

Implicaciones de las condiciones meteorológicas y el cambio climático en el transporte por superficie en los Estados Unidos

por Marjorie McGuirk¹, Scott Shuford², Thomas C. Peterson¹ y Paul Pisano³

Introducción

Las condiciones meteorológicas afectan al funcionamiento de los sistemas de transporte de los que todos dependemos: desde automóviles ralentizados como consecuencia de una superficie mojada, hasta los camiones de reparto demorados como consecuencia de fuertes vientos, o trenes de pasajeros afectados por hielo y nieve. Las decisiones operativas diarias en el sector del transporte, como por ejemplo la cantidad de carga que un avión, o una barcaza, pueden manejar de forma segura, deben tomar en consideración las condiciones meteorológicas.

Por otro lado, el clima afecta a las infraestructuras de transporte: vías férreas, puertos, muelles, conductos subterráneos en carreteras, puentes y otras infraestructuras de transporte han sido optimizadas con arreglo a las condiciones climáticas esperadas, que podemos bautizar como "clima". Cuando las condiciones meteorológicas se vuelven extremas (bastante alejadas de los límites de lo que se considera un clima "normal"), la infraestructura de transporte pasa a ser menos fiable y menos segura. La subida del nivel del mar y unas inundaciones más in-



Figura 1 — Aeropuerto en el centro de Kansas City, autopista interestatal 70 y puerto de Kansas City: una amplia miscelánea de opciones de transporte

tensas afectan a la seguridad y funcionalidad de los puentes y caballetes, unas temperaturas más elevadas de lo normal provocan que se comben los rieles de las vías férreas o que se deformen las calzadas, y unos ciclones tropicales más fuertes de lo normal inundan y dañan las infraestructuras de transporte, lo que provoca demoras en el suministro de bienes y servicios.

Los impactos adversos sobre el tiempo de recorrido y la fiabilidad y eficacia del suministro afectan, a su vez, al coste de todos los bienes transportados mediante estos sistemas. Otro coste en términos económicos viene provocado por la actualización de las

infraestructuras para adaptarlas a las nuevas condiciones climáticas, incluyendo instalaciones de transporte más resistentes o reubicadas en zonas afectadas por ciclones tropicales, puentes y caballetes con una mayor separación vertical para poder hacer frente a inundaciones y subidas del nivel del mar, y diseños tanto de calzadas como de raíles que sean resistentes al calor.

Los cambios de las condiciones meteorológicas requieren ajustes en el funcionamiento diario de los sistemas de transporte, mientras que el cambio climático hace necesario que haya que efectuar ajustes en las infraestructuras de transporte. La sociedad está acos-

1 Administración nacional del océano y de la atmósfera, Centro nacional de datos climáticos, Asheville, Carolina del Norte (Estados Unidos). Correo electrónico: Marjorie.McGuirk@noaa.gov

2 Universidad de Carolina del Norte, Asheville, Carolina del Norte (Estados Unidos)

3 Administración federal de carreteras, Washington D.C. Correo electrónico: Paul.Pisano@dot.gov

tumbrada a las demoras en los desplazamientos en las líneas aéreas como consecuencia de la nieve, la lluvia o la niebla, pero está menos preparada para la importante inversión que es necesaria para adaptar la infraestructura de transporte al cambio climático. Este artículo aborda el alcance previsto de los impactos provocados por el cambio climático sobre las infraestructuras de transporte, con un enfoque especial sobre los Estados Unidos.

Metodología

El contenido de este artículo se basa en algunos estudios previos, entre los que se incluyen los titulados “*Potential Impacts of Climate Change on US Transportation*” y “*Climate Variability and Change with Implications for*

Transportation”, ambos solicitados por el Consejo nacional de investigación y publicados en 2008 (NCR, 2008; Peterson, 2008). En parte estos informes estaban constituidos por rigurosas evaluaciones de las mayores zonas metropolitanas de Estados Unidos con sistemas de transporte altamente desarrollados. Este artículo pretende añadir análisis más recientes, así como prever qué implicaciones podría tener un impacto de mayor alcance en el transporte como consecuencia del cambio climático sobre la población.

Este mismo artículo incluye información que ofrece un conocimiento básico sobre las condiciones meteorológicas que afectan a las operaciones del día a día en el transporte en superficie por carretera, por tren y por barco. La metodología se centró en identificar

los parámetros meteorológicos más importantes para el transporte y utilizar los valores del modelo para comprender cómo pueden cambiar esos parámetros en el futuro.

La identificación de los impactos derivados del cambio climático sobre el transporte implicó la utilización de varias evaluaciones del *Climate Change Science Plan*. Con el fin de limitar el número de parámetros meteorológicos, procedimos a analizar aquellos que podrían tener alguna relevancia para la variabilidad del clima y el cambio climático. Por ejemplo, aunque un tornado pudiera tener un gran impacto sobre el transporte, existe muy poca confianza asociada a la relación entre la frecuencia o intensidad de estos tornados y el cambio climático, motivo por el cual los impactos provoca-

Parámetros meteorológicos, clasificación de los avisos meteorológicos basados en ellos e impactos sobre el transporte

Parámetros meteorológicos	Categoría	Impactos
Elementos relacionados con la precipitación	Precipitación congelante, acumulación de nieve, precipitación líquida, vapor de agua con posibilidad de precipitación, humedad del suelo, inundaciones, profundidad de las masas de agua, condiciones meteorológicas propicias para la activación de incendios	Pérdida de tracción y control, retrasos, velocidad reducida, tensión sobre los componentes y neumáticos de los vehículos, normas relativas a la utilización de cadenas en los neumáticos, superficie mojada en la calzada, espuma en la calzada, desbordamientos que provocan cierres de carreteras, redefinición de ruta, frenado débil e irregular, impactos intermodales, pérdida de firmeza de la superficie de asiento de las vías férreas, socavación del lecho de la vía, sequías que provocan riesgo por aparición de polvo y humo que reduzcan la visibilidad, cierres de autopistas, impactos intermodales derivados de la no prestación de servicio de las barcas
Relacionados con las tormentas	Trayectoria de núcleos tormentosos de alta intensidad, rayos, granizo, vientos derechos (rachas de viento relacionadas con la convección)	Condiciones extremas y rápidamente cambiantes con múltiples riesgos de colisión y daño provocados por la pérdida de control, visibilidad reducida, desplazamientos de rocas que provocan riesgo de colisión y demoras, daños en infraestructuras, bloqueo de vías férreas
Relacionados con la temperatura	Temperatura del aire y de la superficie, incluyendo máxima y mínima, primera aparición en la estación meteorológica, índice de calor, grados día de calefacción o grados día de refrigeración	Tensión sobre los componentes del vehículo, sobre las infraestructuras y, a altas temperaturas, sobre artículos perecederos, combado de raíles (deformación por el sol), reducción de la velocidad sobre los raíles
Vientos	Velocidad del viento	Inestabilidad de los vehículos, pérdida de control, derribos
Visibilidad	Limitaciones provocadas por niebla, calima, polvo, esmog, y limitaciones del brillo del sol en la atmósfera superior como consecuencia del polvo volcánico y desértico	Reducción de velocidad, riesgo de colisión y daño provocados por los rápidos cambios
Estado del mar	Ciclones tropicales, incluyendo trayectorias y elementos que afectan a las rutas de evacuación, hielo marino en aguas abiertas, fuerte oleaje, marea de tempestad, mareas inusualmente altas o bajas, espuma congelante, vientos huracanados, estado del mar, desbordamientos, altura de olas debido a mar de viento, altura de olas debido a mar de fondo	Interrupciones en la cadena de suministro, cierre de carreteras, gran daño a las infraestructuras y a los vehículos, raíles obstruidos, aumento del nivel del mar que deriva en desbordamientos, riesgo y daño para las infraestructuras, cambios en la producción y envíos de naturaleza agrícola y de productos elaborados

dos por tornados no se han incluido. Hemos incluido variables que tienen impactos positivos y negativos para el transporte.

Aunque este artículo se centra en los impactos sobre el transporte en los Estados Unidos, las técnicas pueden aplicarse en otros lugares.

Impactos de las condiciones meteorológicas sobre el transporte en superficie

Los avisos facilitados a los viajeros, que son emitidos por el Servicio Meteorológico Nacional cuando pueden darse condiciones que podrían afectar al transporte, varían necesariamente en función del área geográfica. Es posible que una capa fina de nieve active la emisión de avisos a los viajeros en las zonas meridionales de los Estados Unidos, mientras que en la zona septentrional serían necesarios varios centímetros para efectuar dichos avisos, ya que en estas regiones los conductores están acostumbrados a condiciones de nieve.

Debido a que aproximadamente una cuarta parte de las demoras y accidentes de transporte en los Estados Unidos se debe a la presencia de unas condiciones meteorológicas adversas, regularmente se somete a procesos de evaluación la necesidad de contar con una información meteorológica a nivel de superficie que sea específica para cada región. En el Informe de evaluación sobre necesidades nacionales relativas al suministro de información meteorológica para el transporte en superficie, al que nos referiremos de ahora en adelante como informe WIST (*Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research, OFCM, 2002*), se identificaron los parámetros meteorológicos que pueden afectar al transporte.

En la tabla que aparece en la página anterior figuran los parámetros meteorológicos, agrupados por categoría de avisos meteorológicos, junto con sus impactos (Rossetti, 2002 y 2008).

El informe WIST estableció las necesidades y requisitos nacionales, con respecto a la información meteorológica asociada a la toma de decisiones, de

Investigación meteorológica y transporte en superficie

Las herramientas que sirven como apoyo a las decisiones relativas a la gestión de las carreteras dependen en gran medida de la precisión en las predicciones y observaciones de una amplia variedad de fenómenos meteorológicos, entre los que se incluyen la niebla, las precipitaciones intensas, la nieve, el aguanieve, la lluvia congelante, los incendios forestales y el humo, las tormentas de arena, las ventiscas de nieve o la nieve acumulada por el viento. Las últimas décadas han sido testigo de excepción de un incremento drástico de nuestra capacidad de observar y pronosticar estos fenómenos con arreglo a una serie de escalas de tiempo. Por ejemplo, las condiciones que pueden desembocar en la acumulación de hielo y nieve pueden detectarse ahora a través de sensores situados en calzadas, mientras que el inicio, intensidad y duración de algunas de las principales tormentas de nieve pueden pronosticarse con varios días de antelación (Pisano, 2004).

Aún siguen existiendo importantes problemas de seguridad, incluso utilizando con precisión los mejores modelos de predicción del mundo. El Programa mundial de investigación meteorológica de la OMM está centrado en acelerar las mejoras en la predicción de fenómenos meteorológicos de gran impacto con arreglo a escalas temporales que van desde unas pocas horas hasta las dos semanas. Son varios los proyectos que tienen aplicación directa sobre el transporte en superficie, como por ejemplo los esfuerzos del programa THORPEX (Experimento de investigación y predictibilidad del sistema de observación) para extender la predicción de fenómenos de precipitaciones fuertes a dos semanas, el Sistema de alerta, aviso y asesoramiento con respecto a las tormentas de arena y polvo, y la predicción inmediata de precipitaciones fuertes (véase: http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/thorpex_new.html).



cara a operaciones de transporte en superficie en seis sectores diferentes, a saber: carretera, ferrocarril de largo recorrido, transporte marítimo, tránsito rural y urbano, sistemas de tuberías y operaciones aeroportuarias en tierra. En este artículo analizaremos el transporte por ferrocarril, carretera y el transporte marítimo, así como los im-

pactos de los dos factores meteorológicos dominantes: las temperaturas y las precipitaciones extremas.

Temperaturas extremas

Los ferrocarriles tienen que hacer frente a impactos concretos como consecuencia de las altas temperaturas. Cuando



Figura 2 — Transporte de una barcaza en el río Misisipi e infraestructura de la orilla del río expuesta a importantes cambios a largo plazo en el nivel del río

se inició el servicio por vía férrea en el oeste americano hace 150 años, la tecnología de los trenes impulsados por vapor requería un reabastecimiento regular de agua en intervalos de unos 160 kilómetros aproximadamente. Los fuertes, que más tarde se convertirían en pueblos, se desarrollaron en torno a estas estaciones de reabastecimiento. Hoy en día, esos pueblos, ahora convertidos en ciudades, se extienden a través de todo el país en líneas que van de este a oeste.

Hoy en día, los recorridos están diseñados para resistir las tensiones internas derivadas de un gran cambio térmico. Sin embargo, si se produjese un calentamiento que superase los criterios de diseño, podrían producirse defectos de alineación de origen térmico o deformaciones del trazado, susceptibles de desembocar en un descarrilamiento. La temperatura neutra, que suele establecerse cuando el riel se coloca sobre la superficie, es el punto en el que dicho riel ni se dilata ni se contrae. Esta temperatura neutra se diseña, por lo general, de forma que sea de unos 22 °C menos que la temperatura máxima que se espera que alcance el riel.

Algunas investigaciones citadas por el informe WIST muestran que los contratiempos en el trazado pueden aparecer con temperaturas ambiente superiores a 43 °C, dependiendo del nivel de diferencia con respecto a la temperatura neutra de la instalación. Los problemas

de alineación del trazado fueron una causa importante de accidentes como consecuencia de los factores relacionados con las condiciones meteorológicas, con alrededor de siete grandes deformaciones provocadas por el sol cada año (Rossetti, 2002).

Las medidas operativas destinadas a adaptarse a los extremos térmicos relacionados con los fenómenos meteorológicos incluyen velocidades más bajas y trenes más cortos, para reducir en consecuencia la distancia de frenado, y cargas más ligeras para disminuir la tensión sobre el trazado. Estas adaptaciones afectan a la eficacia de las operaciones ferroviarias, conllevando un aumento del coste de transporte por unidad.

La persistencia de altas temperaturas puede afectar también a autopistas y puentes. Los materiales utilizados en la construcción de las calzadas tienen un rango limitado de tolerancia al calor antes de que se produzcan fisuras térmicas. Aunque la temperatura de la superficie de la calzada puede superar considerablemente la temperatura ambiente, una temperatura de 32 °C por encima de la temperatura del aire constituye un importante umbral para estas infraestructuras. Una ola de calor de larga duración que afectó a la bahía de San Francisco en julio de 2000 provocó el cierre de la interestatal 80, ya que tres carriles se deformaron como consecuencia de la dilatación térmica.

Un calor prolongado por encima de los criterios de diseño también puede provocar un deterioro prematuro, reduciendo así la vida útil de las calzadas. En la región de Alaska, las altas temperaturas han derretido la capa subterránea de hielo, debilitando o destruyendo los lechos de las vías que habían sido construidos sobre una superficie que antes estaba congelada. Los puentes pueden estar particularmente sujetos a tensiones adicionales provocadas por largos períodos de temperaturas elevadas. Además, según el informe WIST, las altas temperaturas en la superficie de la calzada elevan el riesgo de que se produzcan reventones de neumáticos, especialmente en vehículos con carga pesada.

Estos efectos sobre el transporte relacionados con el calor requerirán adaptaciones operativas a corto plazo y de infraestructuras a largo plazo, con el fin de evitar problemas de eficacia tanto en materia de seguridad como de transporte. El transporte de mercancías por carretera se ha incrementado notablemente durante los últimos 30 años para ajustarse a la entrega “justo a tiempo” de los productos, convirtiendo así el sistema de autopistas interestatales en el almacén de los Estados Unidos (Shuford, 2009).

Las demoras en las entregas ocasionadas por las condiciones meteorológicas adquieren un significado añadido cuando el almacenamiento tradicional y no motorizado de productos tiene un carácter limitado. Por ejemplo, la escasez de alimentos a nivel local como consecuencia de retrasos en el servicio derivados de inclemencias meteorológicas representa una importante preocupación. La entrega “justo a tiempo” y un nuevo puerto interior eran los objetivos que se pretendían conseguir tras las nuevas redes de los Sistemas de información meteorológica de las calzadas (RWIS), tal y como se describió en el seminario sobre mesorredes celebrado en Kentucky (Foster, 2008). Como su propio nombre indica, estas estaciones miden las condiciones meteorológicas a lo largo de las calzadas, así como en otros circuitos de transporte.

Sin embargo, al menos en un caso, las altas temperaturas pueden tener un importante efecto positivo sobre el transporte. Si las condiciones del hielo del océano Glacial Ártico continúan su proceso de convertirse en

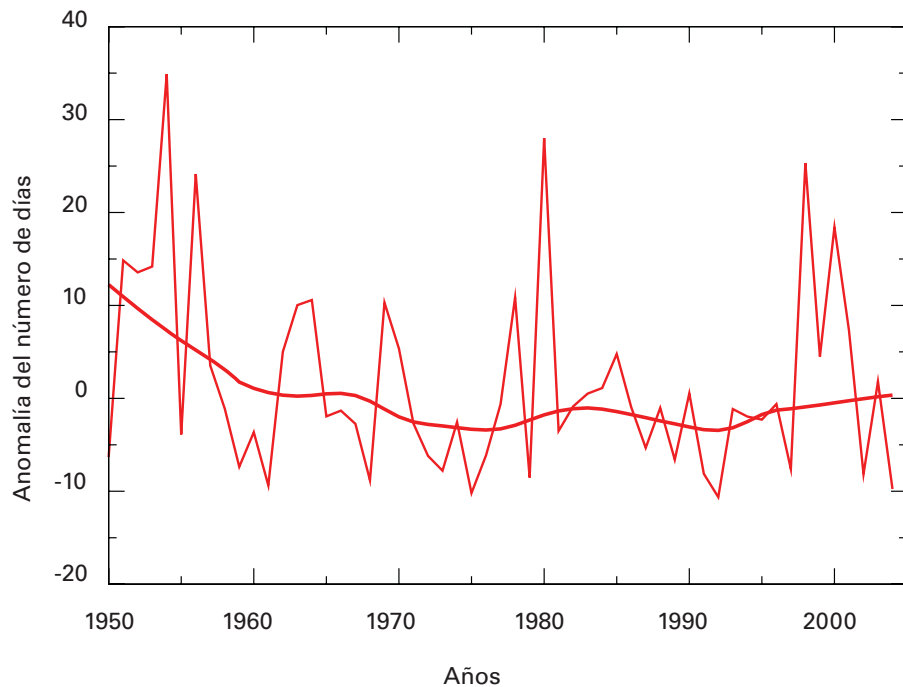


Figura 3 — Serie temporal histórica obtenida de estaciones situadas en un radio de 500 km de Dallas, Texas, que muestra las anomalías del número de días con temperaturas por encima de los 37,7 °C

menos severas, hay proyectos para aumentar el comercio internacional a través de las aguas de Alaska por la Ruta del Mar del Norte (NCR, 2008). Durante los últimos 30 años se ha observado una fuerte tendencia negativa en la extensión del hielo marino en la región ártica durante los meses de verano, conclusión que se ha visto reforzada por las observaciones efectuadas en septiembre de 2008. Según

un informe de la Administración nacional del océano y de la atmósfera (NOAA), cada vez es más probable que la zona del Ártico pase de una superficie cubierta de hielo permanente a un océano plagado de bloques de hielo durante los meses de verano (Richter, 2008). Este hecho tendría un gran impacto sobre las rutas preferidas para el transporte oceánico de mayor importancia.

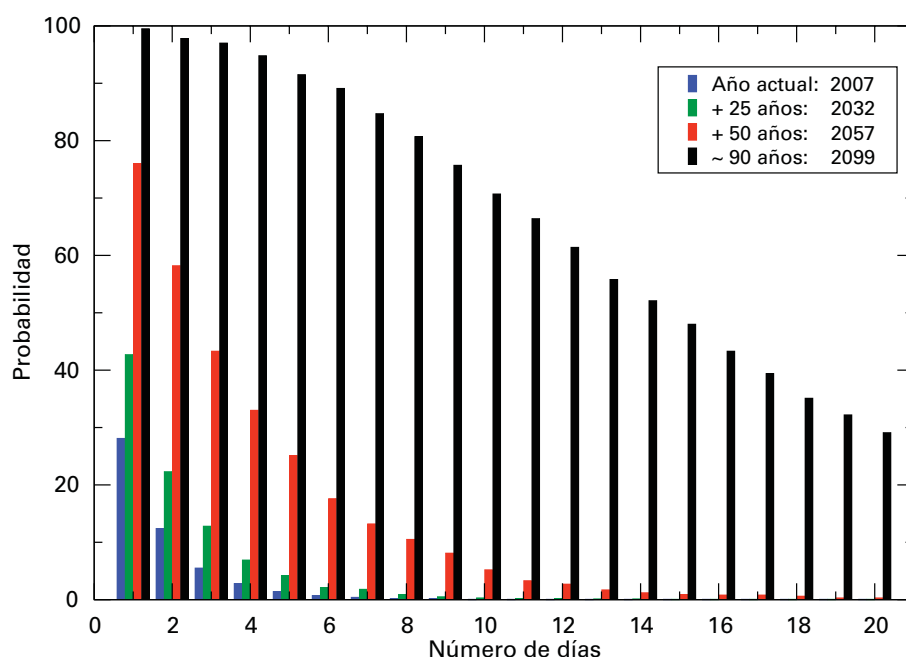


Figura 4 — Probabilidad actual y futura de que durante los meses de verano haya entre uno y veinte días con temperaturas iguales o superiores a 43,3 °C en Dallas, Texas

Precipitaciones extremas

Las precipitaciones originan la mayor parte de demoras y accidentes de los vehículos motorizados en los que la causa obedece a las condiciones meteorológicas. Una lluvia de intensidad y duración suficientes puede sumergir las calzadas e inundar los pasos subterráneos bajos, y estas inundaciones pueden provocar socavones y hundimientos en las calzadas. Las inundaciones ocasionan daños o pérdida de solidez en las estructuras de soporte de la base de los raíles, provocan desbordamientos en las rutas y deslizamientos de lodo que pueden dañarlas, y cada año tienen lugar unos siete grandes episodios de estas características (Rossetti, 2002).

Los fenómenos más importantes relacionados con la precipitación pueden interrumpir la totalidad del sistema de transporte por tierra, incluyendo mercancías transportadas por tren, camión, barco y barcaza. Por ejemplo, en enero de 2009, las intensas precipitaciones (cantidades de 15 cm asociadas con una época cálida que ocasionó el derretimiento de la nieve) dieron lugar a la paralización de los trenes de mercancías y a que cientos de camiones quedaran atrapados a lo largo de las principales autopistas cercanas a Seattle, Washington. Un tramo de 30 kilómetros de longitud de la interestatal 5, la principal autopista que recorre de norte a sur el estado, quedó cortado. El fenómeno tuvo un carácter tan masivo que las rutas alternativas, tanto en el caso de las autopistas como de las vías férreas, también quedaron cortadas como consecuencia de grandes avalanchas, deslizamientos de lodo e inundaciones, ocasionando así el aislamiento de uno de los principales puertos de la ciudad de sus mercados en el resto del país (diversos informes de los medios de comunicación).

En julio de 1996, un temporal que se prolongó durante 24 horas y que batió todos los registros ocasionó inundaciones repentinas en Chicago. Como consecuencia de esta situación, se produjeron grandes retrasos en el transporte en las carreteras metropolitanas y en los ferrocarriles, las personas que se desplazaban a Chicago para acudir a su puesto de trabajo fueron incapaces de llegar a la ciudad durante tres días, y más de 300 trenes de mercancías sufrieron retrasos o vieron cómo

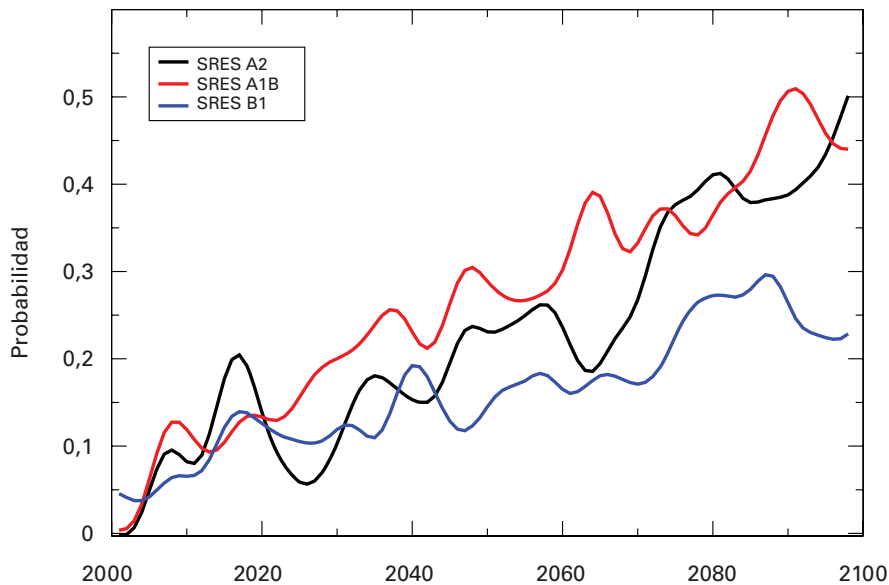


Figura 5 — La tendencia al alza del índice simple de intensidad diaria (la precipitación total anual dividida por el número de días con precipitación) indica que, en promedio para toda el área de los Estados Unidos, cuando se producen precipitaciones, estas tienden a ser más fuertes. Se prevé que los cambios pronosticados, según el modelo de medianas para el índice simple de intensidad diaria, sigan incrementándose sobre la zona continental de los Estados Unidos, en el futuro.

se les asignaba una nueva ruta. Chicago es el centro neurálgico nacional del transporte por ferrocarril, por lo que la ciudad es atravesada por casi el 90 por ciento de todo el tráfico de mercancías (Changnon, 1999). Los socavones en el lecho de las vías y en las calzadas como consecuencia de la aparición de este tipo de fenómenos podrían derivar en cierres permanentes de algunas infraestructuras (NCR, 2008).

Puesto que los episodios de precipitaciones intensas pueden ocasionar inundaciones que dañen o destruyan infraestructuras relacionadas con el transporte, los ingenieros civiles emplean valores de intensidad, frecuencia y duración de las precipitaciones a la hora de diseñar los conductos subterráneos de las calzadas, los sistemas de drenaje del agua de lluvia, las líneas de ferrocarril y los lechos de las vías. Las estimaciones probabilísticas relativas a la intensidad de las precipitaciones con arreglo a un ámbito de duración (de 5 minutos a 24 horas) para períodos de retorno o intervalos de repetición de 20, 50 y 100 años suelen ser criterios habituales de diseño.

Para gran parte del país, estas estimaciones probabilísticas de la precipitación se remontan a las décadas de 1960 ó 1970. Normalmente, las estructuras se diseñan para soportar una inunda-

ción cada 100 años (una inundación cuya probabilidad de aparición es de un 1 por ciento en cualquier año determinado). Los mapas de zonas inundables que publica la Agencia federal de gestión de emergencias (FEMA) se basan en gran medida en estimaciones obsoletas de intensidad, frecuen-

cia y duración. En muchas regiones, la zona afectada por una inundación real cada 100 años será mayor de lo que cabría esperar basándose en los mapas de la FEMA elaborados con arreglo a esta información desfasada. En consecuencia, las estructuras diseñadas conforme a esas normas pueden estar en peligro. Algunos estudios más recientes (<http://www.nws.noaa.gov/oh/hdsc/>) ofrecen mejores estimaciones en las que basarse a la hora de tomar decisiones relativas al diseño (Bonnin, 2003).

En el otro extremo, la falta de precipitaciones conlleva niveles de agua más bajos, lo que afecta de forma negativa al uso de las vías fluviales interiores, especialmente para el tráfico de las barcas. La sequía ha influido sobre la navegación comercial en la parte baja del río Misisipi, desde San Luis hasta el Golfo de México, donde no hay compuertas ni presas para mantener la profundidad de navegación. La sequía de 1988 provocó que más de 4 000 barcas quedaran varadas. Como consecuencia, los ferrocarriles experimentaron un aumento de actividad en el transporte de grano y en el de enormes cantidades de otras materias primas.



Figura 6 — Las carreteras están sujetas a un tráfico cada vez más denso. Con unas condiciones meteorológicas de mayor impacto, los responsables de planificar el tráfico se verán obligados a encontrar formas de hacer frente al cambio climático.

D. McGuirk

Fenómenos más importantes que probablemente experimenten cambios, debido al calentamiento global, afectando al transporte

- **Inviernos mucho menos fríos**
 - Mantenimiento más sencillo en zonas libres de nieve
 - Impacto positivo sobre el transporte marítimo
 - Menos barreras de hielo suspendidas
 - Menos acumulación de hielo en revestimientos de cubierta
- **Mayor frecuencia de tiempo muy caluroso**
 - Combado de los rieles de las vías férreas
 - Deformación permanente del asfalto en carreteras
- **El calentamiento generalizado contribuirá a los siguientes procesos:**
 - Fusión del hielo marino en el Ártico:
 - Solamente en verano
 - Posible apertura del Paso del Noroeste (ruta del Mar del Norte)
 - Podrían ahorrarse 4 000 kilómetros en llegar desde Europa hasta Extremo Oriente
 - Problemas por el deshielo de la capa subterránea de hielo en las carreteras y sistemas de tuberías de Alaska
 - Menor número de carreteras con hielo estacional y de carreteras rurales congeladas
- **Mayor frecuencia de episodios de lluvias intensas**
 - Demoras en muchas de las formas de transporte
 - Inundaciones localizadas
 - Daños a los puentes diseñados para tener una duración de 100 años
 - Daño a las carreteras y vías férreas diseñadas para durar 25 y 50 años
 - Socavación de los lechos de soporte de los sistemas de tuberías
- **Previsión de veranos cada vez menos húmedos y posibilidad de sequías**
 - El descenso de los niveles hídricos puede dificultar el tráfico de barcazas en el interior
 - El calentamiento global conlleva:
 - Estaciones de lluvias más largas y de nieve más cortas
 - Un impacto positivo sobre el transporte, y en concreto sobre la seguridad en carretera

Impactos del cambio climático sobre el transporte en superficie

El cambio climático afectará a la eficacia, seguridad y fiabilidad de las infraestructuras de transporte existentes y al diseño de las nuevas. Las mejoras destinadas a actualizar los sistemas existentes y los nuevos diseños tendrán un coste de aplicación elevado, por lo que el hecho de contar con datos

climáticos sólidos se antoja fundamental para poder tener garantías a la hora de adoptar buenas decisiones. Las proyecciones climáticas empleadas en el estudio del NCR estaban basadas tanto en datos de observación como en salidas de modelos, utilizando muchas técnicas diferentes. Aunque a través de las referencias puede llevarse a cabo una descripción íntegra, las salidas del modelo climático global que se utilizaron fueron las mismas que contribuyeron a la elaboración del cuarto

Informe de evaluación (AR4) del Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC). De cara a este estudio se analizaron tres escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, y se compararon con las simulaciones del modelo para el pasado más reciente.

Este artículo no reproduce la lista íntegra de parámetros e impactos sobre la superficie y el transporte por agua. Estos parámetros están disponibles en el anexo del informe del NCR (páginas 117 a 134). En vez de ello, en el cuadro de la izquierda aparece una lista simple de los fenómenos fundamentales que es probable que experimenten cambios, mientras el calentamiento global afecta al transporte.

La principal manera en la que el cambio climático puede afectar al transporte es a través de cambios en las condiciones meteorológicas extremas. Como ya se ha mencionado, existen algunos impactos positivos. Sin embargo, analizando todos los factores puede decirse que puesto que los sistemas están adaptados a sus rangos históricos de extremos, cabe esperar que la mayor parte de los impactos que tienen lugar como consecuencia de fenómenos que se encuentran fuera de este rango sea negativa (CCSP SAP 3.3).

En todos los sectores de transporte, los extremos meteorológicos afectan a la eficacia de las operaciones y a la seguridad e integridad de la infraestructura. Los apartados anteriores han descrito impactos meteorológicos sobre el transporte, ocasionados por temperaturas extremadamente altas y por precipitaciones extremas. Tal y como se afirma a continuación, existe un alto nivel de confianza en que estos fenómenos se produzcan con mayor asiduidad en el futuro debido al cambio climático. Además, algunos de los puntos débiles regionales más importantes de las infraestructuras de transporte ante el cambio climático se localizarán en zonas costeras.

Proyecciones de temperatura

Las salidas del modelo climático ofrecen proyecciones de los cambios en la temperatura media. Pero, ¿cómo es posible que estos cambios en las temperaturas medias puedan pronos-

ticar temperaturas extremas que pueden derivarse del cambio climático? El programa del Centro nacional de datos climáticos (NCDC) de la NOAA relativo a probabilidades de extremos de temperatura en los Estados Unidos (NOAA, 1999 (CD-ROM)) se utilizó para estimar la probabilidad de que se registraran temperaturas límite, durante uno o más días consecutivos, y/o la probabilidad de que esta temperatura umbral se superara a lo largo de varios días en un observatorio para un mes o una estación del año en concreto, determinando tal probabilidad a partir de estadísticas del clima observado combinadas con las proyecciones del modelo.

La ciudad de Dallas, en Texas, ofrece un ejemplo de cómo unas temperaturas elevadas más frecuentes pueden afectar al transporte ferroviario. Tal y como se ha comentado anteriormente, el umbral de 43 °C es el punto en el que podría tener lugar el combado de los railes, con lo cual el transporte por este medio se vería afectado de forma negativa. Dallas registró una temperatura de 43 °C en septiembre de 2000 y en tres ocasiones durante el verano de 1980 (pico en la Figura 3). La Figura 4 muestra que Dallas, al igual que la mayor parte de los Estados Unidos, cuenta con proyecciones que ponen de relieve que la probabilidad de sufrir un caluroso día de verano irá en aumento, es decir, la temperatura a la que los rieles pueden combarse será un acontecimiento cada vez más habitual.

En consecuencia, resulta razonable suponer que será necesario llevar a cabo amplias actualizaciones de las infraestructuras para garantizar una seguridad, una eficacia y una fiabilidad continuadas del sistema de transporte de los Estados Unidos frente a los extremos térmicos derivados del cambio climático.

Proyecciones de precipitación

Aunque los cambios previstos en los índices totales de precipitación en los Estados Unidos albergan numerosas incertidumbres, los datos señalan que estas precipitaciones, cuando se produzcan, tendrán lugar de forma menos habitual aunque más intensa (CCSP SAP 3.3.). La Figura 5 muestra un gráfico sencillo de intensidad diaria. Se trata de la precipitación total en un año dividida por el número de



Figura 7 — Las autopistas y ríos de los Estados Unidos son controlados por sistemas avanzados, con el fin de gestionar el tráfico de forma más eficaz durante el desarrollo de fenómenos meteorológicos de gran impacto

días con precipitación. El gráfico refleja una tendencia claramente al alza, que viene confirmada por los ejemplos siguientes de fenómenos relacionados con precipitaciones que afectan al transporte.

Un estudio sobre episodios de precipitación en la región del delta del Misisipi (Burkett, 2002) muestra incrementos en los episodios más intensos (con precipitaciones superiores a los 5 cm diarios). En este caso, el conjunto de la precipitación medial anual ha aumentado entre un 20 y un 30 por ciento durante los últimos 100 años. Los años más recientes han sido testigos de precipitaciones más intensas sobre gran parte de los Estados Unidos (NCR, 2008). Una gran parte de las precipitaciones está produciéndose en días muy húmedos (definidos como eventos con más del 95 por ciento de probabilidad de ocurrencia). En la zona central de los Estados Unidos se han observado aumentos en las precipitaciones intensas durante la estación cálida, con grandes cantidades de lluvia caídas en un período de tiempo más corto de lo habitual.

Alrededor de 65 000 km de vías fluviales navegables a lo largo de las costas, ríos y lagos en los Estados Unidos facilitan el transporte por barco y barcaza. Un minucioso estudio sobre los estados de Misisipi, Misuri y Ohio, que cuentan con complejos sistemas de

transporte fluvial, revela un cambio climático hacia unas condiciones en las que los períodos de lluvias fuertes abarcan más días desde los años 20; asimismo, este estudio apunta hacia un incremento a largo plazo tanto de la frecuencia de las inundaciones como de su magnitud (Changnon, 2001). Debido a que la mitad del grano exportado desde los Estados Unidos se transporta en barcas por este sistema fluvial, estos cambios climáticos tienen un gran impacto.

Impactos costeros

Las tormentas tropicales y extratropicales tienen un gran impacto sobre las infraestructuras de transporte en las regiones costeras. Los sistemas de transporte de las zonas metropolitanas de Nueva York, Nueva Jersey y Connecticut han demostrado ser vulnerables frente a importantes ciclones extratropicales o temporales del noreste (Peterson, 2008). Por ejemplo, el temporal del noreste de diciembre de 1992 provocó importantes colapsos en los sistemas de transporte de toda la zona. Las carreteras se inundaron, los trenes experimentaron demoras o cancelaciones, los servicios de autobuses fueron suspendidos, los aeropuertos se cerraron por los fuertes vientos, los embarcaderos, puertos deportivos y carreteras resultaron destruidos por la inundación costera y por la llegada de

olas impulsadas por vientos de fuerza huracanada e intensificadas como consecuencia de la marea alta astronómica. Miles de embarcaciones quedaron destruidas o seriamente dañadas (NOAA, 1992).

El Estudio sobre los efectos de los huracanes en los sistemas de transporte del Metro de Nueva York (MNYHTS, 1995), llevado a cabo tras la tormenta extratropical de diciembre de 1992, ofrece una evaluación excelente de los impactos experimentados por las infraestructuras de transporte a través del cálculo informático de alturas de olas de mareas de tempestad asociadas con las peores trayectorias posibles de una tormenta en caso de huracán. Se examinaron dieciséis importantes infraestructuras de transporte, que incluían túneles, puentes, instalaciones de terminales marítimas y el Aeropuerto internacional John F. Kennedy, tomando nota de sus elevaciones críticas más bajas. La elevación crítica de todas las estructuras se encontraba por debajo del nivel de oleaje asociado a los huracanes de categoría 3 y 4 simulados en función de las condiciones climáticas actuales. En el modelo, los campos de aviación, las entradas a túneles, los accesos a los puentes y los pozos de ventilación de las vías subterráneas quedaron anegados por el oleaje provocado por la marea de tempestad. Otros fenómenos similares o más intensos, agravados por los efectos sobre las elevaciones críticas de las subidas del nivel del mar como consecuencia del cambio climático, tan solo aumentan las posibilidades de que se produzcan daños generalizados en el futuro.

A medida que suba el nivel del mar, podrán verse inundaciones más frecuentes de autopistas y vías férreas situadas en las proximidades de estuarios, durante las mareas altas y los temporales. Habrá dificultades para realizar las operaciones en puertos y, especialmente, el desplazamiento de mercancías de un medio de transporte a otro (de barco a ferrocarril o a camión) (WIST 4-27). El espacio que queda por encima del nivel del agua en la pleamar irá disminuyendo paulatinamente en

los casos de los ferrocarriles y puentes de carretera atravesados por el agua en la zona de marea (NCR, 2008). Además, muchas vías férreas llevan en su localización actual 150 años, un período durante el cual el nivel del mar, tanto a escala mundial como local, se ha elevado, y muchos trazados, señales y estaciones se encuentran ahora en altitudes lo suficientemente bajas como para sufrir inundaciones durante temporales fuertes (Titus, 2002).

Muchos estudios llevados a cabo sobre zonas costeras a lo largo del Golfo y de las costas del océano Atlántico, donde se encuentran importantes infraestructuras de transporte, aportan estimaciones de áreas que probablemente, en un espacio de tiempo de 25, 50 ó 100 años, se encuentren por debajo del nivel del mar (NCR, 2008). Estos cálculos ponen de manifiesto que las infraestructuras importantes de transporte quedarán inundadas de forma permanente, a menos que se apliquen técnicas de mitigación, como por ejemplo la construcción de barreras defensivas del tipo de diques de abrigo.

El impacto de la subida del nivel del mar a nivel local se ve afectado por condiciones locales como la subsistencia, los cambios en la forma de la línea de costa, la invasión de agua salada o las inundaciones interiores como consecuencia de las precipitaciones. Los cálculos relativos al oleaje de las mareas de tempestad deberían llevarse a cabo con arreglo al valor máximo del nivel del mar previsto a escala local, y debería tomarse en consideración la elevación crítica mínima de las infraestructuras cercanas a la costa. Esta circunstancia, unida a la posibilidad de aparición de unos ciclones tropicales más intensos (CCSP SAP 3.3), proporcionaría una mejor perspectiva de los impactos locales. El daño a las estructuras interiores, incluidas las infraestructuras de transporte, depende en gran medida de la elevación de las olas de la marea de tempestad, agravada por el grado de crecida del nivel del mar a escala local, tal y como pone de relieve el siguiente ejemplo.

El área inundable cada 100 años, según los mapas actuales, para el caso de Hampton Roads, Virginia, la 39.^a área metropolitana más poblada de la nación de acuerdo con las estadísticas, se convierte en una zona con un período de retorno de 50 años como consecuencia de una mayor intensidad en las lluvias y en las mareas de tempestad de los episodios de temporal (Shen, 2005). Los mareógrafos situados en las inmediaciones de la bahía de Chesapeake indican que la subida del nivel del mar en esta área es el doble de la media mundial debido a las condiciones locales. Esta zona acoge la mayor base naval del mundo, dos aeropuertos civiles, un centro de control de transporte militar y varias bases militares, que dan trabajo a más de 100 000 personas. Esta infraestructura fundamental, conectada a través de amplias redes de puentes y túneles con el segundo mayor puerto de carga en la costa este, se encuentra localizada íntegramente dentro de zonas inundables por la subida del nivel del mar a nivel local, con un escenario medio de aparición altamente probable.

Muchas estructuras situadas en la costa oceánica están diseñadas para contar con una vida útil de 50 años o menos. En la relación de estas estructuras se incluyen aeropuertos, diques y canales, puertos de mar, estructuras portuarias, canales de navegación, dársenas de maniobra, zonas de atraque y compuertas de navegación, embarcaderos y desembarcaderos, diques de carenas o diques flotantes, autopistas, vías férreas, túneles y puentes para tráfico rodado, colectores para aguas pluviales, conductos de tuberías y sistemas de control de avenidas aguas arriba. En el caso de estas infraestructuras, los trabajos de reparación, sustitución y rediseño que deben llevarse a cabo de forma relativamente frecuente pueden tener en cuenta la subida del nivel del mar a escala local (Peterson, 2008; Titus, 2002).

Sin embargo, las infraestructuras de transporte pueden tener influencia sobre los patrones de desarrollo de las regiones costeras mucho más allá de la vida útil de las carreteras, o de los raíles, o de los puentes, por lo que la capacidad de las regiones costeras para adaptarse al cambio climático

puede verse apoyada o dificultada por las decisiones que los responsables del sector del transporte adopten hoy en día (Titus, 2002). Los responsables de la planificación de infraestructuras podrían sacar partido de la consideración de las proyecciones climáticas a la hora de adoptar decisiones sobre nuevas infraestructuras, incluyendo su colocación en emplazamientos menos vulnerables (Shuford, 2008). Por ejemplo, el puerto interior de Virginia, que se encuentra a unos 350 km tierra adentro, sirve como centro de redistribución de mercancías que pasan de un medio de transporte a otro, reduciendo así cierto nivel de dependencia de los terminales marítimos costeros que se encuentran expuestos a situaciones de riesgo.

Conclusión

Tanto el impacto de los fenómenos meteorológicos en las operaciones de transporte como el impacto del cambio climático en las infraestructuras destinadas a este mismo fin serán importantes, ya que los extremos meteorológicos cambian en frecuencia e intensidad. Será fundamental disponer de información operativa de carácter meteorológico para minimizar las demoras en las entregas y para mejorar la seguridad, la fiabilidad y la eficacia del transporte.

A medida que vamos teniendo una mayor certeza, la identificación de los impactos del cambio climático de cara a las condiciones locales ofrece a los responsables de planificar las infraestructuras la mejor información posible necesaria para reducir riesgos y para mejorar la eficacia y la fiabilidad de los nuevos y actualizados sistemas de transporte.

Es posible que los impactos sobre las infraestructuras costeras sean los más importantes debido a dos factores concretos. En primer lugar, las zonas costeras están sujetas a los efectos de la subida del nivel del mar y a las tormentas tropicales y extratropicales más intensas. Y, en segundo lugar, es en las costas donde se produce la conexión de tres modos de transporte fundamentales: barcos, trenes y camiones, que se encargan de transportar mercancías con origen y destino en los puertos.

Referencias

- BONNIN, G.M., B. LIN and T. PARZYBOK, 2003: Updating NOAA/NWS rainfall frequency atlases. *Symposium on Observing and Understanding the Variability of Water in Weather and Climate*, Long Beach, CA, 9-13 February.
- BURKETT, V.R., 2002: Potential impacts of climate change and variability on transportation in the Gulf Coast/Mississippi Delta region. En: *The Potential Impacts of Climate Change on Transportation: Workshop Summary*, US Dept. of Transportation, Workshop, 1-2 October 2002. <http://climate.volpe.dot.gov/workshop1002/>.
- CHANGNON, S.A., 1999: Record flood-producing rainstorms of 17-18 July 1996 in the Chicago metropolitan area. Part III: Impacts and responses to the flash flooding, *J. Applied Meteorology*, 38, 257-265.
- CHANGNON, S.A., K.E. KUNKEL and K. ANDSAGER, 2001: Causes for record high flood losses in the central United States. *Water International*, 26, 223-230.
- CLIMATE CHANGE SCIENCE PLAN, 2008: Weather and Climate Extremes in a Changing Climate. Final Report, Synthesis and Assessment Product. (T.R. KARL, G.A. MEEHL, C.D. MILLER, S.J. HASSOL, A.M. WAPLE and W.L. MURRAY (eds.)). Dept. of Commerce, NOAA National Climatic Data Center, Washington, DC, USA, 164 pp. <http://www.climatechange.gov/Library/sap/sap3-3/final-report/default.htm>.
- FOSTER, S., 2008: The Kentucky Mesonet Workshop, 7-8 October 2008, Introductory Remarks, Western Kentucky University, Bowling Green, Kentucky, USA.
- METRO NEW YORK HURRICANE TRANSPORTATION STUDY (MNYHTS), 1995: Interim Technical Data Report/US Army Corps of Engineers, Federal Emergency Management Agency, National Weather Service, NY/NJ/CT State Emergency Management, 75 pp.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA), 1992: Storm data publication December 1992. Disponible en: NOAA'S National Climatic Data Center, 151 Patton Ave, Asheville, NC 28801.
- NOAA, 1999: Probabilities of Temperature Extremes in the USA. CD-ROM disponible en: NOAA National Climatic Data Center, 151 Patton Ave., Asheville, NC 28801.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC), 2008: The Potential Impacts of Climate Change on US Transportation Special Report 290, Transportation Research Board, Washington DC 20001, USA. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/sr/sr290.pdf>.
- OFFICE OF THE FEDERAL COORDINATOR FOR METEOROLOGICAL SERVICES AND SUPPORTING RESEARCH (OFCM), 2002: Weather Information for Surface Transportation: A National Needs Assessment Report (WIST), FCM-R18-2002, Washington, DC. http://www.ofcm.gov/wist_report/wist-report.htm.
- PISANO, A.P., D.A. STERN and P.W. MAHONEY III, 2004: The winter maintenance decision support system (MDSS): Demonstration Results and Future Plans. [Versión electrónica]. http://ops.fhwa.dot.gov/weather/best_practices/MDSSpaperAMS2004.pdf.
- PETERSON, T., M. MCGUIRK et al., 2008: Climate Variability and Change with Implications for Transportation. Transportation Research Board, Washington DC, USA. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/sr/sr290Many.pdf>.
- RICHTER-MENGE, J., J. COMISO et al., 2008: Sea ice cover. En: Arctic Report Card: <http://www.arctic.noaa.gov/reportcard/seaice.html>.
- ROSSETTI, M.A., 2002: Potential impacts of climate change on railroads. En: *The Potential Impacts of Climate Change on Transportation: Workshop Summary*, US Dept. of Transportation, Workshop, 1-2 October. <http://climate.volpe.dot.gov/workshop1002/>.
- ROSSETTI, M.A., 2008: Impacts of weather and climate on commercial motor vehicles. *American Meteorological Society 20th Conference on Climate Variability and Change*, New Orleans, Louisiana, USA.
- SHEN, J., W. GONG and H. WANG, 2005: Simulation of Hurricane Isabel using the Advanced Circulation Model for Shelves, Coasts and Estuaries, Virginia Institute of Marine Science, Department of Physical Sciences, College of William & Mary, Gloucester Point, VA 23062, USA.
- SHUFORD, S., 2008: Planning for Climate Change; A Handbook for Urban and Rural Area Planners. Borrador original producido a través de una beca del Centro nacional de datos climáticos de la NOAA, Universidad de Carolina del Norte, Asheville, Carolina del Norte. Ejemplares disponibles en G. Voos, UNC-Asheville, y Marjorie McGuirk, investigadores principales. A publicar en 2009 por la American Planning Association.
- SHUFORD, S., G. VOOS, J. FOX et al., 2009: Applied science at the local government level—climate change science for planning professionals. *Fourth Symposium on Policy and Socio-Economic Research*, American Meteorological Society Annual Meeting, Las Vegas, Nevada.
- TITUS, J., 2002: Does sea-level rise matter to transportation along the Atlantic coast? En: *The Potential Impacts of Climate Change on Transportation: Workshop Summary*, US Dept. of Transportation, 1-2 October. <http://climate.volpe.dot.gov/workshop1002/>.