

Simulador para la enseñanza interactiva del riesgo de cambio climático

Antonio Torres Valle

correo electrónico: atorres@instec.cu

Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC), La Habana, Cuba

Artículo Original

Erich Martínez Martín

correo electrónico: erich@instec.cu

Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC), La Habana, Cuba.

Resumen

El uso de simuladores constituye una buena práctica para la enseñanza o entrenamiento en la operación de procesos complejos. Este es el caso del cambio climático, el que tiene asociado múltiples fenómenos que no pueden ser reproducidos como prácticas aisladas de laboratorio. Los propios expertos del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) han sugerido indicadores cualitativos para medir los componentes de este riesgo (peligro, vulnerabilidad y exposición) y, aún así, su complejidad es notable por la multi, inter y transdisciplinariedad de los conocimientos necesarios para su evaluación. Uno de los retos más importantes de la enseñanza de estos temas es la multiplicidad de combinaciones que pueden ocurrir por la variedad de entradas de los factores tributarios al riesgo en cada zona del mundo estudiada. Por ello, la presentación de un sistema matricial interdependiente que correlaciona las variables globales y regionales, relativas al riesgo del cambio climático y un sistema recursivo para su evaluación, constituyen las bases del simulador propuesto en este documento. El mismo ha sido probado con escenarios globales y regionales, los cuales se han incorporado al código informático desarrollado para la preparación de ejercicios didácticos preelaborados y como recomendación para la implementación de nuevos casos de estudio.

Palabras claves: cambio climático, mitigación, riesgo, variabilidad, vulnerabilidad

Recibido: 29 de enero de 2015

Aprobado: 26 de junio de 2015

INTRODUCCIÓN

El uso de simuladores para la enseñanza o para el entrenamiento en la operación de procesos complejos es una modalidad común en las prácticas docentes [1].

En muchos casos, las posibilidades de un simulador garantizan el desarrollo de capacidades cognitivas y operativas sin incurrir en errores peligrosos, que pudieran derivarse del entrenamiento sobre objetivos reales, en el caso en que los mismos tuviesen implícitos riesgos operacionales. Estos son los casos de los simuladores de

operación de plantas nucleares, vuelos aéreos, manejo de submarinos, etc. [2].

De manera general, los simuladores ayudan al aprendizaje de los estudiantes de forma interactiva y motivadora, recurriendo al enfoque basado en problemas de la enseñanza, lo que propicia la independencia de los futuros profesionales en la toma de decisiones.

En el año 2009 Google Earth, como parte de una campaña para generar conciencia sobre el cambio climático (CC), se lanzó al desarrollo de un simulador

sobre el fenómeno (XV Conferencia de las partes sobre CC, Copenhague, Dinamarca, 2009) mediante el cual se mostraba el intervalo de temperaturas previstas y los cambios de precipitación en diferentes escenarios del mundo, según se trataba de lugares que producen emisiones altas o bajas de gases de efecto invernadero (GEI). De esta manera, eran ejemplificadas a través de imágenes las consecuencias de las transformaciones que se podrían producir en el planeta durante este siglo. En el 2007 también se habían realizado esfuerzos en el desarrollo de un simulador para subida del nivel del mar. Ambas herramientas trabajan sobre escenarios ya creados y para su empleo se cambian las entradas de los parámetros temperatura o nivel del mar, según solicitudes del usuario.

De esta forma, constituye objeto de esta investigación la enseñanza del riesgo relacionado con el cambio climático, siendo el problema científico, la insuficiencia de los códigos informáticos actualmente disponibles para propiciar el empleo de las TICs en la enseñanza de los temas del riesgo relacionados con el cambio climático. Este problema se encuentra vinculado con la carencia de integralidad de las herramientas disponibles para agrupar e interrelacionar las múltiples variables (de origen natural y/o antrópico) participantes en el fenómeno, así como la insuficiencia de conectividad que caracteriza a nuestras redes de comunicación para utilizar sistemas dependientes de la internet. Como hipótesis de esta investigación se propone que el empleo de un sistema matricial interdependiente que correlacione las variables relativas al riesgo del cambio climático (variabilidad natural y de origen antrópico, peligros, vulnerabilidad, adaptación, mitigación) con un enfoque cualitativo, permitirá el ensayo de múltiples situaciones relacionadas con los valores de dichas variables, lo que propiciará el aprendizaje de esta temática de manera interactiva y motivadora.

El objetivo fundamental de la investigación resumida en este documento, es disponer de un sistema interactivo para la enseñanza-aprendizaje del cambio climático, que refleje de manera realista, aunque no integral (ya que ello no es posible, considerando la complejidad de los conocimientos), las interacciones entre los elementos participantes en el cambio climático, ya sean naturales (precursores naturales globales y regionales, vulnerabilidades naturales de los sistemas) o humanos (cambio de origen antrópico, vulnerabilidades inducidas por el hombre), así como las medidas correspondientes de gestión para cada caso (mitigación de fuentes y emisiones de gases de efecto invernadero y adaptación para compensar vulnerabilidades).

MATERIALES Y MÉTODOS

El entorno de desarrollo de la herramienta parte de un enfoque sistémico, o sea, el mismo se basa en la interrelación de múltiples elementos (variables globales, precursores regionales, vulnerabilidades, acciones de adaptación y mitigación), cuyos estados tributan al comportamiento del sistema.

Dado el importante aparato conceptual que se utiliza en el desarrollo de la teoría de cambio climático, es necesario también definir estos aspectos:

- **Variables globales:** Son cambios globales relacionados con la variabilidad climática. Entre los cambios globales, el efecto más destacable es el incremento de la temperatura del planeta. Este se debe a varias contribuciones: la variabilidad natural del clima, el incremento del contenido de CO₂ u otros gases de efecto invernadero en la atmósfera con origen antrópico y natural, o los eventos extremos como caídas de meteoritos, erupciones volcánicas, etc.

- **Precusores o peligros regionales:** Eventos locales que representan situaciones de peligro para comunidades o regiones determinadas que se encuentran bajo su área de influencia. Ejemplo de estos son las sequías, las altas temperaturas, las temperaturas extremas, los ciclones y deshielos, entre otros. Las investigaciones realizadas sobre cambio climático demuestran que estos eventos están potenciados con el mismo.

- **Vulnerabilidad:** Es la debilidad de algún sistema natural o humano que lo hace más proclive al daño ante la ocurrencia de algunos peligros. Por ejemplo, las comunidades ubicadas en costas bajas serán más vulnerables ante el ascenso del nivel del mar o las mareas de tormenta debidas a eventos climatológicos extremos como los ciclones.

- **Acciones de adaptación:** Son las acciones realizadas por el hombre para disminuir las vulnerabilidades de los sistemas o aprovechar los beneficios que puedan derivarse de los impactos del cambio climático. Ejemplo de acciones de adaptación son la reubicación de comunidades y el uso de los mares polares, en los que se prevé la aparición de rutas navegables ante el crecimiento de la temperatura global.

- **Acciones de mitigación:** Son las acciones realizadas por el hombre para disminuir la emisión de gases de efecto invernadero o contribuir a su captura. Algunos ejemplos de acciones de mitigación son la migración hacia formas de generación de energía basadas en fuentes renovables (limitación de emisión), así como la repoblación boscosa de zonas deforestadas (captura de gases de efecto invernadero).

El aparato conceptual sobre cambio climático mostrado en este documento es solo ilustrativo y está enfocado a soportar los fundamentos del desarrollo del sistema informático propuesto. Las definiciones explícitas de los aspectos enumerados pueden ser apreciadas en los correspondientes documentos del IPCC u otras bibliografías derivadas [3].

Como materiales para esta investigación se han tomado dos grandes escenarios esenciales:

- **Escenario global:** Descrito por el IPCC [4], donde se exponen los riesgos claves relacionados con “las 5 razones para preocuparse”, que fundamentan el efecto sobre determinadas zonas del planeta u otros sistemas amenazados.

- **Escenario regional:** Descrito para el caso específico de Cuba contenido en la Segunda Comunicación Nacional

[5], resultado del efecto del escenario global para el caso de islas y con las particularidades climáticas relacionadas con nuestra localización geográfica.

La idea básica en que se fundamenta el diseño del simulador interactivo planteado es su enfoque sistémico a partir del cual, cualquier zona del mundo (llámese sistema X), puede ser representada esquemáticamente como se aprecia en la figura 1.

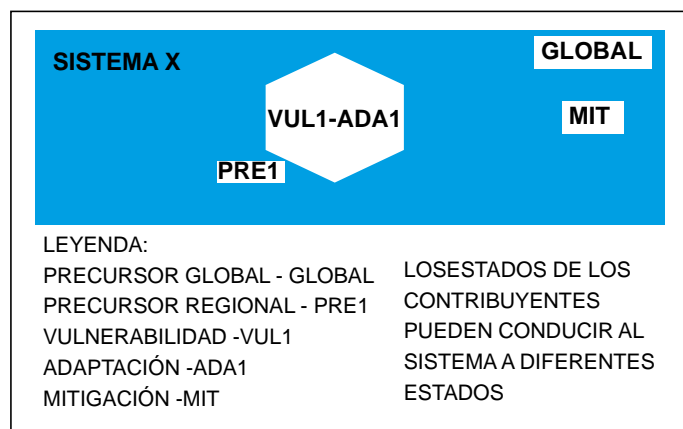


Fig. 1. Representación de sistema genérico

El estado indisponible de cada contribuyente puede llevar al sistema X a diferentes estados, según sea su aporte. Cuando las contribuciones se respaldan entre sí, por ejemplo, si los contribuyentes son redundantes, el estado del sistema puede llegar a riesgos medios o bajos de quedar redundancias disponibles. Un caso claro de redundancias ocurre cuando la adaptación respalda a la vulnerabilidad, o sea, de ser exitosa la adaptación, el fallo (manifestación) de la vulnerabilidad queda compensado.

Otra cuestión es que la vulnerabilidad se pone de manifiesto ante la ocurrencia del precursor (PRE1). En un caso sencillo, el precursor es el disparador y dado que la manifestación de la vulnerabilidad (VUL1) se evidencia ante la ocurrencia del mismo, entonces estos deben simultanearse para que ocurra un daño al sistema. Además, también deberá concurrir en la situación, el fallo de la adaptación (ADA1) correspondiente. Todo ello se representa de la siguiente forma:

$$\text{Daño} = PRE1 \cdot VUL1 \cdot ADA1 \quad (1)$$

Adicionalmente, en un caso como el estudiado, los precursores regionales (PRE) están acelerados por las variables globales (GLOBAL). Ello significa que el precursor será más peligroso cuando esté promovido por influencias globales. Finalmente, para algunos de los precursores globales, también existen medidas de mitigación (MIT), las que de tener éxito, frenan el desarrollo de los precursores globales. De esta forma, la expresión final del daño del sistema para un precursor vendrá dada por:

$$\text{Daño} = PRE1 \cdot GLOBAL \cdot MIT \cdot VUL1 \cdot ADA1 \quad (2)$$

Un ejemplo real de esta expresión aplica para el caso de una isla con costas bajas. Para este caso, el precursor PRE1 puede ser el nivel del mar, el precursor GLOBAL será el calentamiento global de origen antrópico, la posible mitigación MIT1 estará dada por el éxito de las acciones de disminución de producción de energía a base de combustibles fósiles, la vulnerabilidad VUL1 estará asociada al hecho de tratarse de una isla con costas bajas, mientras que la adaptación ADA1 estará relacionada con el traslado de las comunidades costeras tierra adentro, el despliegue de barreras, el rellenado de la costa, etc.

Si el daño estuviese representado por diferentes combinaciones de precursor (PREi), vulnerabilidad (VULi) y adaptación (ADAi), se está en presencia de un caso más real, que se acerca a los sistemas comprendidos en el escenario mundial. La representación de todas las combinaciones anteriores (PREi, VULi, ADAi) en su relación con los componentes globales (GLOBAL, MIT) constituye el fundamento de la matriz de dependencias. De esta forma, el daño del sistema X es:

$$\text{Daño} = GLOBAL \cdot MIT \cdot \left(\sum_{i=1}^n (PRE \cdot VULi \cdot ADAi) \right) \quad (3)$$

Una representación en forma de matriz de dependencias de la situación ilustrada para el sistema X puede apreciarse en las tablas ubicadas a la derecha en la figura 2.

La calificación del daño no es otra cosa que una evaluación del riesgo (R), o sea, el producto de peligro (P) por la vulnerabilidad (V) $\{R = P \times V\}$, en la cual, en su caso más complejo, el término P está asociado a los factores GLOBAL, MIT y PRE, mientras que la V está relacionada con los restantes factores VUL y ADA.

La valoración del riesgo se realiza utilizando las reglas contenidas en la tabla 1.

		VULNERABILIDAD						
		E	MA	A	M	B	MB	I
PELIGRO	PC	E	MA	MA	A	A	A	M
	MP	MA	MA	MA	A	M	M	M
	P	MA	MA	A	A	M	M	B
	PI	A	A	A	M	M	B	B
	I	A	M	M	M	B	B	MB
	MI	A	M	M	B	B	MB	MB
	SI	M	M	M	B	MB	MB	I

Leyenda:
 Peligro: PC- Prácticamente cierto, MP- Muy probable, P- probable, PI- Tan probable como improbable, I- Improbable, MI- Muy improbable, SI- Sumamente improbable.
 Vulnerabilidad y Riesgo: E- Evidente, MA- Muy alto, A- Alto, M- Medio, B- Bajo, MB- Muy bajo, I- Insignificante

Dado que la evaluación se repite a diferentes niveles del sistema (elementos, subsistemas y sistema), el resultado obtenido en cada uno, deberá arrastrarse hacia niveles jerárquicamente superiores y hasta aquel que caracteriza al fallo del sistema objeto de análisis. Para ello se utiliza un algoritmo recursivo descrito en [6].

Un ejemplo genérico de uso del algoritmo mencionado para la evaluación del riesgo en el sistema X, para varios casos de entrada de elementos afectados se muestra en la figura 2.

El carácter *, que acompaña a varios componentes, se utiliza para diferenciar los peligros globales y regionales del resto de los contribuyentes. En el caso 1, sombreada en

marrón, se muestra la afectación de la variable GLOBAL, dando como resultado, tras el arrastre de dependencias, que el sistema SISTEMA-X está en un nivel de riesgo MUY BAJO. En el segundo caso (caso 2), a la situación original se suma la ocurrencia del precursor regional *PRE1*. El arrastre de dependencias ocasiona que el SISTEMA-X quede en estado de riesgo MEDIO. Finalmente, en el caso 3, se suma al caso 2 el fallo o manifestación de la vulnerabilidad *VUL1*, por lo que el SISTEMA-X quedará en nivel de riesgo MUY ALTO. Como se observa, se utiliza el código de colores, correspondiente con la tabla 1, para representar los diferentes estados que alcanzan los niveles (filas) de las matrices ubicadas a la derecha de la figura.

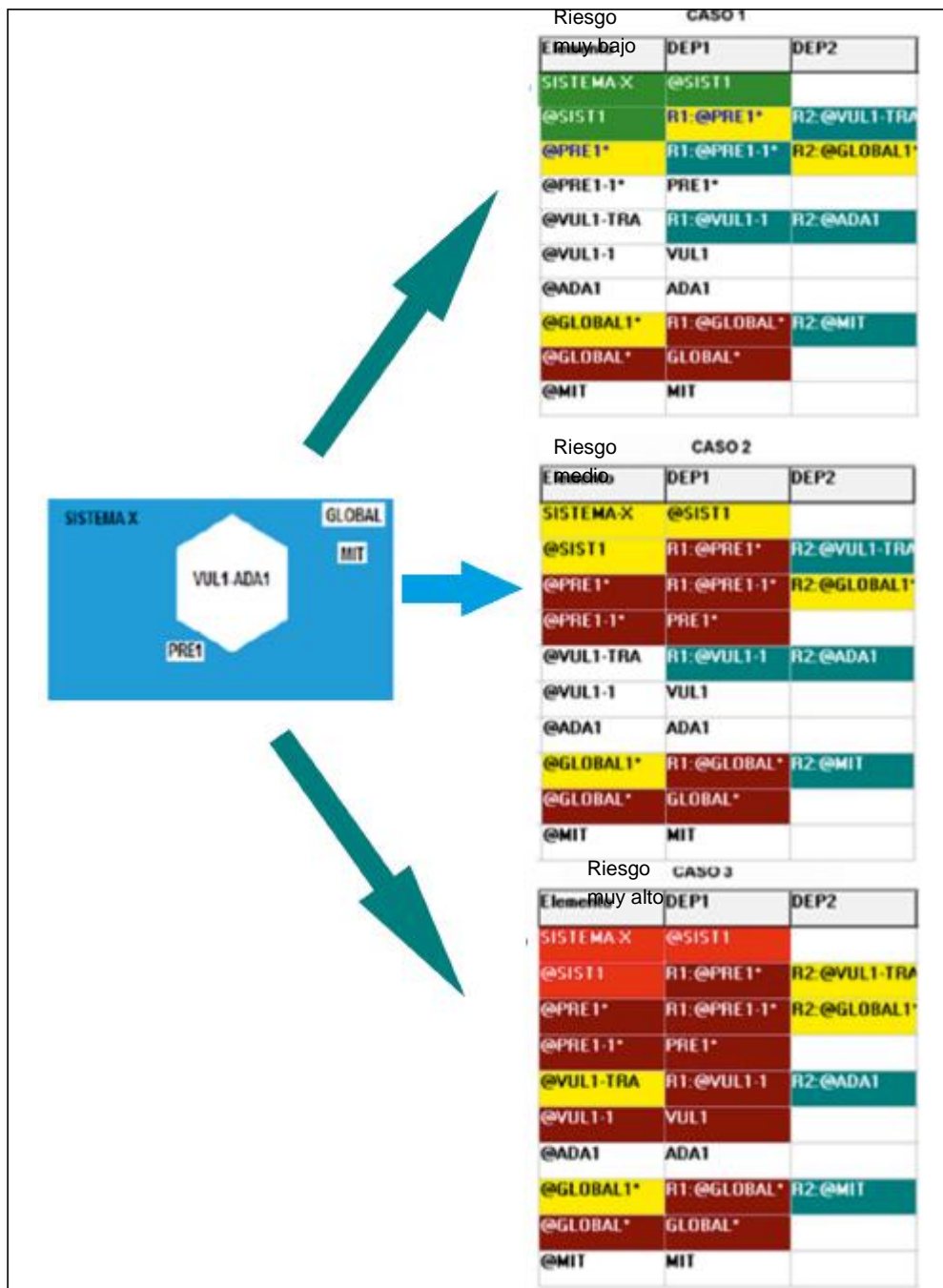


Fig. 2. Evaluación de riesgo del sistema X según diferentes valores de contribuyentes

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Teniendo en cuenta la relativa complejidad del diseño de los escenarios climáticos, el simulador propone dos casos básicos, los que constituyen a su vez punto de partida para la enseñanza y el desarrollo de otros ejemplos.

Como se expresó, los dos casos básicos modelados son un escenario global, que incluye los riesgos claves enunciados por el IPCC [4] y un escenario regional, que contiene los impactos para Cuba declarados por la Segunda Comunicación Nacional (SCN) [5].

La base de cualquier escenario para el Simulador puede obtenerse de la combinación de una matriz de dependencias (figura 3 o interrelaciones entre variables globales, precursores regionales básicos y combinaciones vulnerabilidad-adaptación) y una matriz de sistemas (límites-patrones del análisis).

Los elementos integrantes de la matriz se codifican utilizando códigos alfanuméricos familiares que permitan su fácil identificación. Los elementos redundantes se destacan en fondo azul. De manera similar, los criterios de fallos e identificaciones de sistemas utilizan combinaciones de caracteres que hagan fácil su identificación. La matriz de dependencias permite la modelación de infinitas combinaciones de precursores y vulnerabilidades-adaptaciones.

Cualquier combinación regional de precursores, vulnerabilidades y adaptación es un juego de datos redundante (por ejemplo, fila 20 de figura 3).

Para utilizar el Simulador, una vez definidas las matrices de dependencias y de criterios de sistemas, debe establecerse una combinación de elementos de partida. Dichos elementos adquieren su valor propio, es decir, se hacen evidentes en su ocurrencia cuando son establecidos por el usuario de la herramienta. La aparición del elemento en la lista de partida ha sido modelada como la evidencia de la peor situación para el mismo, o sea, para los precursores su ocurrencia y para las vulnerabilidades, acciones de adaptación y mitigación, su fallo. En el estado inicial de la matriz (o sea, para sus valores por defecto) los precursores no han ocurrido, las vulnerabilidades no se han manifestado y las acciones de adaptación y mitigación han tenido éxito.

Los precursores adquieren extrema severidad cuando se combinan con una variable global. Por si solos, o sea, por su valor propio o evidencia de ocurrencia, aparecen como improbables (lo mismo ocurre cuando no tienen valor propio y solo se ven afectados por una variable global). De manera similar, las combinaciones vulnerabilidad – adaptación adquieren su peor valor cuando se vincula la manifestación de la vulnerabilidad con el fallo de la adaptación. Las restantes combinaciones de las mismas son consideradas degradaciones.

La matriz de dependencias es una base de conocimientos que permite representar los peligros más importantes asociados a cada región, así como sus posibles vulnerabilidades y adaptaciones.

Para todas las vulnerabilidades, representadas en la leyenda, y aplicadas a las regiones están previstas acciones de adaptación. Las parejas de cuadros representadas en los mapas corresponden, respectivamente, a la vulnerabilidad (lado izquierdo) y adaptación (lado derecho).

Las variables globales (variabilidad natural, variabilidad de origen antrópico, eventos extremos) y de precursores regionales básicos (ver como ejemplo, la base de la figura 4) que aparecen modeladas en la leyenda son los valores de partida asignados por el usuario o atribuidos por defecto. Las opciones de mitigación también aparecen con sus valores básicos.

En los ejemplos modelados el único precursor global que tiene acciones de compensación es ANTRÓPICO, el que representa el origen antropogénico del calentamiento global. Para el mismo se ha definido la posibilidad de MITIGACIÓN como posibilidad de atenuación.

Los precursores regionales aplicados (ver zonas en el mapa) son la combinación de variables globales y precursores regionales básicos, o sea, dado que se trata de precursores con origen climático, estos se afectan por sus características propias (dependientes, por ejemplo, de la zona donde ocurren) y por los aportes de las variables globales. De esta forma, un precursor regional, con valor propio, por ejemplo: CICLÓN, puede ser, a nivel regional, EVIDENTE si coincide con alguna variable global (VARIABILIDAD NATURAL o de ORIGEN ANTRÓPICO), o PROBABLE si no coincide con ella. Las variables globales por si solas pueden potenciar a IMPROBABLE a todos los precursores regionales aplicados, aún cuando estos no tengan valores propios. Las vulnerabilidades y acciones de adaptación son regionales.

Ilustración de casos de estudio

Para ilustrar las capacidades del simulador, se ha tomado un caso de estudio para el escenario mundial. Obsérvese la conjugación de un precursor (HURACÁN), una variable de calentamiento global de origen antropogénico para el presente (GRADO-PRES) (mezclado con fallo de su mitigación ENERGÍA) y una situación combinada de vulnerabilidad-adaptación incumplida (vulnerabilidad por inundación FLOOD-STRESS con inadecuada adaptación FLOOD-MANAGE). Los elementos que participan en la combinación de partida aparecen destacados (sombreados en negro) en las correspondientes celdas de la matriz (figura 3).

La combinación del precursor climático HURACÁN (fila 90) con su variable global ANTRÓPICO-MITIGA (fila 95), completa el estado MUY PROBABLE para el acople ciclón (fila 79). Este tributa directamente a COMBI6 (fila 24) que incluye varios escenarios vinculados a similares impactos de inundación. En la fila 116 aparece desarrollada la vulnerabilidad ante inundaciones (FLOOD-STRESS), mientras que en la fila 117 aparecen las medidas de adaptación (FLOOD-MANAGE). El resultado EVIDENTE de su combinación se representa en la fila 115 (FLOOD-URBAN).

No	Sistema	Red	IDE	Ciudad	Elemento	DEP1	DEP2	DEP3	DEP4	DEP5	DEP6	DEP7	DEP8
1	CLI		CLIMA	@MUNDO		@AFRICA	@EUROPA	@ASIA	@AUSTRALASIA	@NORTEAMERICA	@CENTROSUR	@POLARES	@EXTREMOS
2	AFR		AFR	@AFRICA		@AFRICA1	@AFRICA2	@AFRICA3	@AFRICA4				
19	ASA		ASA	@ASIA		@ASIA1	@ASIA2	@ASIA3	@ASIA4				
20	ASA			@ASIA1		R1 @COMBI6*	R2 @FLOOD-UR						
21	ASA			@ASIA2		R1 @COMBI7*	R2 @HEAT MO						
22	ASA			@ASIA3		R1 @COMBI8*	R2 @FOOD						
23	ASA			@ASIA4		R1 @COMBI8*	R2 @WATER						
24	ASA			@COMBI6*		@PEXTREM*	@CICLON*	@MAR*					
79	CLI			@CICLON*		R1 @HURACAN	R2 @COMBI GL						
80	CLI			@MAR*		R1 @NIVEL MAR	R2 @COMBI GL						
90	CLI			@HURACAN*		HURACAN*							
95	CLI			@ANTROP MIT		R1 @ANTROP	R2 @MITIGA						
96	CLI			@MITIGA		@ENERGIA	@NO-ENERGIA						
97	CLI			@ENERGIA		ENERGIA							
98	CLI			@NO-ENERGIA		@NO-ENERGIA							
99	CLI			@ANTROPICO*		R1 @GRADO	R2 @GRADO 2-93	@GRADO 4					
100	CLI			@GRADO PRE		@GRADO PRE 5							
115	CLI			@FLOOD-URBAN		@FLOOD-MR	R2 @FLOOD-ST						
116	CLI			@FLOOD-STRE		@FLOOD-STRE 5							
117	CLI			@FLOOD-MANAG		@FLOOD-MANAG							

RIESGOS Y VULNERABILIDADES

NO AFECTADO EVIDENTE MUY ALTO

ALTO MEDIO BAJO MUY BAJO

DEPENDENCIAS

LOCALIZADO REDUNDANTE

PELIGROS

PRACCT CIERTO MUY PROB PROBABLE

PROB IMPROB IMPROB MUY IMPROB SUM IMPROB

HURACAN*, FLOOD-STRESS, FLOOD-MANAG, GRADO-PRES, EN

Combinación Equipos Indisponibles

Fig. 3. Representación de la afectación en la matriz de dependencia

En la fila 20 (ASIA1) se combinan el precursor MUY PROBABLE de la fila 24 (COMBI6) con la vulnerabilidad-adaptación de la fila 114 (FLOOD-URBAN), resultando el riesgo MUY ALTO para dicho escenario en una zona de Asia. La fila 20 se conecta con la 19 (ASIA) que engloba todos los escenarios modelados para Asia. Esta, a su vez, se conecta con la fila 1 que representa al mundo (MUNDO), con todas sus zonas caracterizadas. Los sistemas (en este caso ilustrados solo a través del caso de ASIA) aportan un clima mundial con riesgo MUY ALTO.

La corrida se puede apreciar gráficamente en el mapa mostrado en la figura 4, donde se resalta la situación de riesgo MUY ALTO para Asia (lo que califica la situación para el clima global). Las parejas de cuadros marrones representan las zonas del globo afectadas por las combinaciones de vulnerabilidad adaptación para el fenómeno inundación en zonas urbanas. Los cuadros amarillos en el mapa representan, además de los estados de las zonas o sistemas del globo evaluadas, la probabilidad asociada a los precursores climáticos, que son calificados así por el efecto de las variables globales. Respecto a estas últimas, el origen antrópico del calentamiento, y ello unido a una mitigación con problemas (por la gestión inadecuada de la energía

-cuadro marrón, ver pequeño cajetín inferior derecho) culminan con una calificación PROBABLE-IMPROBABLE (ver cajetín pequeño inferior izquierdo con cuadro amarillo tras las palabras origen antrópico + mitigación). El único precursor climático manifiesto en este caso es el de huracanes, representado por el cuadro marrón del cuadro inferior izquierdo.

A modo ilustrativo, se ha modelado un escenario regional, en este caso el de Cuba (figura 5). A diferencia del escenario global, las combinaciones vulnerabilidad-adaptación, para los diferentes efectos, se encuentran dispuestas en la base del mapa (cajetín inferior derecho). También las opciones de mitigación han sido más desarrolladas que en el caso global, basado en la disponibilidad de la información de partida (cajetín inferior central). De manera similar, las variables regionales o precursores climáticos, tienen similar disposición que para el mapa global (cajetín inferior izquierdo).

A su vez, los factores utilizados para valorar el escenario han quedado dispuestos en el lado superior derecho del mapa. Ello es equivalente a las zonas evaluadas en el mapa global (regiones o sistemas mundiales). Estos factores son los que se miden para diagnosticar el estado final de riesgo climático asociado al escenario evaluado, tomándose para la calificación del escenario regional, la peor de las calificaciones obtenidas por los factores.

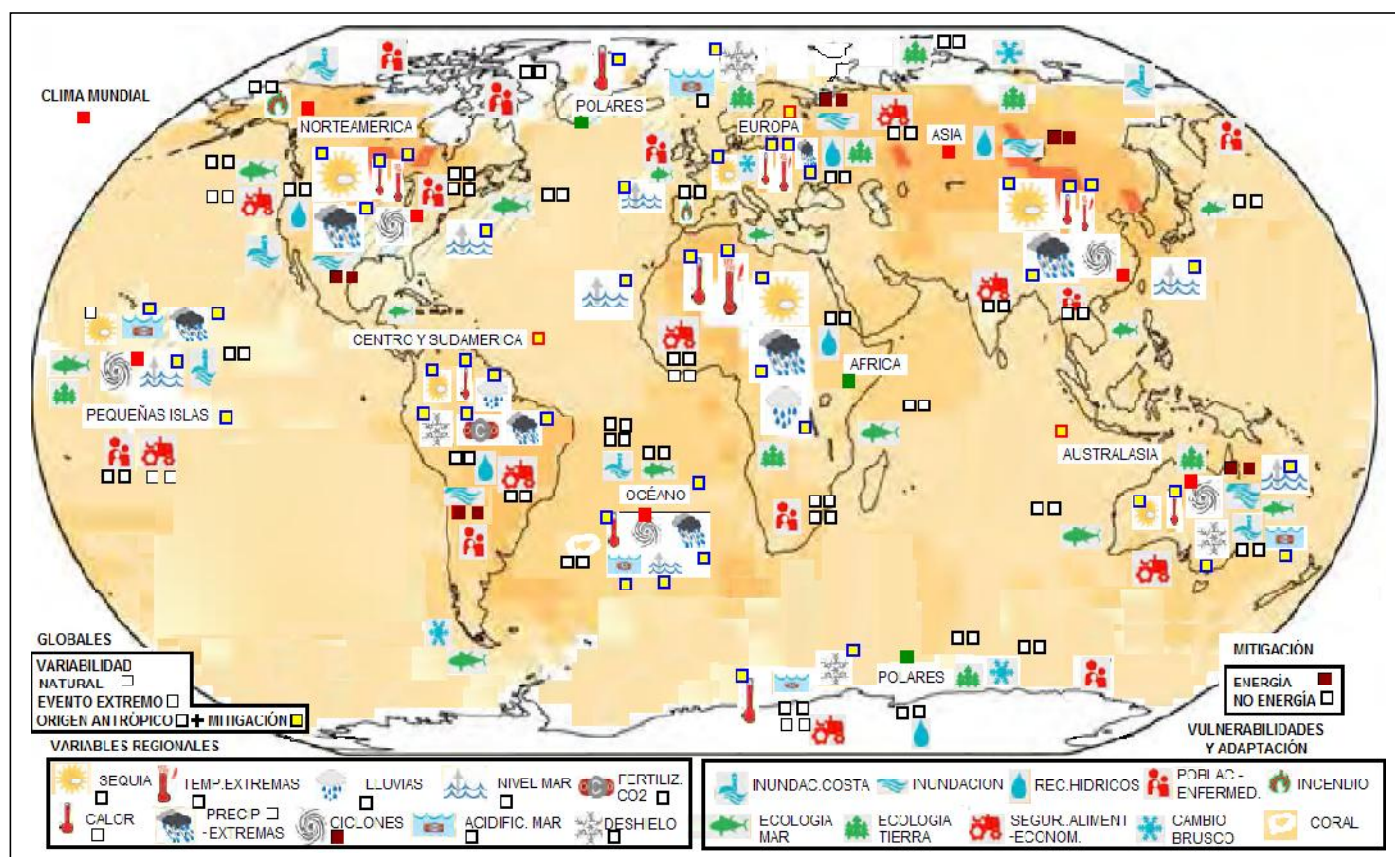


Fig. 4. Representación del caso estudiado en el escenario climático mundial

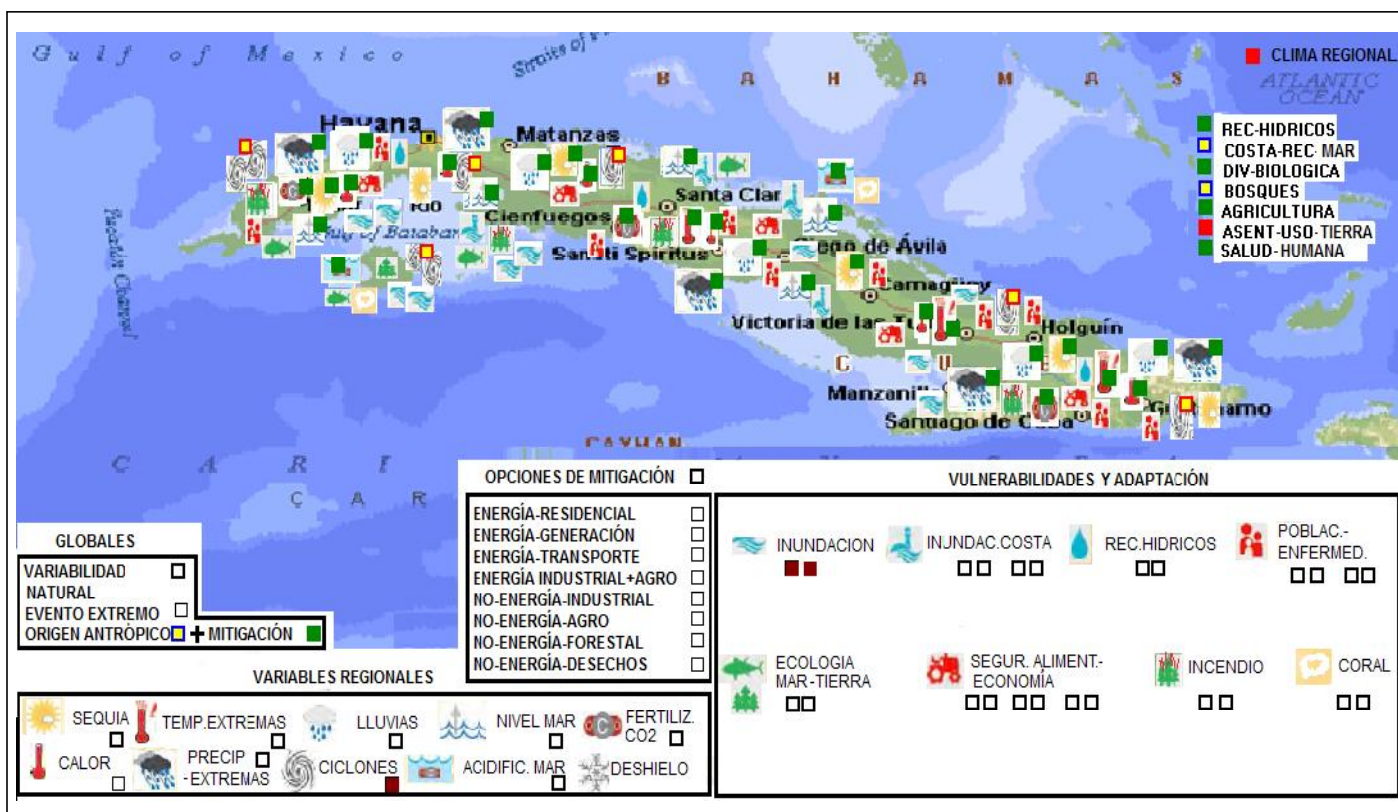


Fig. 5. Representación del caso estudiado en el escenario regional de Cuba

De esta forma, tomando una combinación de componentes similar a la estudiada en el caso global (HURACÁN, GRADO-PRES, FLOOD-STRESS y FLOOD-MANAGE) se obtiene la situación representada en la figura 5, o sea, una pareja de vulnerabilidad-adaptación acoplada en el fallo (ver pareja de cuadros marrones en el cajetín inferior derecho), una gran cantidad de cuadros verdes en el mapa que representan los precursores climáticos que afectan las diferentes zonas de Cuba, los cuales como se explicó anteriormente, se colorean como IMPROBABLES por su acople con variables globales (calentamiento antrópico – ver cuadro amarillo en pequeño cuadro inferior izquierdo, y combinación origen antrópico + mitigación MUY IMPROBABLE, por causa similar). El único precursor climático manifiesto en este caso es el de huracanes, representado por el cuadro marrón del cuadro inferior izquierdo.

Finalmente, el factor asentamientos humanos y uso de la tierra, calificado como MUY ALTO, determina el nivel MUY ALTO de riesgo con que se califica el escenario regional de Cuba, para esta situación de estudio.

Las representaciones diversas de las diferentes características evaluadas en cada mapa muestran la versatilidad del sistema, para adaptarse a los requerimientos de la información disponible, modelándose entonces escenarios que abarcan la cantidad de variables monitoreadas que el usuario demande.

Discusión de las capacidades del simulador

La representación del cambio climático no es un problema simple como pudiera ser el ilustrado en una práctica de laboratorio [1], el que se puede simular a nivel de un sistema informático que simplemente repite situaciones singulares. Tampoco esta representación se puede enmarcar en algo más complejo como un simulador similar a los empleados para centrales nucleares [2], vuelos aéreos u otros objetivos [7], que comprenden escenarios típicos (por ejemplo: arranques, paradas y maniobras en centrales nucleares, despegues, aterrizajes y otras maniobras en caso de vuelos, maniobras de grúas, etc.) sobre los que se desarrollan las prácticas.

La complejidad de los procesos globales del planeta es tal que se necesitan modelos de muy alta eficacia y capacidades de cálculo (ver programa PRECIS en [5]), muy lejanas a las generalmente disponibles en las aulas. Por otra parte, los procesos que ocurren en el planeta son difíciles de escalar a nivel de laboratorio, a no ser que se particularice la experiencia a fenómenos específicos singulares más simples, lo que no permite un análisis integral del problema.

De esta forma, resulta casi imposible lograr un simulador que ilustre de manera integral los procesos asociados al cambio climático. Sin embargo, asumiendo como válidos los procesos físicos asociados, puede simplificarse el fenómeno a un modelo binario de éxito o fallo de sus componentes básicos y, utilizando un método de procesamiento posterior de estas señales (algoritmos recursivos), representar las interacciones entre los elementos.

En este camino se ha desarrollado la herramienta propuesta, por lo que las situaciones representadas llegan a incluir desde los orígenes de los procesos a sus medidas de gestión, lo que da un enfoque práctico muy útil a la formación de los futuros tomadores de decisión.

En una primera etapa se recomienda el empleo de los escenarios previstos por defecto en el sistema, su uso en la enseñanza teórica y práctica, así como su aplicación con fines evaluativos. Sin embargo, dada la flexibilidad del sistema para la preparación de nuevos escenarios, se permite al profesor diseñar su propia tarea y, tras un proceso de entrenamiento adecuado, se posibilita una labor similar al propio estudiante. De esta forma, las capacidades de representación de escenarios son infinitas, y por tanto la diversidad de problemas a analizar también lo es.

Dadas las posibilidades de enseñanza con el simulador, tal como plantea Maggio en [1], los profesores, incluyen de manera genuina el sistema en sus clases, y adaptan la docencia a sus limitaciones, lejos de tomar estas como punto de partida para su exclusión.

Otra ventaja de la herramienta es la disponibilidad del *know how* de su programación, lo que garantiza su futuro perfeccionamiento y enriquecimiento. También constituye una bondad del sistema su independencia de internet, lo que lo hace muy recomendable para el caso de países, donde los problemas de conectividad y estabilidad de las redes sean comunes.

CONCLUSIONES

El artículo propone un simulador para la enseñanza interactiva de los riesgos del cambio climático que facilita el enfoque participativo y basado en problemas de la enseñanza-aprendizaje sobre dicha temática.

El enfoque sistémico del sistema facilita el aprendizaje del aparato teórico necesario y garantiza la incorporación entrelazada de todos los elementos que son actores del fenómeno de cambio climático. Las posibilidades del sistema garantizan la evaluación por áreas globales y regionales y la visualización gráfica a través de mapas de los estados de los componentes incluidos en el análisis. También facilita la creación de nuevos escenarios de trabajo para la enseñanza de situaciones particulares de interés.

REFERENCIAS

1. **MAGGIO, Mariana.** "El uso de simuladores en las prácticas de la enseñanza en la universidad" [en línea]. Universidad de Buenos Aires, 2005. Disponible en Web: <http://asesoriapedagogica.ffyb.uba.ar/?q=el-uso-de-simuladores-en-las-pr-cticas-de-la-enseanza-en-la-universidad> [consultado junio 2015].
2. **DIES, Javier.** "Operación de reactores nucleares, prácticas con simulador conceptual de central nuclear" [en línea]. Nuclear Engineering Research Group, 2010. Disponible en Web: http://www.enen-assoc.org/data/classes/db/Course/162_document1.pdf [consultado junio 2015].

3. **GAREA, Bárbara; TORRES, Antonio et al.** *Cambio climático y desarrollo sostenible. Bases conceptuales para la educación en Cuba*, Oficina Regional de la UNESCO en Cuba, 2014, 136 pp. ISBN 978-959-18-1047-2.
4. IPCC WGII AR5. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: IMPACTS, ADAPTATION AND VULNERABILITY [en línea]. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment, 2014. Disponible en Web: <http://epic.awi.de/37530/> [consultado junio 2015].
5. **PLANOS, Eduardo; VEGA, Roger; GUEVARA, Vladimir.** *Impacto del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba*. Instituto de Meteorología, Agencia de Medio Ambiente, Ministerio de Ciencia, Medio Ambiente y Tecnología. La Habana, Cuba, 2013, 430 pp. ISBN 978-959-300-039-0.
6. **TORRES, Antonio; PERDOMO, Manuel; RIVERO, Jesús.** "Matriz informatizada de principios básicos de seguridad: una alternativa útil para su aprendizaje y aplicación", *Ingeniería Mecánica*. septiembre-diciembre, 2011, vol. 14, núm. 3, pp. 221-229. Disponible en Web: (http://revistascientificas.cujae.edu.cu/Revistas/Mecanica/Vol-14/3-2011/06_2011_03_221_229.pdf) [consultado junio 2015]. ISSN 1815-5944.
7. **MAYER, Richard E.** *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. Cambridge University Press, London, UK, 2005, 663 p. ISBN 978-0-521-83873-3.

AUTORES

Antonio Torres Valle

Ingeniero en Energética Nuclear, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Facultad de Ciencias y Tecnologías Nucleares, La Habana, Cuba

Erich Martínez Martín

Ingeniero en Tecnologías Nucleares y Energéticas, Profesor, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Facultad de Ciencias y Tecnologías Nucleares, La Habana, Cuba

Interactive Simulator for Teaching of Climate Change Risk

Abstract

The use of simulators is good practice for teaching or training in the operation of complex processes. This is the case of climate change, the one associated with multiple phenomena that cannot be played as isolated laboratory practices. The experts themselves of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) have suggested qualitative indicators to measure the components of this risk (hazard, vulnerability and exposure) and still, its complexity is remarkable for the multi, inter and transdisciplinary knowledge necessary for evaluation. One of the most important challenges of teaching these topics is the multiplicity of combinations that can occur for a variety of inputs of tax risk factors in each area of the world studied. Therefore, the presentation of an interdependent matrix system that maps the global and regional variables concerning the risks of climate change and a recursive system for evaluation are the basis of the simulator proposed in this paper. The same has been tested with global and regional scenarios, which have been incorporated into computer code developed for the preparation of prewritten didactic exercises and a recommendation for the implementation of new case studies.

Key words: climate change, mitigation, risk, variability, vulnerability