un conjunto de opciones de política fundamentales para limitar los impactos adversos del cambio climático tales como: i) *mitigación*, como la reducción de gases de efecto invernadero o mejorar sus sumideros finales; ii) *adaptación*, como la moderación (“amortiguamiento”) de los efectos adversos mediante acciones de amplio alcance; iii) *compensación*, vía la transferencia de ingresos (u otros recursos) desde quienes contribuyen desproporcionalmente al cambio climático hacia aquellos que sufren o padecen desproporcionalmente tales cambios (Füssel, 2007).

Un estudio de análisis de contenidos<sup>4</sup> realizado por Janssen et al (2006) sobre tres dominios de conocimiento: *resiliencia*, *vulnerabilidad* y *adaptación*, en artículos y libros publicados entre 1960 y 2005<sup>5</sup>, muestran la evidencia sobre crecimiento muy acelerado desde la segunda mitad de los años noventa en los tres dominios y dan cuenta de que hay más similitud en las definiciones teóricas que en las aplicaciones o en los estudios de evaluación de la vulnerabilidad.

No pretendo dar cuenta exhaustiva de la evolución del concepto y los diferentes enfoques o escuelas y sus múltiples metodologías de evaluación de la vulnerabilidad. Sólo para documentar el estado de la situación, uno de los estudios más recientes realiza un análisis del concepto y de sus usos identificando veinte definiciones (Wolf et al, 2008)<sup>6</sup>. La literatura documenta varias escuelas de pensamiento sobre la vulnerabilidad, diferentes enfoques...etc<sup>7</sup>, pondré mi atención en aquellos desarrollos recientes que me parece representan un “salto cualitativo” para el análisis y evaluación de la vulnerabilidad y que elaboran modelos formales: i) estáticos como Luers et al., 2003; Luers, 2005; Metzger et al., 2005; y en particular, ii) dinámicos como Ionescu et al (2005)<sup>8</sup>.

El diagnóstico general se sintetiza en la existencia de conceptualizaciones, terminologías y aplicaciones distintas, que evidencian problemas severos por superar. Por la complejidad del objeto de estudio es muy difícil construir marcos analíticos del tipo de “solución única”, el ámbito se restringe a “soluciones múltiples” que compiten en la conformación de un marco más unificado y confiable en tanto que es, aceptablemente, consistente para el análisis y la cuantificación de procesos. En palabras de Ionescu et al (2009; pág. 2): “ La conclusión preeliminar más clara alcanzada hasta la fecha es que hay demasiada confusión...”

Este ensayo forma parte de una investigación más amplia (en proceso), que ha seleccionado el marco analítico (formal) de Ionescu et al. (2005) y pretende aplicarlo a un estudio de vulnerabilidad al cambio climático de las regiones en México. Por lo que expondremos los

---

<sup>4</sup> Refiere al conjunto de técnicas que permiten realizar análisis de textos para explorar y cuantificar el impacto de tipo de investigaciones, por grupos, redes, etc. (en inglés, equivale al término *bibliometric analysis*).

<sup>5</sup> En particular, 771 artículos científicos que usan la palabra clave de ‘vulnerabilidad’ en el contexto del cambio climático, de un total de más de 1500 trabajos seleccionados como muestra de estudio.

<sup>6</sup> Pero existe una lista de 30 definiciones en sitio especializado en el tema ([www.vulnerabilitynet.org/definitions](http://www.vulnerabilitynet.org/definitions)) y hasta de 35 (!) definiciones identificadas por autores reconocidos en el campo (*ibid*, 2008).

<sup>7</sup> En autores conocidos en el campo como Ager (2006), Turner II et al. (2003), se encuentran revisiones exhaustivas y más recientemente en Hinkel J., 2008, Hinkel, J. y Klein R.J.T., 2006.

<sup>8</sup> Este trabajo seminal ha evolucionado a través de diferentes publicaciones (Hinkel y Klein, 2007, Wolf et al., 2007; Hinkel, 2008) que culminan con las tesis de doctorado de C. Ionescu (2008) y S. Wolf (2009).

aspectos esenciales de un marco analítico que tienen como características generales: i) asegurar que el proceso de análisis, interpretación y representación de la vulnerabilidad sea realizado de manera sistemática y permita reducir en lo posible inconsistencias analíticas; ii) mejorar la claridad y transparencia en la exposición de los métodos y resultados de los estudios de evaluación; y iii) este marco se considera una *precondición* para implementar algún *enfoque computacional* que soporte las evaluaciones de la vulnerabilidad (Ionescu et al., 2009).

El marco parte de un *concepto relativo* en el sentido de que postulados precisos sobre la vulnerabilidad requieren de especificar claramente tres conceptos básicos (o primitivos): i) *entidad*, ii) *estímulo* y iii) *criterio de preferencia*, este último indispensable para evaluar el resultado de la interacción entre una entidad y un estímulo. Cualquier *entidad*, sea un sistema social y/o ambiental (SS-SA), organización, incluso un individuo, expuestos a un cambio repentino (sorpresa), emergente o regular<sup>9</sup>, pero con consecuencias desconocidas, manifiesta fragilidades o vulnerabilidades específicas y asociadas a la naturaleza de la entidad de interés y su *localización espacial*.

En consecuencia, a lo largo de este ensayo se considera significativo un postulado general (forma canónica) sobre la vulnerabilidad que involucra a los tres conceptos básicos: “*Una entidad es vulnerable a un estímulo específico con respecto a cierto criterio de preferencia*”<sup>10</sup>

Por lo tanto el concepto de vulnerabilidad es considerado como una *propiedad de la entidad (o sistema)* que se deriva de los conceptos básicos, de manera similar a como los conceptos de ‘sensibilidad’ y de ‘capacidad de adaptación’, componentes esenciales en la conceptualización del IPCC, pero que no son necesarios para este marco analítico.

En la sección 2 de este capítulo se expondrá el marco general que permite evaluar la vulnerabilidad específica de un sistema con circunstancias únicas y que, a la vez, el marco sea bastante genérico para asegurar que la vulnerabilidad de este sistema pueda ser comparado con la de otros sistemas, posiblemente evaluados usando metodologías distintas. En la sección 3 se ilustran dos aplicaciones recientes de referencia sobre vulnerabilidad al cambio climático que documentan la viabilidad del marco analítico (formal) de base por emplear para nuestro proyecto sobre la vulnerabilidad de las regiones en México.

---

<sup>9</sup> Se trata de cambios ambientales, tecnológicos o socioeconómicos o demográficos...

<sup>10</sup> Por ejemplo, las áreas costeras planas de México son vulnerables al aumento de nivel del mar con respecto a un criterio de preferencia que identifica a un pequeño número de gente afectada por inundación costera.

Estas dos secciones contienen el núcleo del trabajo y sintetiza los dos elementos requeridos para empezar a implementar nuestra investigación: i) un marco conceptual independiente del dominio de aplicación específica y ii) un proceso bien definido que especifique cómo los conceptos generales pueden especializarse para adecuarlos al caso específico de evaluación. Estas serían las características de un marco analítico-conceptual común para evaluar la vulnerabilidad, comparar (regiones, países, sectores) y poder comunicar con eficacia los resultados del estudio. Finalmente, en la última sección se exponen conclusiones preeliminares.

## **2. Un marco analítico (formal) para conceptualizar la vulnerabilidad de un sistema**

### **2.1 Vulnerabilidad como un proceso dinámico**

Ninguno de los tres conceptos básicos es de naturaleza estática, ni los sistemas (o subsistemas) son independientes. Todos cambian simultáneamente y cada vez más de manera interdependiente. La entidad, acotada a un sistema integrado social y ambientalmente, evoluciona porque cambia la estructura específica, velocidades de transformación y las escalas en el tiempo y espacio de los sistemas ambientales y la organización social en general. Por lo tanto, se alteran también los inputs endógenos y exógenos. Los cambios pueden ser graduales (tendencias) o tan repentinos (shocks) que generen alteraciones radicales (discontinuidades) en la entidad observada, tal vez que la perturbación aleje al sistema de un estado de “equilibrio” tanto que su retorno a él sea una posibilidad con muy baja probabilidad; más adecuados enfoques naturaleza como el de Holling (1973, 1986).

En consecuencia, para comprender mejor los procesos complejos de la vulnerabilidad es necesario elaborar un marco analítico-conceptual que reconozca de entrada la esencia dinámica del concepto, empleando mapeos que representen relaciones causales entre componentes de los sistemas y los estados resultantes, necesarios para apuntalar la selección de indicadores y la metodología para realizar una evaluación de vulnerabilidad; esto es, construir modelos matemáticos que den sustento a modelos computacionales. La representación conceptual de un sistema debería agregar efectos de recirculación (feedback), para tratar situaciones donde los resultados de un paso alteren las condiciones estructurales subsecuentes.

Desde la perspectiva de la sustentabilidad, la economía ecológica nos propone una visión de sistema integrado (económico-social-ambiental) totalmente compatible con la propuesta de análisis de la vulnerabilidad como un concepto dinámico. Un sistema económico (SE) cambia

los sistemas ambientales (SA), y se adapta en respuesta a esos cambios como un proceso coevolutivo. Si el crecimiento económico aumenta la escasez de bienes y servicios ecológicos en relación a los bienes y servicios antropogénicos, entonces el SE tiene que adaptarse a este hecho. La forma en la que un SE evoluciona no está predeterminada; puede ser influida por la política pública y, en general, de diferentes maneras, para bien o para mal.

El punto de partida será la ampliamente citada definición de vulnerabilidad como: “*the degree to which a system is susceptible to, or unable to cope with, adverse effects of climate change, including climate variability and extremes. It is a function of the character, magnitude and rate of climate variation to which a system is exposed, its sensitivity, and its adaptive capacity*” (McCarthy J., 2001).<sup>11</sup> Sin embargo, se han documentado los problemas para volver operativa tal definición, sus componentes no están definidos con mayor precisión o existe varias maneras de entenderla. Se afirma que es una función de la exposición, capacidad adaptativa y sensibilidad, pero no se proporciona información sobre su forma. En consecuencia, en la literatura abunda la inconsistencia y la comparabilidad se vuelve difícil, si no imposible.<sup>12</sup>

Me parece que una contribución sustantiva que abre un amplio camino que ayudará a superar tal insuficiencia es el trabajo de Ionescu *et al.* (2009)<sup>13</sup>, ofrece tal vez el primer marco formal que hace posible conceptualizar y sustentar mejor los estudios de evaluación de la vulnerabilidad de un sistema al cambio climático. Tiene la virtud de integrar los cuatro componentes de la definición de vulnerabilidad del IPCC, de manera precisa y consistente a partir de los tres conceptos básicos y los emplea para construir las nociones más complejas de ‘sensibilidad’ y ‘capacidad adaptativa’ de un sistema que sigue un proceso co-evolutivo.

## **2.2 Elementos para un marco analítico-conceptual de la vulnerabilidad<sup>14</sup>**

El primer elemento que se requiere para evaluar la vulnerabilidad es un *marco conceptual*. Pero también, *a priori* necesitamos uno tan general como sea posible, de tal manera que pueda aplicarse a una variedad de sistemas naturales y sociales y garantice comparabilidad entre diferentes enfoques. Me parece que el más general y desarrollado (coherente, consistente) es

<sup>11</sup> En el glosario del Working Group II volume of the IPCC Third Assessment Report (p. 995).

<sup>12</sup> Véase en Hinkel y Klein, 2007, Wolf et al., 2007; Hinkel, 2008) y C. Ionescu (2008) y S. Wolf (2009).

<sup>13</sup> Las tesis de doctorado de C. Ionescu *et al.* (2009) y S. Wolf (2009) son desarrollados más completos en esta dirección.

<sup>14</sup> Esta sección se presenta una síntesis, suficiente para el contenido de este ensayo, que sigue fielmente las siguientes referencias fundamentales: Ionescu, C. et al., 2005; Ionescu, C. et al., 2006; Wolf S. et al., 2007; Wolf S. et al., 2008; Ionescu, C., 2008; Wolf S., 2009.

el marco analítico (formal) propuesto por Ionescu *et al* (2005). Su definición de vulnerabilidad difiere, de muchas en la literatura, en que es independiente de los dominios de conocimiento específico (disciplinas o campos de conocimiento) y del sistema de interés (p.ej. sistema ecológico, biológico o social). Así, la vulnerabilidad se puede definir mediante conceptos matemáticos y se tomarán la nomenclatura y los postulados necesarios de Ionescu *et al* (2005).

### 2.2.1 Marco analítico de un sistema *sín* adaptación (aprendizaje)

Este marco analítico se fundamenta a partir de una triada de conceptos básicos (o primitivos) que requieren ser debidamente especificados:

- i) la *entidad*, objeto de evaluación de su situación de vulnerabilidad,
- ii) los *estímulos* a los cuales la entidad podría ser vulnerable y
- iii) el *criterio de preferencia* usado para evaluar los resultados (adversos o indeseables) de la interacción entre una entidad y los estímulos.

En otras palabras, se evalúa la vulnerabilidad de una entidad a un *estímulo específico* con respecto a cierto criterio de preferencia.

En consecuencia, cualquier definición de vulnerabilidad debe contener los tres conceptos básicos con el fin de comunicar la información significativa y, de hecho, muchos enfoques de la literatura así lo hacen.

En el marco analítico seleccionado la *entidad*, objeto de evaluación de su estado de vulnerabilidad, se representa mediante un sistema dinámico discreto el cual está expuesto a un *estímulo o input exógeno*. La forma más simple de sistema dinámico con un input es uno discreto, determinista, dado por una *función (mapeo) de transición (f)* del sistema:

$$f : X \times E \rightarrow X \dots\dots\dots(1)$$

Donde  $X$  es el conjunto de estados del sistema y  $E$  es el conjunto de inputs exógenos. El estado de un sistema describe todas las propiedades relevantes de él en un tiempo. Dado entonces un estado  $x$  ( $x \in X$ ) y un input  $e$  ( $e \in E$ ), la función de transición nos dice cuál elemento de  $X$  será el próximo estado (o evolución) del sistema:  $f(x, e)$ .

Para poder afirmar que la evolución de la entidad, bajo el estímulo, hacia un ‘nuevo’ estado es “mala” o “buena”, es necesario un criterio de preferencia. Usualmente este juicio se construye por comparación con una evolución “normal” o una evolución sujeta a un “input cero”.

Vamos a representar este criterio de pertenencia mediante una relación definida sobre el conjunto  $X$ , sea  $\prec$  esta relación, que significa “estar peor que”, y es llamado *orden estricto parcial* si cumple con las siguientes propiedades: *i) transitividad*: si  $x \prec y$  y  $y \prec z$ , entonces  $x \prec z$ ; y *ii) antirreflexiva*: ningún estado está peor que él mismo.

No se espera que el ordenamiento  $\prec$  sea total, algunas veces no podremos ser capaces de decir si  $x \prec y$  o  $y \prec x$ ; dada la propiedad (ii) esta cuestión es válida sólo si  $x \neq y$ . No debe confundirse con el uso que tiene  $\prec$  en microeconomía.

Con estos conceptos básicos, por ejemplo, podemos definir ya una función o mapeo que asocie a cualquier estado  $x$  un número real positivo, y que puede interpretarse como una *función de impacto* dada por:

$$g: X \rightarrow R_+ \dots\dots\dots(2)$$

Los impactos pueden estar medidos en costos. Así, si suponemos que el impacto más grande (costos más altos) como el peor estado del sistema, podemos comparar impactos y podemos definir la *relación*  $\prec$  mediante:

$$x \prec x' \Leftrightarrow g(x) > g(x') \dots\dots\dots(3)$$

Esto es,  $x$  está peor que  $x'$  si y sólo si (sss,  $\Leftrightarrow$ ) el número real positivo  $g(x)$  es mayor que el real  $g(x')$ . La *relación*  $\prec$  es un orden parcial estricto (no podemos comparar estados para los cuales el mismo valor ha sido asociado a mediante  $g$ ).

Además, podemos incorporar una noción de *valor umbral*  $T (\in R_+)$  mediante la siguiente relación:

$$x \prec x' \Leftrightarrow g(x) > T > g(x') \dots\dots\dots(4)$$

Es decir, los impactos observados en el estado  $x$  son considerados demasiado altos, mientras que los impactos observados en  $x'$  se consideran aceptables.

### ***Vulnerabilidad con un input de referencia***

En consecuencia, una entidad representada por el sistema  $f$  en el estado  $x$ , es vulnerable a un estímulo o input  $e$ , si su evolución es considerada “mala”, esto es, es una evolución que es “peor” a una evolución de “referencia” o “normal”. Una evolución de referencia se obtiene por la aplicación de un input de referencia ( $e^*$ ) a un estado  $x$  del sistema. Por lo tanto, formalmente se puede postular que:

**Definición 1.** Un sistema  $f : X \times E \rightarrow X$  en el estado  $x$  es *vulnerable* a  $e$ , con respecto al orden parcial estricto  $\prec$  y el input de referencia  $e^*$ , si

$$f(x, e) \prec f(x, e^*) \dots\dots\dots(5)$$

Gradualmente se quiere ir construyendo una aplicación sobre la vulnerabilidad al cambio climático. Pensemos que nuestro foco de interés está en elaborar una evaluación de la influencia del cambio climático sobre una región. Considerar que disponemos de salidas de un modelo computacional que proyecta la evolución de variables de interés, dado un cierto aumento en la temperatura promedio, tales como la precipitación pluvial, el nivel del mar, ... El estado de la región de interés incluye todos los valores de todas las variables importantes, es un elemento del espacio-estado  $X$ . La función de transición  $f$  proporciona el estado de la región después de un cierto periodo de tiempo, bajo la influencia de un aumento dado en la temperatura promedio ( $e^*$ ). Es entonces directo afirmar que la región en el estado  $x$  es vulnerable a  $e$  si  $f(x, e) \prec f(x, e^*)$ . Si hay más de una región, cada región estará representada por un estado diferente. Las regiones que están en un estado inicial “mejor” son probablemente menos vulnerables a un dado aumento de la temperatura promedio.

Es muy importante identificar el patrón de comparación común entre entidades diferentes. Este es el caso en el cual dos entidades diferentes están representadas por dos elementos del espacio-estado y están expuestas al mismo input de referencia. De esta manera se evita la inconsistencia en la comparación (riesgo de “comparar manzanas con naranjas”).

### **Extensión dinámica del marco analítico-conceptual**

Cuando definimos vulnerabilidad con un input de referencia, hemos asociado una evolución del sistema desde el estado actual al próximo estado mediante una función de transición. Dado que  $e$  y  $e^*$  son elementos del espacio de input  $E$ , con esta función de transición calculamos el próximo estado (“un paso”). Sin embargo, en muchas aplicaciones es más natural considerar la evolución de un sistema como una *secuencia de estados*  $y$ , considerar además, *escenarios* y *escenarios de referencia*, en lugar de los inputs puntuales, para realizar estudios de evaluación de la vulnerabilidad de un sistema.

Podemos entonces incorporar ahora la noción de *escenario* como una secuencia de inputs:

$es = [e_1, e_2, \dots, e_n]$ , que ocasionará que el sistema experimente  $n$ -transiciones:

$xs = [x_0, x_1, \dots, x_n]$ , donde los elementos de la secuencia son dados por:

$$\begin{aligned} x_0 &= x \\ x_1 &= f(x_0, e_1) \\ x_2 &= f(x_1, e_2) \quad \dots\dots\dots(6) \\ &\dots \\ x_n &= f(x_{n-1}, e_n) \end{aligned}$$

La secuencia de estados  $xs$  es llamada trayectoria de longitud  $n$ .

### **Vulnerabilidad con un escenario de referencia**

De manera similar representamos un escenario de referencia como la secuencia

$es^* = [e_1^*, e_2^*, \dots, e_n^*]$ , con la cual calculamos una trayectoria de referencia

$xs^* = [x_0^*, x_1^*, \dots, x_n^*]$  a partir del estado inicial  $x_0^* = x$  y  $x_{k+1}^* = f(x_k^*, e_{k+1}^*)$ . Igualmente, en

lugar de comparar elementos de  $X$ , ahora comparamos trayectorias.

**Definición 2.** Un sistema  $f : X \times E \rightarrow X$  en el estado  $x$  es *vulnerable* a un escenario-input ‘ $es$ ’ (con  $es \in E^n$ ), con respecto al orden parcial estricto  $\prec$  y el escenario de referencia  $es^*$  (con  $es^* \in E^n$ ), si

$$xs \prec xs^* \quad \dots\dots\dots(7)$$

Donde  $x_s$  y  $x_s^*$  son las trayectorias inducidas por el escenario-input y por escenario de referencia, respectivamente.

Para continuar construyendo nuestra aplicación, vamos a considerar ahora que la evolución es dada por una secuencia de cambios en la temperatura promedio (p.ej. 1 por año durante un periodo de 50 años). En evaluación de la vulnerabilidad interesa saber cómo la trayectoria de la región se compara con la trayectoria de referencia en cualquier punto, no solo en el estado final. Por ejemplo, aún cuando el estado final fuese aceptable, la trayectoria transcurrir por estados inaceptables durante periodos intermedios.

### 2.2.2 Marco analítico de un sistema con adaptación

Se ha construido una definición simple de vulnerabilidad, insuficiente para representar conceptos que se usan para sistemas más complejos que tienen capacidades de aprendizaje, incorporar retroalimentación y desarrollo de posibilidades de adaptación. Se requiere entonces una extensión del sistema que distinga los input de los controles, los cuales representan la posibilidad del sistema de influir sobre su transición.

En consecuencia, denotando por  $u$  los elementos del conjunto de controles  $U$ , ahora el próximo estado del sistema  $f(x, e, u)$  depende de los valores de  $u \in U$ , que es un mapeo:

$$f : X \times E \times U \rightarrow X \dots\dots\dots(8)$$

Alternativamente se puede referir a  $u$  como controles, acciones o comandos. De manera similar a como se construye el caso de referencia  $e^*$  (input de referencia o “no-input”), se puede asumir que el conjunto  $U$  contiene una “acción de referencia” o una opción “no hacer nada”, denotada por  $u^*$ . Además, en general la función de transición  $f$  será *parcial*: no todas las acciones son posibles en cualquier estado.

En el intento de evaluar la vulnerabilidad al cambio climático de una región tenemos que considerar no sólo el cambio del input (temperatura promedio) sino también sus posibilidades de reaccionar o prever esos cambios y tomar acciones al respecto. Por ejemplo, dentro de la región vamos a suponer la comunidad de agricultores (entidad) cambia el tipo de cultivos e invierte en tecnología de riego. Un elemento  $x \in X$  proporcionará la información relevante sobre la localización geográfica, el capital y la tecnología disponible, el acceso a la información

climatológica etc.... Como el input de interés es la temperatura promedio, el conjunto de inputs será  $R$ , las posibilidades de acción de los agricultores se representan por el conjunto  $U$ . La función de transición será parcial: una acción  $u$ , por ejemplo, inversión en riego, estará disponible para algunos agricultores pero no a todos, dependiendo del capital disponible en el estado  $x$ .

Con esta construcción es suficiente para incorporar al marco formal los conceptos de potencial de daños (*hazards*) e *impacto potencial* y *riesgo* --como medida del conjunto de impactos potenciales. Intuitivamente una noción de daño está relacionada con un input que tiene el potencial para conducir a una evolución “mala” del sistema.

Con el fin de elaborar las definiciones respectivas, vamos a simplificar la evolución del sistema a un paso, el próximo estado, en lugar de una trayectoria de longitud  $n$ . Suponer que se fija un escenario  $e^*$  y un control  $u^*$  ambos de referencia. Se define un *daño relativo* como uno que depende de una acción del sistema. Un daño es entonces un input para el cual existe un control que conduciría a un empeoramiento de la situación. Es decir,

**Definición 3.** Un input  $e \in E$  es un *daño relativo* para un sistema  $f$ , en relación a una acción  $u \in U$ , si:

$$f(x, e, u) \prec f(x, e^*, u^*) \dots\dots\dots(9)$$

**Definición 4.** Un input  $e \in E$  es un *daño* para un sistema  $f$  en el estado  $x$ , si existe al menos una acción  $u \in U$  tal que:  $f(x, e, u) \prec f(x, e^*, u^*)$ . En este caso  $f(x, e, u)$  es llamado un *impacto potencial*.

**Definición 5.** Un input  $e \in E$  es un *daño inevitable* para un sistema  $f$  en el estado  $x$ , si para toda acción  $u \in U$ :  $f(x, e, u) \prec f(x, e^*, u^*)$ .

El riesgo queda incorporado al ser definido, como es usual en este marco, como una medida del conjunto de impactos potenciales. Esta medida puede ser la suma de los daños asociados con los impactos potenciales pesados por sus respectivas probabilidades (valores esperados).

## Capacidad de adaptación del sistema

Aunque se puede construir un problema donde optimice  $f(x, e, u)$  es difícil encontrar especificaciones para tener una solución única. En consecuencia, un problema más útil para la vulnerabilidad de un sistema es un problema de adaptación. El cual se puede elaborar como un problema de selección de una acción  $u \in U$  tal que el resultado del sistema no sea  $f(x, e, u) \prec f(x, e^*, u^*)$ . A dichas acciones evitan los impactos potenciales se le llaman *acciones efectivas*. Aunque el corte no es tan claro, pues podría haber acciones que eviten parcialmente el impacto. Por lo tanto,

**Definición 6.** Una acción  $u$  es *efectiva* para un sistema  $f$  en el estado  $x$ , sujeta a un input  $e$ , si el resultado del sistema *no* es:  $f(x, e, u) \prec f(x, e^*, u^*)$ .

Si no hay acciones efectivas contra  $e$ , entonces  $e$  es un daño inevitable. Si  $e$  es no inevitable, entonces el problema de adaptación anterior tiene al menos una solución. El conjunto de acciones efectivas disponibles para el sistema se emplea para interpretar la noción de capacidad de adaptación. Es decir,

**Definición 7.** La capacidad adaptativa de un sistema  $f$  en el estado  $x$ , sujeta a un input  $e$ , se representa mediante el conjunto de sus *acciones efectivas*.<sup>15</sup>

### 2.2.3 Co-evolución de un sistema y su medio ambiente

Un aspecto que no ha sido capturado del marco formal es el que la vulnerabilidad al cambio climático es el resultado de una interacción de largo plazo entre el sistema y su medio ambiente. Para superar esto, se introduce un modelo de ambiente como un sistema dinámico:

$$h : X \times E \times U \rightarrow E \dots\dots\dots(10)$$

De tal manera que el próximo input desde medio ambiente será  $h(x, e, u)$ , el cual depende del estado del sistema y de su control.

---

<sup>15</sup> Aunque no es de interés para el alcance de este capítulo, se puede considerar incluso la calidad de las acciones disponibles para el sistema, no solo su número, podemos también definir la capacidad como una medida de esta calidad. La complicación es que se requiere de supuestos adicionales que capturen las "calidades" que deban ser medidas y comparadas.

En el caso estático anterior el problema consistió de encontrar una acción  $u$  con alguna propiedad (optimalidad o adaptación), y en el dinámico necesitamos encontrar una *política (estrategia)*  $\phi: X \times E \rightarrow U$ ; una función que especifique qué acciones serán tomadas dependiendo del estado del sistema y el input que enfrenta.

Sea  $x_0$  el estado inicial del sistema,  $e_0$  el input inicial desde el medio ambiente y  $\phi$  la estrategia de política, todos dados, entonces podemos representar las trayectorias de longitud  $n$  mediante el siguiente sistema:

$$\begin{aligned} u_0 &= \phi(x_0, e_0), & x_1 &= f(x_0, e_0, u_0), & e_1 &= h(x_0, e_0, u_0); \\ u_1 &= \phi(x_1, e_1), & x_2 &= f(x_1, e_1, u_1), & e_2 &= h(x_1, e_1, u_1); \\ &\dots & & & & \dots\dots\dots(11) \\ u_{n-1} &= \phi(x_{n-1}, e_{n-1}), & x_n &= f(x_{n-1}, e_{n-1}, u_{n-1}), & e_n &= h(x_{n-1}, e_{n-1}, u_{n-1}). \end{aligned}$$

Siguiendo la misma lógica, podemos elaborar postulados sobre la vulnerabilidad si construimos comparaciones sobre trayectorias y trayectorias de referencia ( $x_s^*$ ). Una condición natural sobre la estrategia de política ( $\phi$ ) es que las acciones sean en lo posible efectivas. Entonces podemos definir problemas de estrategia óptima (trayectoria óptima), muy difíciles de instrumentar, y las viables serían las estrategias de *mitigación* y *de mantenimiento de la capacidad de adaptación* que se definen así:

Se dice que una *estrategia*  $\phi$  es de *mitigación* si para toda  $k$  ( $\in 0, 1, \dots, n$ ),  $e_{k+1} = h(x_k, e_k, u_k)$  no es un daño inevitable; significa que podemos seleccionar una  $u_{k+1}$  tal que  $x_{k+1}$  no es peor que  $x_{k+1}^*$ .

Pero también,

Se dice que una *estrategia*  $\phi$  es de *mantenimiento de la capacidad adaptativa* si para toda  $k$  ( $\in 0, 1, \dots, n$ ), existe al menos una acción efectiva  $u_k$ ; la efectividad de una acción se evalúa en términos de la trayectoria de referencia:  $f(x_k, e_k, u_k)$  no es peor que  $x_{k+1}^*$ .

Otra posibilidad que incorpora Ionescu et al (2009) es la interacción de dos o más sistemas o problema de multi-agente...y la extensión del medio ambiente a varios tipos, por lo que problema de multi-escala se vuelve significativo.

### 3. La metodología para aplicar el marco analítico a casos específicos<sup>16</sup>

El segundo elemento que se requiere para la evaluar la vulnerabilidad debe ser un proceso (procedimiento) metodológico bien definido, que organice cómo el marco analítico-conceptual puede aplicarse a casos específicos. Este proceso involucra dos tareas:

- i) Interpretar los conceptos matemáticos, elaborar los mapeos de los componentes del sistema real de interés (la entidad vulnerable, el estímulo y el criterio de preferencia).
- ii) Especificar las formas matemáticas de las funciones de transición, de output y la estrategia de adaptación, como una manera de representar las contrapartes que ligan al 'mundo real'.

Entonces, para aterrizar dicho marco analítico se requiere hacer operativos los conceptos y las relaciones funcionales mediante un conjunto de procedimientos (métodos) secuenciales que aquí se denomina como la *metodología* del marco analítico (formal).

Sin embargo, del análisis de las definiciones teóricas y de los usos del concepto de vulnerabilidad de la literatura hecha por Wolf et al (2008) se concluye que existe una enorme arbitrariedad en la asociación entre los componentes que constituyen el concepto de vulnerabilidad y la multitud de definiciones teóricas, a un grado tal que se vuelve francamente muy difícil dar este paso metodológico en la búsqueda de una mayor integración de estos niveles del análisis. Se presenta siempre una "brecha" entre definiciones y usos, la cual se reduce en la medida en que las aplicaciones son más compatibles y consistentes con el marco conceptual (Hinkel, 2008).

Este paso de la construcción no es directo, ni bien definido como un procedimiento metodológico de "consenso" para la evaluación de la vulnerabilidad de una entidad o sistema conjunto. Es un paso crítico en tanto que es usual realizar una descomposición del concepto de vulnerabilidad en sus diferentes componentes, vistos como las 'causas'. La ventaja de hacer esto está en que los componentes son más fáciles de evaluar de manera separada y se mejora el entendimiento de las relaciones causales de un sistema conjunto. Esto redundando en que la evaluación de la vulnerabilidad se vuelve un instrumento más confiable para elaborar estrategias de política (preventiva) más efectivas.

---

<sup>16</sup> La referencia de base para esta sección es Hinkel y Klein (2006).

Como prototipo o metodología de referencia se recomienda seguir el enfoque propuesto por Hinkel (2005), que se identifica como el método DIVA (*Dynamic and Interactive Vulnerability Assessment*), y sus aplicaciones a estudios de vulnerabilidad al cambio climático, salud pública, pobreza, para un primer momento replicarla durante el desarrollo del estudio de vulnerabilidad de la regiones en México.

Brevemente, el enfoque DIVA es un proceso iterativo de integración de conocimiento (interdisciplinario) donde los objetivos se ajustan en el curso de la elaboración de los estudios de evaluación de la vulnerabilidad (blancos móviles). La metodología anterior fue desarrollada para volver operativo algún concepto de vulnerabilidad mediante la aplicación del método DIVA. El resultado de este paso es el *instrumento DIVA*, el cual consiste de una base de datos, un modelo, un conjunto de escenarios y una rutina de visualización gráfica. El instrumento permite realizar simulaciones de los efectos del cambio climático, cambio socio-económico y la adaptación de los sistemas social y natural, a escalas nacional, regional y global, digamos que tiene como soporte un modelo computacional “completo”. La *entidad* está representada por un modelo de computadora que implementa y, recursivamente, aplica las tres funciones del marco analítico (formal): la función  $f$  de transición de estado, la función  $g$  de outputs y la estrategia de adaptación  $\varphi$ .

### **Aplicaciones de referencia**

En una primera aplicación de referencia se seguirá el proyecto ATEAM, cuyo objetivo consiste en evaluar la vulnerabilidad de la población europea a la pérdida de servicios ambientales debido a los efectos combinados de cambio climático, cambio de uso del suelo y contaminación atmosférica. Se pasa a identificar a los tres conceptos básicos. La entidad es un sistema acoplado social (humano)-ecológico (SS-SA), el cual recibe tanto el input  $e_k$  (estímulo) como los controles  $u_k$  (acciones humanas), elementos del conjunto de controles disponibles ( $U_k$ ). La evolución de este sistema es dada por:

$$x_{k+1} = f(x_k, e_k, u_k) \dots\dots\dots (12)$$

Aquí los controles son las acciones de gestión que la sociedad puede implementar para adaptarse a los impactos potenciales con el fin de mantener los servicios ambientales en los cuales se sustenta. Usualmente son acciones específicas, por ejemplo, el riego del suelo podría

ser una acción de gestión que posibilita asegurar los servicios del suelo para la actividad agrícola.

El segundo concepto básico son los inputs o estímulos para los cuales se evalúa la vulnerabilidad del sistema, los escenarios de clima, uso de suelo y depósito de nitrógeno, como vías posibles de evolución del sistema son dados, y los escenarios fueron tomados del IPCC-SRES. El tercer concepto básico es el criterio de preferencia representado por ' $\prec$ ', el cual compara medidas de pérdida de servicios ambientales.

Dados el estado y el input inicial, se podría calcular el conjunto de posibles próximos estados  $X_{k+1}$  mediante (12) para todas las acciones en el conjunto de controles  $U_k$  y entonces poder comparar este conjunto con el de estados previos  $x_k$  o contra los próximos estados posibles obtenidos de escenarios diferentes. Note que la evolución del sistema se simplifica a un paso.

Para esta aplicación la función de transición del sistema acoplado no es conocida. El conocimiento disponible se integra en modelos hidrológicos y ecológicos que no consideran la retroalimentación de la gestión ambiental (acciones humanas sobre los ecosistemas). En consecuencia, se puede asumir alguna acción promedio  $\bar{u}$  (o gestión tradicional) que sea independiente del input considerado. La función de transición de este sistema determinista sería:

$$x_{k+1} = f_{\bar{u}}(x_k, e_k) \dots\dots\dots (13)$$

Sin embargo, para afirmar que una entidad es vulnerable es necesario construir comparaciones diferentes: estado futuro contra estado presente, estados con escenarios diferentes o estados de regiones subnacionales diferentes.

En una segunda aplicación se seguirá el Proyecto DINAS-COAST. El método DIVA aplicado para este proyecto permite a sus usuarios evaluar la vulnerabilidad de zonas costeras al aumento en el nivel del mar y explorar posibles políticas adaptativas. Los conceptos básicos son: la entidad vulnerable es el sistema costero, los estímulos son dados (escenarios climáticos, de cambio de uso de suelo y socio-económicos). Se trata de un modelo integrado de sistema acoplado social-ambiental costero, con una estructura modular. El modelo es impulsado por escenarios de nivel del mar y socio-económicos, y calcula efectos múltiples (geodinámicos como la erosión y otros más) y sus impactos socio-económicos.

A diferencia de la aplicación anterior (ATEAM), en DIVA se introducen las políticas adaptativas. Para cualquier estado del sistema e input que recibe del medio ambiente, una política adaptativa es una función que genera una acción de adaptación  $u$ , dado por el mapeo:

$$\phi: X \times E \rightarrow U; \phi(x_k, e_k) = u_k \dots\dots\dots (14)$$

Para cada paso de tiempo el modelo DIVA selecciona una acción de adaptación de acuerdo a las cuatro estrategias de adaptación siguientes:

- *Sin adaptación* (sin protección): el modelo solo calcula impactos potenciales;
- *Protección total*: uso de tanta infraestructura como sea necesaria para preservar el *status quo* (esto es,  $x^0$ );
- *Protección óptima*: optimización con base en la comparación de los costos y beneficios de las acciones de adaptación e impactos potenciales;
- *Protección definida por el usuario (policy-maker)*: el usuario define un periodo de retorno de una inundación contra la cual proteger.

La composición de la política de adaptación  $\phi(\cdot)$  con la función de transición  $f(\cdot)$  transforma el sistema a uno determinista (con solución):

$$x_{k+1} = f(x_k, e_k, u_k) = f(x_k, e_k, \phi(x_k, e_k)) = f'(x_k, e_k) \dots\dots\dots (15)$$

Emplea preferentemente componentes monetarios en las comparaciones. Aunque deja a que el usuario defina las medidas no-monetarias.

#### 4. Conclusiones preliminares

Este ensayo es producto de una revisión de la literatura especializada sobre la vulnerabilidad al cambio climático, parte de un proyecto de mayor alcance. Se ha concluido sobre la enorme confusión existente en las definiciones y usos del concepto de vulnerabilidad. Se propone un marco analítico (formal) que permite superar esta situación y se proponen aplicaciones de referencia (compatibles) que permitirán ser implementadas para el estudio sobre vulnerabilidad al cambio climático de las regiones en México.

Para concluir recupero una última idea de Ionescu *et al.* (2009): “el uso de matemáticas no requiere input cuantitativos, ni los resultados tienen que ser cuantitativos. La notación matemática como lenguaje permite formular postulados cualitativos y cuantitativos de una manera concisa y precisa”.

## BIBLIOGRAFÍA

**Adger W.N.**, 2006. Vulnerability. *Global Environmental Change* 16 (2006) 268–281.

**Common M. y Stagl S.**, 2005. *Ecological Economics: An Introduction*. Cambridge University press.

**Füssel H. M.**, 2007. Vulnerability: A generally applicable conceptual Framework for climate change research. *Global Environmental Change* 17, 155–167.

**Hinkel J.**, 2005. DIVA: an iterative method for building modular integrated models. *Advances in Geosciences*, 4, 45–50, 2005.

**Hinkel J.**, 2008. Transdisciplinary Knowledge Integration --Cases from Integrated Assessment and Vulnerability Assessment. FAVAIA Working Paper 7. Potsdam Institute for Climate Impact Research. Disponible en: [www.pik-potsdam.de/favaia](http://www.pik-potsdam.de/favaia).

**Hinkel, J. y Klein R.J.T.**, 2006. Integrating knowledge for assessing coastal vulnerability. Potsdam Institute for Climate Impact Research. Disponible en: [www.pik-potsdam.de/favaia](http://www.pik-potsdam.de/favaia).

**Holling, C. S.** , 1986. The resilience of terrestrial ecosystems; local surprise and global change. *Sustainable Development of the Biosphere*. W. C. Clark and R. E. Munn. Cambridge, Cambridge University Press: 292-317.

**Holling, C. S.** 1973. " Resilience and stability of ecological systems." *Annual Review of Ecology and Systematics* 4: 1-23.

**Ionescu, C.**, 2008. Vulnerability Modelling and Monadic Dynamical Systems. Ph.D. thesis, Freie Universit, at Berlin, forthcoming. Disponible en: ....

**Ionescu, C., R.J.T. Klein, K.S. Kavi Kumar, J. Hinkel y R. Klein**, 2005. Towards a Formal Framework of Vulnerability to Climate Change. NeWater Working Paper 2 and FAVAIA Working Paper 1. Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany, ii+20 pp.

**Janssen M.A., Schoon M.L., Ke W. y Börner K.**, 2006. Scholarly networks on resilience, vulnerability and adaptation within the human dimensions of global environmental change. *Global Environmental Change* 16, 240–252.

**Luers, A.** (2005). The surface of vulnerability: An analytical framework for examining environmental change. *Global Environmental Change*, 15(3), 214–223.

**Luers, A., Lobell, D., Sklar, L., Addams, C., y Matson, P.** (2003). Method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. *Global Environmental Change*, 13(4), 255–267.

**McCarthy, J., Canziani, O., Leary, N., Dokken, D., y White, K.** (Eds.) (2001). Climate change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge, UK: Cambridge University Press. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

**Metzger, M., y Schröter, D.** (2006). Towards a spatially explicit and quantitative vulnerability assessment of environmental change in Europe. *Regional Environmental Change*, 6(4), 201–216.

**Wolf S., Ionescu C., Lincke D., Bisaro S., Hinkel J. y Reckien D.**, 2007. A Formal Framework of Vulnerability Deliverable to the ADAM Project, FAVAIA Working Paper-6. Potsdam Institute for Climate Impact Research. Disponible en:

<http://www.pik-potsdam.de/favaia/pubs/favaiaworkingpaper6.pdf>.

**Wolf S., Lincke D., Hinkel J. Ionescu C. y Bisaro S.**, 2008. A Formal Framework of Vulnerability Deliverable to the ADAM Project. FAVAIA Working Paper 8. Potsdam Institute for Climate Impact Research. Disponible en:

<http://www.pik-potsdam.de/favaia/pubs/favaiaworkingpaper8.pdf>.