

INVESTIGACIONES INNOVADORAS QUE CONTRIBUYEN A LA SEGURIDAD, SOSTENIBILIDAD Y RESILIENCIA EN LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE¹

Benjamín Colucci-Ríos², Alberto M. Figueroa Medina³, Didier Valdés Díaz⁴

RESUMEN: Los sistemas de infraestructura de transporte son vitales para el movimiento efectivo, eficiente, seguro y sostenible de personas y bienes que promueven el desarrollo económico de las ciudades y países para presentes y futuras generaciones. Este artículo presenta estadísticas pertinentes relacionadas a la movilidad, seguridad, accesibilidad, equidad, confiabilidad y resiliencia de los sistemas de transporte en los Estados Unidos y a nivel internacional, y presenta algunos de los retos presentes y futuros. La seguridad, congestión y el factor humano se enfatizan en combinación con las ideas innovadoras y medidas correctivas basadas en investigaciones a nivel Estatal y Federal, para mitigar la congestión y mejorar la seguridad de todos los usuarios. Entre las ideas innovadoras se incluyen las iniciativas del programa Cada Día Cuenta de la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos, hallazgos de investigaciones de los Consorcios Universitarios de Transportación (UTC) de SAFER-SIM y el Instituto Nacional para la Reducción de la Congestión (NICR), el uso de simuladores de conducción, realidad virtual, sistemas aéreos no tripulados y modos alternos de transporte como *e-scooters*, y las gestiones exitosas de transferencia de conocimiento de estas iniciativas innovadoras en el ámbito presencial y virtual a través del Centro de Transferencia de Tecnología en Transportación de Puerto Rico.

Palabras clave: infraestructura de transporte, innovación en transportación, resiliencia, simulador de conducción, realidad virtual, equidad

INNOVATIVE RESEARCH THAT CONTRIBUTES TO SAFETY, SUSTAINABILITY AND RESILIENCE IN TRANSPORTATION SYSTEMS

ABSTRACT: Transportation infrastructure systems are vital for the effective, efficient, safe, and sustainable movement of people and goods, and promote the economic development of cities and countries for present and future generations. This article presents pertinent statistics related to mobility, safety, accessibility, equity, reliability, and resilience of transportation systems in the United States (U.S.) and internationally, and present some of the present and future challenges. Safety, congestion, and the human factor are emphasized in combination with innovative ideas and research-based remedial measures at the State and Federal level to mitigate congestion and improve safety for all users. Innovative ideas include the U.S. Federal Highway Administration's Every Day Counts program initiatives, findings from University Transportation Centers (UTC) SAFER-SIM, and the National Institute for Congestion Reduction (NICR), and the use of driving simulators, virtual reality, unmanned aerial systems and alternative modes of transport such as *e-scooters*, and the successful management of knowledge transfer of these innovative initiatives at in person seminars and webinars through the Puerto Rico Transportation Technology Transfer Center.

Keywords: transportation infrastructure, transportation innovation, resilience, driving simulator, virtual reality, equity

¹ Artículo recibido el 11 de diciembre de 2020 y aceptado para publicación el 23 de diciembre de 2020.

² Catedrático y Director de Centro de Puerto Rico LTAP-T², Abertis e Iniciativas de Cada Día Cuenta de PR, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico. Email: benjamin.colucci1@upr.edu

³ Catedrático e Investigador Principal del Instituto Nacional para la Reducción de la Congestión, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico 00681-9000. Z Email: alberto.figueroa3@upr.edu

⁴ Catedrático e Investigador Principal de SAFER-SIM, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico. Email: didier.valdes@upr.edu

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de transporte son elementos vitales para el movimiento efectivo, eficiente y seguro de las personas y bienes y para el desarrollo de las ciudades y las regiones. La necesidad de mantener la infraestructura de carreteras y de transporte colectivo en una condición aceptable, unido a tener buen desempeño en términos de movilidad, seguridad, accesibilidad, equidad, confiabilidad y resiliencia, entre otros aspectos, son retos primordiales que los planificadores, ingenieros y oficiales de transporte deben evaluar esmeradamente para asegurar la calidad de vida de la población. Wagner (2019) indica que la demanda por movilidad urbana a nivel mundial en el año 2010 fue de 25.8 trillones de pasajeros-kilómetros, y los estimados son de que la demanda aumentará en 36% para el año 2030 y en 88% para el año 2050. En los Estados Unidos (EE. UU.), la demanda en el sector del transporte representó gastos de \$1.9 trillones, o el 9.4% del Producto Nacional Bruto para el año 2018 (BTS, 2020). Ciertamente el aumento en demanda por la movilidad urbana tiene impactos significativos en la economía de los países a través de todo el mundo. La Figura 1 muestra como los consumidores en los EE. UU. han visto un aumento de 54% en sus gastos personales por vehículos de motor, de \$601 billones en el 2002 a \$928 billones en el 2018.

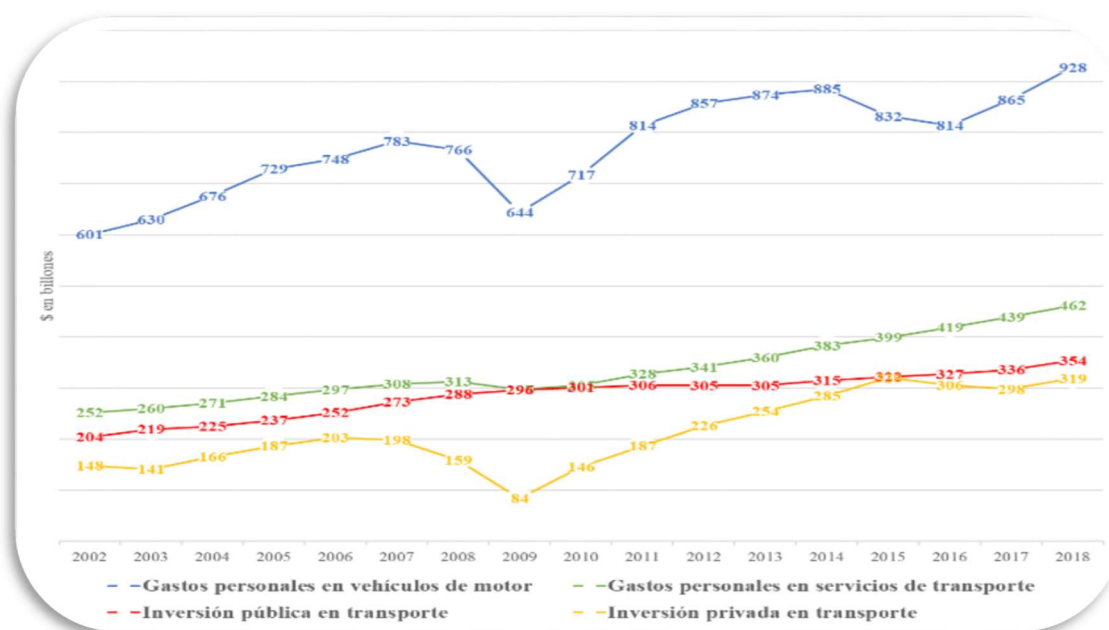


Figura 1: Gastos asociados al transporte en Estados Unidos.

Mientras tanto, el sector público y el privado han aumentado en 73.5% y 115.5%, respectivamente, sus inversiones en transporte durante ese periodo (BTS, 2020). A pesar de esto, la inversión pública aparenta no ser suficiente para mantener la infraestructura de carreteras y transporte colectivo en buena condición. Según el NCPWI (1988) y el ASCE (2017), la condición de la infraestructura de carreteras y transporte colectivo en los EE. UU. ha ido en deterioro, recibiendo calificaciones de C+ y C- en el año 1988 y de D y D- en el año 2017, respectivamente. El NCPWI identificó en aquel momento la necesidad de aumentar la inversión en la expansión de la red vial, hacer reparaciones mayores a carreteras y puentes envejecidos y atender los sistemas rurales de carreteras. En cuanto a transporte colectivo, el NCPWI sugirió incluir estos servicios en planificación de los usos de terreno y en los planes de transporte a largo plazo, así como mejorar el mantenimiento de los sistemas, particularmente en las ciudades más antiguas.

IMPACTO DE LA CONGESTIÓN

El principal efecto del aumento en la demanda por mayor movilidad se observa directamente con el fenómeno de la congestión vehicular en los sistemas urbanos y suburbanos. La congestión se manifiesta de manera recurrente en las carreteras en donde la demanda excede la capacidad física de la vía, mientras otros factores no recurrentes añaden incertidumbre como el clima, los incidentes o choques de vehículos de motor, las zonas de construcción temporeras y los eventos especiales, entre otros (Cambridge y TTI, 2005). Según Reed (2020), la velocidad del tráfico, las tasas de

congestión y el tiempo perdido aumentan con la población y la densidad de una ciudad. Las cinco ciudades en el mundo con mayor índice de congestión vehicular en el 2019 fueron Bogotá, Río de Janeiro, Ciudad de México, Sao Paulo y Estambul. En promedio, estas ciudades experimentaron una pérdida de 169 horas (7 días) al año por la congestión (Reed, 2020). Esto no debe sorprender debido a que estas áreas metropolitanas tienen poblaciones estimadas entre 11 a 22 millones de habitantes. Las ciudades de Boston, Chicago, Filadelfia, Nueva York, el Distrito de Columbia y Los Ángeles tienen el peor desempeño por congestión en los EE. UU. con un rango de 149 a 103 horas perdidas al año (Reed, 2020). Nuevamente, la relación de los niveles de congestión con la población es obvia, con valores entre 5 a 19 millones de habitantes en dichas ciudades. En Puerto Rico, el Área Metropolitana de San Juan, con 2 millones de habitantes, ocupa la posición #25 de mayor congestión en los EE. UU. con 46 horas perdidas al año. Schrank et al. (2019) indica que el problema nacional de la congestión ha ido empeorando consistentemente entre los años 1982 y 2017, con un aumento de 177% en la demora promedio. La congestión también afecta significativamente el movimiento de bienes aumentando los costos de operación y reduciendo la productividad de los servicios de carga. Schrank et al. (2019) indica que el costo por congestión en el sector de la carga mediante camiones aumentó de \$15 billones en el 1982 a \$179 billones en el 2017 por el tiempo operacional adicional y el combustible perdido.

La estrategia de promover soluciones que aumentan la capacidad física de las carreteras ha tenido resultados mixtos. Tenney et al. (2019) explica que el aumento en capacidad de una carretera induce al desarrollo de los terrenos cercanos al corredor “mejorado”, lo que a su vez provoca un aumento en tráfico y viajes de mayor longitud por la dispersión de los usos, revocando la mejoría inicial en desempeño. La investigación acerca de la reducción de la congestión vehicular debe enfocarse hacia la identificación de innovaciones y avances tecnológicos de carácter multimodal que optimicen la eficiencia y la confiabilidad de los viajes para los usuarios de todos los sistemas de transporte. Teniendo esta meta en mente, en el 2019 se estableció el Instituto Nacional de Reducción de la Congestión (NICR) como un Centro Universitario en Transporte mediante una asignación de fondos del Departamento de Transportación de los EE.UU. NICR es integrado por la Universidad del Sur de la Florida (institución líder), la Universidad de California en Berkeley, la Universidad de Texas A&M y la Universidad de Puerto Rico-Mayagüez (UPRM). Los investigadores de NICR tienen la visión y el peritaje amplio en investigación para el desarrollo de teorías y metodologías para análisis y optimización de los sistemas de transporte. NICR ha desarrollado un programa de educación, investigación y transferencia de tecnología basado en los cuatro pilares, según mostrados en la Figura 2.

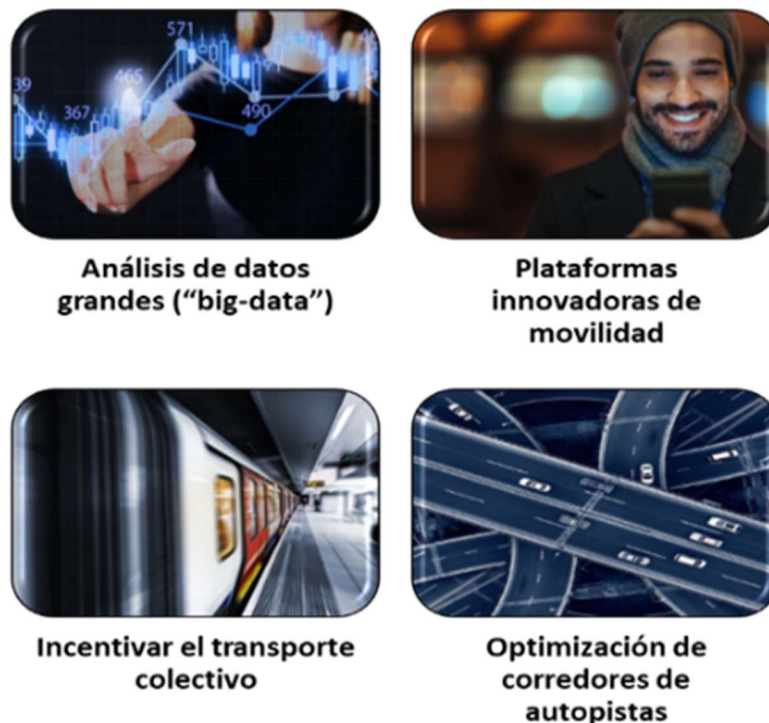


Figura 2: Pilares de NICR.

El equipo de NICR en el RUM lleva a cabo cuatro proyectos de investigación durante el primer año del consorcio que se enfocan en evaluar la efectividad de estrategias de precio por congestión (“congestion pricing”) en carriles administrados en autopistas, la utilización de aeronaves no tripuladas (“drones”) para el monitoreo del tráfico en autopistas, el análisis de equidad y accesibilidad de servicios de micromovilidad por motonetas eléctricas y la implantación de una plataforma de código abierto para brindar información a los usuarios de los servicios de transporte colectivo.

IMPACTO EN LA SEGURIDAD VIAL

Las muertes causadas por los choques de vehículos de motor en las carreteras es otro problema apremiante a nivel mundial con consecuencias funestas. Los niveles de fatalidades y heridos alcanzan proporciones alarmantes con estimados anuales de 1.35 millones de muertes y 50 millones de heridos en el mundo (WHO, 2018). La Figura 3 muestra los estimados del WHO de las fatalidades anuales en carreteras por país.

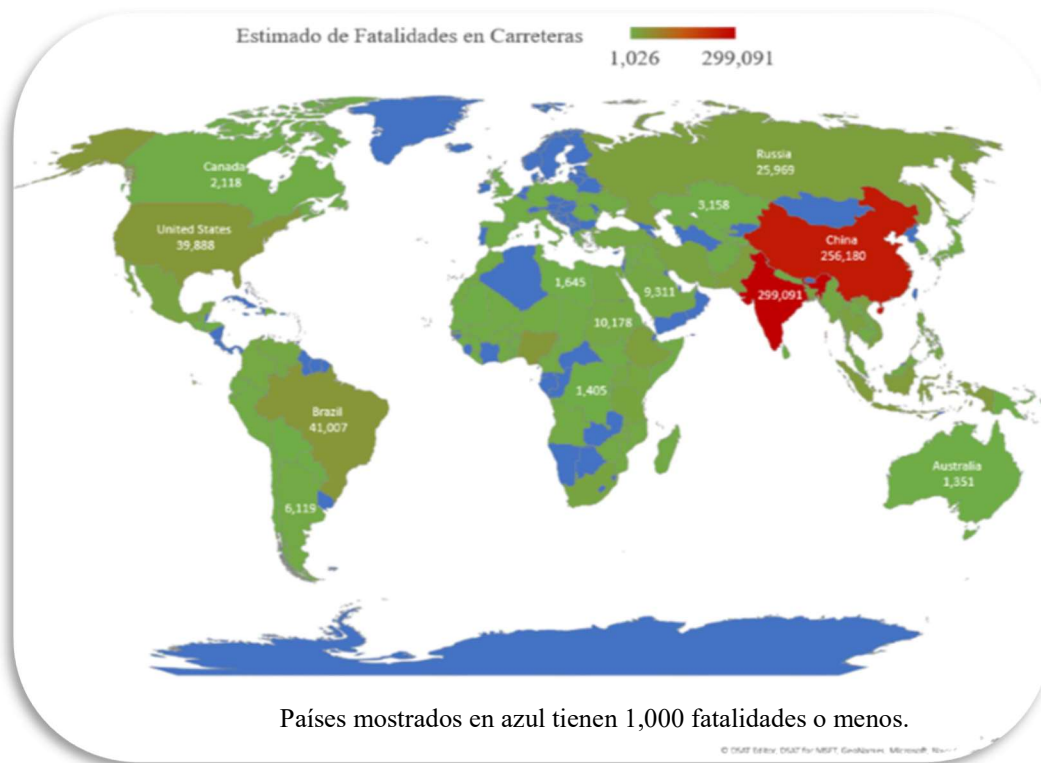


Figura 3: Estimado de fatalidades en carreteras.

La distribución global muestra una relación con la cantidad de fatalidades y el nivel económico del país. A pesar de contar con solo el 1% de la flota de vehículos de motor, los países de menor nivel económico tuvieron el 13% de las muertes (WHO, 2018). Con el fin de reducir las muertes en las carreteras a nivel mundial, las Naciones Unidas establecieron la Década de Acción para la Seguridad Vial en el 2010. Aunque la meta de reducir las muertes a la mitad no será alcanzada, se han tenido resultados positivos con el establecimiento de nueva legislación, estándares de vehículos más rigurosos y mejoras en el acceso a servicios médicos luego de un choque (WHO, 2018). En noviembre de 2017, la Asamblea de las Naciones Unidas estableció doce metas de desempeño voluntarias como mecanismo para mejorar la seguridad vial. La Figura 4 muestra algunas de las estrategias de la ONU. Estas metas voluntarias de seguridad se añaden a las previamente establecidas en el 2015 en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que busca proveer acceso a sistemas de transporte seguro, accesible, económico y sostenible para todos, mejorar la seguridad vial, expandiendo el transporte colectivo y dar atención especial a los usuarios vulnerables.

Los adelantos tecnológicos en los nuevos vehículos de motor incluyen sensores avanzados y avances en inteligencia artificial en los sistemas de computadora que permiten un mayor grado de seguridad asistiendo al conductor humano o hasta controlando la velocidad o posición del vehículo. El desarrollo y las pruebas de estas tecnologías nos dirige hacia un posible futuro cercano con un grado parcial o total de automatización. Se estima que para el año 2040 la flota de vehículos tenga de un 20 a un 40% de vehículos con automatización de nivel 4 (alto) o 5 (total). Los impactos esperados por la automatización son múltiples y variados. El mayor beneficio esperado es la reducción significativa de muertes en las carreteras por la eliminación de los errores cometidos por los conductores humanos. Otros impactos anticipados son los cambios en los patrones individuales de viaje (mayor cantidad de viajes locales en millas recorridas) y la transformación de la ciudad (menos carriles y estacionamientos, más espacios para abordaje en la calle, disponibilidad de espacio para bicicletas y peatones). Al momento, miles de vehículos autónomos son probados en carreteras por con el ánimo de perfeccionar la tecnología. Es importante estudiar como las leyes y las regulaciones en la operación de carreteras, así como las prácticas de diseño y mantenimiento de estas, se ajustarán por la entrada en mayor escala de los vehículos autónomos. El estudio también debe enfocarse en los factores humanos de comunicación y reacción de peatones, ciclistas y otros usuarios vulnerables.



Figura 4: Metas de seguridad vial de la ONU.

OTRAS INNOVACIONES EN LA TRANSPORTACIÓN

En los pasados 25 años se ha observado la implantación o desarrollo de otras tantas nuevas tecnologías e innovaciones que han servido para atender asuntos apremiantes en el transporte a nivel mundial. En términos de los vehículos de motor, hemos visto el resurgimiento de los motores con propulsión eléctrica o híbrida gracias a los desarrollos y el mejor desempeño de los sistemas de batería, mejorando la eficiencia en el consumo de combustible y reduciendo las emisiones de gases. La venta de vehículos eléctricos a nivel mundial llegó a las 2.1 millones de unidades en el 2019 (IEA, 2020). Para el 2010, la flota mundial de vehículos eléctricos era de solo 17,000 unidades, mientras que al 2019 alcanzaba 7.2 millones de unidades, con el 47% de los vehículos adquiridos en China.

En término de nuevos servicios, la llegada y el súbito crecimiento de las compañías de redes de transporte (TNC) cerca del año 2010 revolucionó el ofrecimiento de la movilidad compartida en las zonas urbanas. Actualmente, existen servicios de TNC en más de 500 ciudades en el mundo. Los TNC no han estado exentos de controversias ante la falta de legislación o regulación, la contratación de los conductores, o el impacto negativo hacia los modos competidores como taxis y transporte colectivo. No obstante, el atractivo hacia los usuarios por su alta disponibilidad y menor costo relativo en muchos mercados ha sido irrefutable. El impacto en la congestión de los TNC es mixto, porque el modelo operacional de estos servicios tiende a aumentar la cantidad de millas recorridas y a sustituir viajes que hayan sido realizados en transporte colectivo, a pie, en bicicleta o no se hubieran realizado (Erhardt et al. 2019).

Otra nueva modalidad de movilidad ha surgido en los pasados 10 años con los servicios compartidos de micro movilidad mediante la renta de bicicletas (con y sin estaciones) y motonetas eléctricas (e-scooters). En tan solo 8 años, el crecimiento en viajes completados en estos servicios en los EE.UU. ha sido acelerado, desde 321 mil en el 2010 hasta 84 millones en el 2018 (NACTO, 2018). En el 2019 existían sobre 350 servicios compartidos de micro movilidad en más de 200 ciudades de los EE.UU. El establecimiento de las e-scooters ha generado controversia principalmente por la falta de regulación y la conducta de los usuarios. El impacto en la movilidad de los jóvenes en áreas urbanas ha sido positivo, motivando su uso para viajes cortos dentro de la ciudad. Un estudio preliminar del servicio de e-scooters en la ciudad de Mayagüez en Puerto Rico demostró su potencial de reemplazar con e-scooters hasta el 28% de viajes cortos en vehículos de motor dentro de la ciudad hechos por universitarios. Los mayores retos de estos servicios compartidos son la inequidad por su costo, el uso de los vehículos en las aceras, el bloqueo de entradas a edificios o rampas por el estacionamiento inadecuado de los vehículos y el riesgo de seguridad por caídas o choques con vehículos de motor y otros usuarios.

La Junta de Investigación de Transporte de los EE.UU. (TRB, 2019) ha traído a la discusión nacional doce asuntos apremiantes que son necesarios atender en los sistemas de transporte en los próximos 10 años. Entre los asuntos se incluyen la revolución de nuevas tecnologías y servicios, el crecimiento y las necesidades de mega regiones, la identificación de fuentes de energía y la sostenibilidad, la resiliencia ante los cambios en el clima, la vigilancia ante ataques a la infraestructura, la evaluación del desempeño, la pérdida de vidas y la seguridad vial, promoción de la equidad y accesibilidad de todos los usuarios, formar un mejor sistema de gobernanza y financiamiento, fomentar el desarrollo profesional de nuevos líderes y el desarrollo de la investigación. Las universidades deben jugar un papel esencial en la discusión de todas estas ideas, en el estudio de los problemas y en la búsqueda de soluciones e innovaciones en el transporte.

EL FACTOR HUMANO EN LA SEGURIDAD VIAL

La investigación en factores humanos relacionados con la seguridad vial se continúa desarrollando en varias líneas. En términos de la automatización de los vehículos, se estudia la interacción con los usuarios del sistema vial dentro y fuera del vehículo. Para el mediano y corto plazo, se estudia la aceptación de las tecnologías de automatización que se han incorporado a los vehículos en un segmento del mercado y la interacción con los vehículos que no han incorporado tecnologías de automatización. Además, se estudia como los usuarios de los sistemas viales, incluyendo conductores de automóviles y otros vehículos, ciclistas, peatones y otros modos alternos, continúan contribuyendo significativamente a los choques, muertes y heridos en las carreteras. En varios estudios, se atribuye al factor humano más del 90% de los choques. Por lo tanto, se continúa estudiando la incidencia del factor humano en la seguridad vial en las condiciones actuales y su relación con lo que se espera de la automatización en el futuro que incluye las interacciones de los vehículos autónomos con los usuarios y los modelos mentales que inciden en la interacción con las nuevas tecnologías.

Todos los elementos que inciden en la operación de los sistemas de transportación se ven involucrados en los choques y las subsiguientes muertes o heridas graves. En algunos casos es la infraestructura vial que no tiene un mantenimiento adecuado; en otros casos, son los vehículos que presentan fallas. Pero la condición de la infraestructura y de los vehículos están bajo el control de los operadores y en algunos países se han ido mejorando sustancialmente sus condiciones y se ha ido disminuyendo su contribución en los choques. Por lo tanto, nos queda el estudio de todo lo relacionado con el factor humano para mejorar la seguridad vial.

La Administración Nacional de Seguridad en el Tráfico (NHTSA, 2020) define el estudio de los factores humanos como la aplicación del conocimiento acerca de las características de los seres humanos, incluyendo sus habilidades y limitaciones, para el diseño de equipos, tareas, y trabajos. Estas características de los seres humanos han sido consideradas en múltiples estudios y constituyen la base fundamental de los manuales de diseño tales como las políticas de diseño geométrico (AASHTO, 2018) o el Manual de Dispositivos Uniformes para el Control del Tránsito (MUTCD, 2012). Es evidente que una característica de los seres humanos que requiere especial atención por su importancia para conducir un vehículo es la visión. Es necesario considerar no solamente la agudeza visual estática sino también otras características de la visión que son muy importantes para conducir adecuadamente como son la agudeza visual dinámica, la percepción de profundidad, el movimiento angular, sensibilidad a los destellos, sensibilidad al contraste y campo visual, entre otras. Además de los factores físicos, existen factores cognitivos que son importantes para la conducción como son las habilidades visuo-espaciales para anticipar conflictos, la capacidad

de cambiar rápidamente el foco de atención, la capacidad de mantenerse alerta y vigilante, la atención selectiva para discriminar los aspectos más importantes dentro del ambiente del conductor y los procesos relacionados con las funciones ejecutivas del cerebro y la memoria de largo plazo, entre otras. Finalmente, se deben considerar también los cambios en la condición física de las personas con la edad que pueden contribuir a generar limitaciones en los movimientos que contribuyen a cometer errores al conducir. Por ejemplo, limitaciones al girar la cabeza de un lado a otro rápidamente en situaciones complejas, reaccionar a cambios repentinos en el flujo realizando maniobras rápidas y precisas, o limitaciones físicas por efecto de lesiones. La actividad de conducir requiere que el conductor reaccione rápidamente en algunas circunstancias de la operación para evitar choques.

Además de considerar las características físicas, el campo de los factores humanos considera otros aspectos y situaciones que pueden crear situaciones de riesgo al conducir. Temas como la experiencia y la familiarización con distintos ambientes y situaciones son críticos por ejemplo para conductores adolescentes novicios. Los cambios que ocurren en las condiciones físicas en la vejez afectan a conductores de edad avanzada. Las emociones fuertes y su manejo también inciden en la seguridad al conducir. Las distracciones como el uso del celular para recibir o enviar mensajes de texto, el uso de aplicaciones de GPS o en algunas ocasiones buscar información en la internet o ver videos mientras se conduce y un sinnúmero de posibles distracciones adicionales quitan la atención de la vía y el medio ambiente del sistema vial, generando riesgos potenciales que ocasionan choques. Conducir bajo la influencia de alcohol o sustancias controladas, generan cambios en las condiciones y características físicas de los conductores, y se convierten en situaciones críticas que también generan choques. Por lo tanto, el tema de los factores humanos en la seguridad vial es uno sumamente amplio y su conocimiento, consideración y la generación de acciones correctivas son clave para mejorar la seguridad vial. En las secciones subsiguientes, se presentan los resultados de varios estudios realizados en la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, en los cuales se ha estudiado el factor humano y su relación con varios elementos de los sistemas viales.

Considerando los elementos planteados para el estudio de los factores humanos en la seguridad vial, desde el año 2013 se estableció el Centro Universitario en Transporte bajo el nombre de Investigación en Seguridad Utilizando Simulación (“Safety Research Using Simulation, o SAFER-SIM”) mediante una asignación de fondos del Departamento de Transportación de los EE.UU. Los investigadores de SAFER-SIM pertenecen a cinco universidades, la Universidad de Iowa (institución líder), la Universidad de Massachusetts en Amherst, la Universidad de Wisconsin en Madison, la Universidad de la Florida Central y el Recinto Universitario de Mayagüez (RUM) de la Universidad de Puerto Rico. Los investigadores de SAFERSIM tienen la visión y el liderazgo internacional en el uso de tecnologías de simulación de punta para atacar los problemas de seguridad en los sistemas de transporte. El enfoque de este centro es multidisciplinario y multicampus y consiste en utilizar los más recientes avances en simulación con interacción humana (“human-in-the-loop o HITL”) para estudiar el comportamiento de los conductores, peatones, ciclistas, y en general todos los modos y sus interacciones en los sistemas viales, para reducir la frecuencia e intensidad de los choques y mejorar la seguridad vial. La Universidad de Iowa es la sede del Simulador de Conducción Avanzado Nacional (“National Advanced Driving Simulator o NADS”) y tiene un complejo de simuladores de conducción, simuladores de peatones, simuladores de ciclistas y otros simuladores en varios laboratorios para el estudio de factores humanos. Además, todas las universidades del consorcio tienen laboratorios con simuladores de conducción y de microsimulación. SAFER-SIM ha desarrollado un programa de investigación, educación y transferencia de tecnología aplicando técnicas de simulación a una gama amplia de problemas de seguridad vial con base en cinco áreas temáticas que incluye tecnología de vehículos conectados, diseño de infraestructura vial, usuarios vulnerables del sistema vial, tecnología de simulación distribuida y tecnología de vehículos automatizados. El equipo de SAFER-SIM en el RUM ha llevado a cabo múltiples proyectos utilizando el simulador de conducción del RUM, el simulador de Realidad Virtual (VR) y simuladores de conducción de otras universidades de SAFER-SIM mediante el desarrollo de proyectos colaborativos.

SEGURIDAD VIAL Y SIMULACIÓN CON INTERACCIÓN DE SUJETOS HUMANOS EN LA INVESTIGACIÓN EN EL RUM

Considerando que los proyectos de simulación HITL son de tipo experimental, la metodología de investigación utilizada sigue los pasos típicos de este tipo de estudios que incluye desde identificación de problemas hasta llegar a las conclusiones y recomendaciones, pasando por el desarrollo de los escenarios experimentales y el análisis de los datos obtenidos (Valdés et al, 2017). Las contribuciones del equipo de investigación de SAFER-SIM en el RUM en

cuanto a la metodología de la investigación en proyectos de simulación HITL incluye el desarrollo de encuestas a conductores como parte de la definición de los escenarios utilizados para la simulación, la creación de programas para reducir los datos y crear una base de datos manejable (dado que el simulador guarda los datos de 32 variables cada 0.02 segundos generando archivos de gran tamaño) y la introducción en el análisis de nuevas variables dependientes como el ruido de aceleración (desviación estándar de la aceleración) considerando que es un indicador de la frecuencia de choques de acuerdo con investigaciones recientes (Boonsiripant, 2009).

Cuatro proyectos emblemáticos e innovadores relacionados a la transportación que lleva a cabo la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez con el simulador de conducción en donde se están evaluando tecnologías innovadoras en el área de la transportación son la evaluación del comportamiento de peatones en zonas urbanas, el comportamiento de conductores en zonas de construcción y el efecto del uso del GPS, el análisis operacional y seguridad del carril dinámico con peaje (DTL), el desempeño y comportamiento de conductores en el primer Intercambio en Diamante Divergente (DDI) de Puerto Rico. En estos proyectos se utiliza el simulador de conducción de la UPRM, que se ilustra en las Figuras 5 y 6.

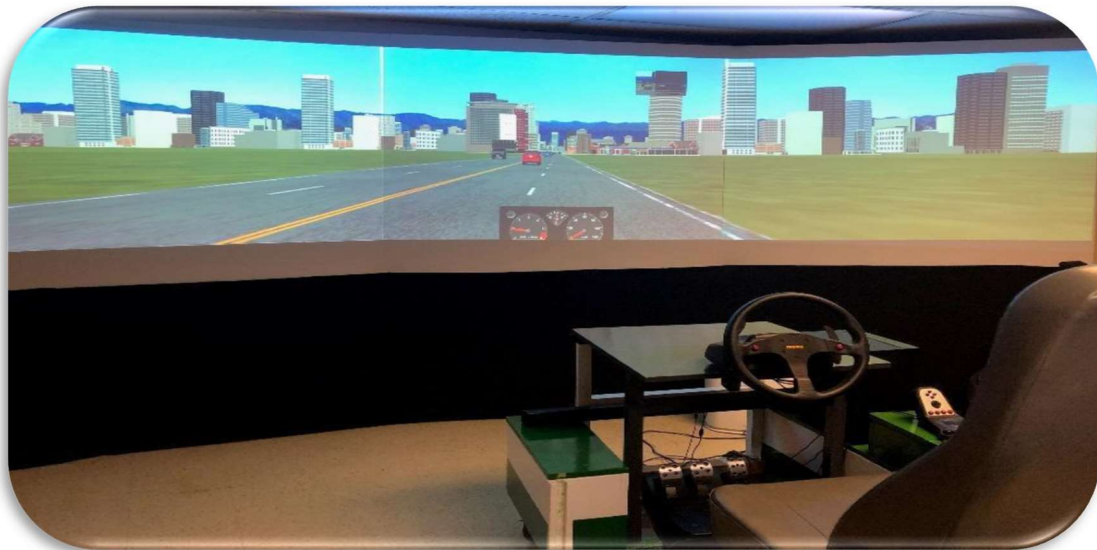


Figura 5: Simulador de conducción de cabina en la UPRM.



Figura 6: Imagen del simulador de conducción en el escenario del DDI.

Además de los proyectos mencionados, el grupo de investigación de SAFER-SIM en el RUM ha llevado a cabo múltiples proyectos de simulación que incluyen la evaluación de configuraciones de señalización y marcado de pavimento en plazas de peaje al igual que en un carril de peaje dinámico que combina otras opciones de manejo de congestión. Además, se ha trabajado en proyectos con simulación de Realidad Virtual (VR) para estudiar la seguridad de los peatones realizando cruces en segmentos de vía de un carril y de dos carriles. Actualmente trabajamos en proyectos relacionados con el impacto de la conducción con varios niveles de concentración de alcohol en sangre (BAC), el desarrollo de estrategias de adiestramiento para conducir correctamente en un DDI, el análisis del comportamiento de los peatones para cruzar las vías en forma segura con ayuda de dispositivos electrónicos conectados con la infraestructura y los vehículos, y la creación de empatía con las condiciones de los trabajadores en zonas de construcción como medida para crear conciencia de las situaciones de riesgo que generan los conductores que no siguen las regulaciones especiales en este tipo de situación. A continuación, se presentan los hallazgos principales de los estudios que el equipo de SAFER-SIM UPRM ha llevado a cabo.

En el estudio de las plazas de peaje, se encontró de suma importancia actualizar la señalización relacionada con la zona de aproximación a la plaza de peaje cuando se realizan cambios para introducir sistemas electrónicos de cobro de peaje. En este estudio se evaluaron varias opciones de señalización y se encontró que es importante identificar apropiadamente el uso de cada uno de los carriles en la zona de aproximación a la plaza de peaje mediante estructuras de señalización elevada sobre la vía (Valdés et al, 2015). Este fue el primer estudio en el ámbito de la simulación de conducción que incluyó una plaza de peaje como elemento clave de la simulación. Otras instituciones dentro del consorcio SAFER-SIM trabajaron también proyectos de simulación con plazas de peaje como parte de un proyecto colaborativo obteniendo resultados similares en los que se recomendaron cambios al uso de carriles en la plaza de peaje, con base en los resultados de la microsimulación y la simulación de conducción (Valdés et al, 2017b). Otros estudios relacionados con sistemas de peaje se realizaron para estudiar un carril de peaje dinámico (DTL) en la Autopista PR-22 que da acceso al Área Metropolitana de San Juan (AMSJ) desde el área noroeste de PR. El DTL consiste en una vía de 2 carriles en el centro de la autopista que opera como un carril gerenciado, que además de cobrar un peaje dinámico que varía dependiendo del nivel de congestión en los carriles de uso general de la autopista, incorpora un sistema expreso de autobuses (BRT) y funciona como una vía reversible que en la mañana da acceso hacia el centro de San Juan y en la tarde salida desde San Juan hacia el área noroeste de Puerto Rico (Colucci, 2015). En los estudios con el simulador de conducción se observaron dos situaciones principales. La primera, verificar el comportamiento de los conductores si se aumenta el límite de velocidad por encima de 45 mph en el DTL dado que la velocidad máxima de los carriles generales de la autopista es de 55 mph. La segunda es que la salida de este carril para los automóviles es hacia la izquierda mientras que para el BRT es hacia la derecha, pero el uso y costumbre de los conductores de automóvil es salir de la autopista por rampas hacia la derecha y la señalización aparentemente se presta a confusión. Los resultados de estos estudios permitieron establecer que la velocidad límite se podría aumentar a 55 mph en el DTL de acuerdo con las condiciones operacionales de esta instalación (Ruiz et al, 2018).

Luego de un proceso de doble experimentación en la simulación y encuestas realizadas a los conductores potenciales del DTL, se llegó a una alternativa de diseño de la señalización horizontal y vertical que aclara de forma positiva la información que se provee a los conductores y contribuye a que tomen la salida correcta (Ruiz et al, 2017).

Un segundo tema de estudio con el simulador de conducción es la distracción por el uso de aplicaciones de GPS en el celular mientras se conduce en zonas de construcción. Analizando la situación que se presenta en una zona de construcción de autopista donde se cierra un carril que obstruye una rampa de salida, se encontró que el 17% de los conductores siguiendo las indicaciones de un GPS invadieron la zona de trabajo para utilizar la rampa de salida, mientras que el 8% de los que no tenían la distracción del GPS invadieron la zona de trabajo (Valdés et al, 2019a). Otro estudio analizó el cierre temporero de un carril por una zona de construcción en una carretera de dos carriles considerando también la posible distracción con el GPS. En este caso, el 25% de los conductores con GPS invadieron la zona de construcción en comparación con 17% de los conductores sin GPS (Valdés et al, 2020a). Además de mostrar que el GPS induce a un número mayor de conductores a realizar maniobras riesgosas e indebidas penetrando en el área de trabajo de una zona de construcción, los estudios demuestran que los proveedores de información mediante GPS requieren conocer de antemano la ubicación y duración de las zonas de trabajo en las carreteras para darle

información actualizada a sus usuarios. Estos resultados crean la necesidad de modificar la legislación para restringir el uso de distractores permitidos (como las aplicaciones de GPS en el celular) cuando se transita por una zona de construcción (Valdés et al, 2019b).

Otro tema de estudio con el simulador de conducción ha sido la seguridad en zonas escolares y sus alrededores. Uno de los comportamientos críticos de los conductores es el exceso de velocidad con respecto a la velocidad rotulada en zonas escolares creando situaciones de riesgo que tienen el potencial de aumentar la severidad de los choques. En estos estudios se encontró que la señalización juega un rol importante en el cumplimiento con los límites de velocidad. Se diseñaron letreros elevados sobre la vía con luces intermitentes señalando el límite de velocidad en la zona lo cual se combinó con mejoras en el marcado de pavimento generando una reducción en la velocidad de operación promedio en el 71% de las situaciones estudiadas. También se observó una disminución en el ruido de aceleración lo que se asocia a una reducción en el potencial de choques (Colón-Torres et al, 2020). Este estudio se realizó también en el simulador de conducción de UMass con sujetos de investigación no familiarizados con el idioma español utilizado en los letreros, para estudiar el impacto que la señalización puede tener para los turistas que no están completamente familiarizados con el ambiente del sistema vial. Se observó que los conductores no familiarizados tenían mayor precaución y reducían la velocidad en presencia de peatones en la zona escolar, pero la reducción en la velocidad promedio (en el 33% de los casos) no fue tan alta como en el caso de los conductores familiarizados con la vía (Valdés et al, 2019c). Este tema se estudió también en forma colaborativa con el equipo de investigación de UCF que llevó a cabo un estudio de microsimulación de varias alternativas de señalización. Como resultado obtuvieron que una estrategia de reducción de la velocidad rotulada en dos pasos (“two-step”) fue la de mejores resultados (Rahman, et al, 2019). Esta estrategia se estudió en el simulador de conducción del RUM a la par con otras estrategias adicionales. Se encontraron resultados similares para las estrategias de reducción en dos pasos y letreros elevados con luces intermitentes. Además, se encontró que estas estrategias se pueden suplementar con sistemas automatizados de asistencia a los conductores (ADAS) como un sistema de monitoreo de la velocidad mediante un dispositivo dentro del vehículo que le indica al conductor que está guiando a exceso de velocidad (Valdés, et al, 2020b).

Como parte de los estudios en los alrededores de zonas escolares, se llevó a cabo un estudio para evaluar el impacto de ubicar un letrero elevado sobre la carretera con luces intermitentes para anunciar que en el segmento los peatones cruzan a la mitad del bloque sin tener paso peatonal demarcado (Figueroa-Medina, et al, 2020). Este estudio permitió desarrollar un procedimiento de análisis innovador en el que simultáneamente se representan gráficamente las trayectorias del conductor y el peatón que cruza la carretera en frente de él (coordenadas X, Y) según se muestra en la Figura 7. El vehículo avanza de derecha a izquierda y el peatón del borde derecho de la carretera hacia la mediana. La línea que representa al vehículo, muestra segunda a segundo (del seg. 1 al seg.10) la trayectoria a lo largo de una vía de tres carriles por dirección transitando por el carril central hasta el segundo ocho (8) cuando se encuentra con el peatón y cambia de carril luego de haber reducido su velocidad. El perfil de velocidad se representa por la línea continua que hace referencia al eje de la derecha de la figura. Además, el conductor hace una maniobra evasiva cambiando su posición hacia el carril de la derecha. Esta representación gráfica hace evidente en forma simultánea la reacción del conductor mediante una maniobra evasiva y reducción de velocidad. Haciendo un análisis del comportamiento de todos los conductores y todos los escenarios de simulación del estudio, se encontró evidencia que indica que la mayoría de los conductores ajustaron su comportamiento reduciendo la velocidad en lugar de evadir el peatón. Además, se encontró que el letrero elevado con luces intermitentes anunciando la presencia de peatones cruzando la vía tuvo un efecto positivo en la disminución de la velocidad promedio.

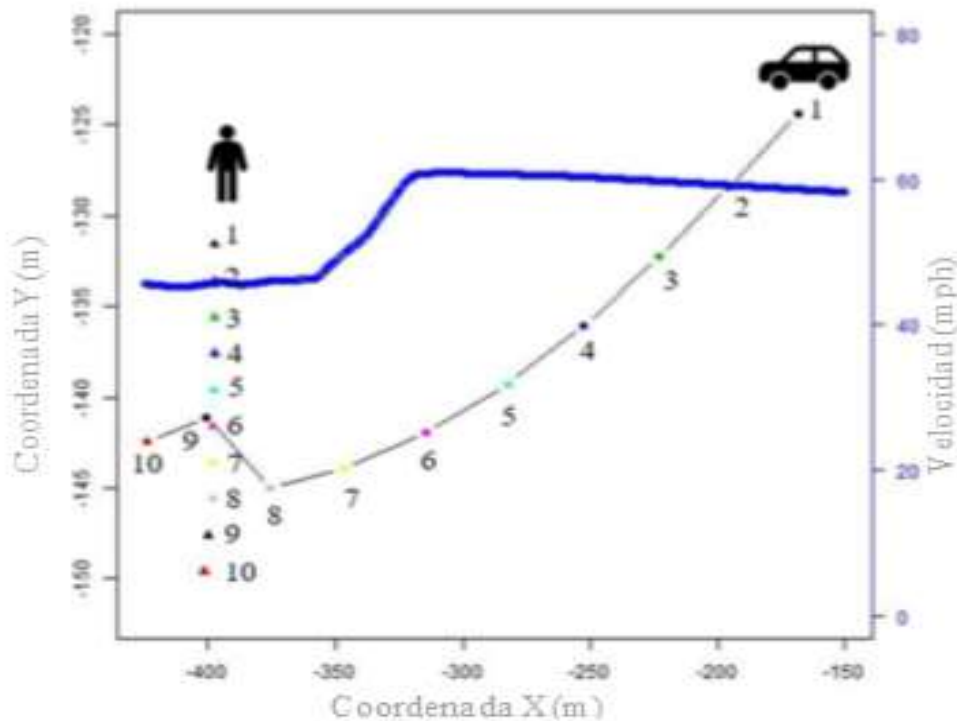


Figura 7: Posición relativa del peatón y el vehículo en un cruce peatonal no señalizado a mitad del bloque

El simulador de conducción también ha sido empleado para generar estrategias de adiestramiento a conductores antes de implementar soluciones innovadoras para que se familiaricen con ellas antes de ser construidas. Se llevó a cabo un estudio para identificar estrategias de entrenamiento de la operación de un carril de giro hacia las dos direcciones en el centro de la vía (“Two Way Left Turn Lane o TWLTL”) [(García et al., 2017)]. Además, en otro trabajo se desarrolló un módulo interactivo para adiestrar a estudiantes de ingeniería acerca de las características de las zonas de construcción en autopistas y la forma correcta de circulación en ellas. (Valdés et al, 2020). En otra investigación, luego de generar una metodología para incorporar el uso del simulador de conducción para el diseño de una intersección innovadora de diamante divergente (DDI), se ha desarrollado un estudio para que el simulador sirva para conocer el comportamiento de los usuarios la primera vez que utilizan este tipo de intersección y una estrategia de adiestramiento para que usuarios potenciales identifiquen la forma correcta de circular en un DDI.

Además del simulador de conducción, el equipo de investigación de SAFER-SIM del RUM utiliza la realidad virtual (VR) para llevar a cabo proyectos de simulación en donde se evalúa el comportamiento de los peatones de diferentes grupos de edad y género en un contexto urbano. La Figura 8 presenta el equipo HTC-Vive que se utiliza en estos proyectos para que el sujeto de investigación pueda ver en forma virtual diferentes escenarios de simulación. La información recopilada se analiza con el fin de generar estrategias que permitan mejorar la seguridad de los peatones. La Figura 9 presenta un ejemplo del ambiente virtual que observa el sujeto de investigación en una vía urbana de un carril. En uno de los proyectos con el simulador de realidad virtual se estudió el comportamiento de los peatones, las características de aceptación de brechas y la velocidad de caminata al cruzar una vía de un carril o una vía de dos carriles (Figueroa, et al, 2020). Además, se observó si los peatones alcanzaban a cruzar sin ser chocados por los vehículos virtuales o no. Esta característica se definió como cruce exitoso o no. Se representaron escenarios con dos velocidades de los vehículos, 15 mph y 25 mph, y valores de brechas entre vehículos, fija de 3 seg., fija de 5 seg., aleatoria entre 2 y 5 seg., y aleatoria entre 2 y 8 seg. Los resultados de este estudio indican que dos grupos de edad de mujeres entre 18 y 25 años y entre 46 y 65 años, presentaron velocidades de caminata superiores a 6 pies/seg. Los demás grupos de edad tanto de hombres como mujeres tuvieron velocidades de caminata de 3 a 5 pies/seg. Esto ocurrió tanto en los cruces de un carril como en los de dos carriles. En la mayoría de los casos, los peatones cruzaron en forma

exitosa las vías. Sin embargo, un caso crítico correspondió a la situación de velocidades de 25 mph y brechas de 3 segundos. En esta situación, un 20.3 % de los cruces no fueron exitosos. Esta línea de investigación continúa explorando el uso de tecnologías de comunicación entre vehículos y peatones para comunicar a los peatones cuando hay una brecha segura para cruzar en forma exitosa.



Figura 8: Equipo HTC-Vive usado para el simulador de realidad virtual del RUM.

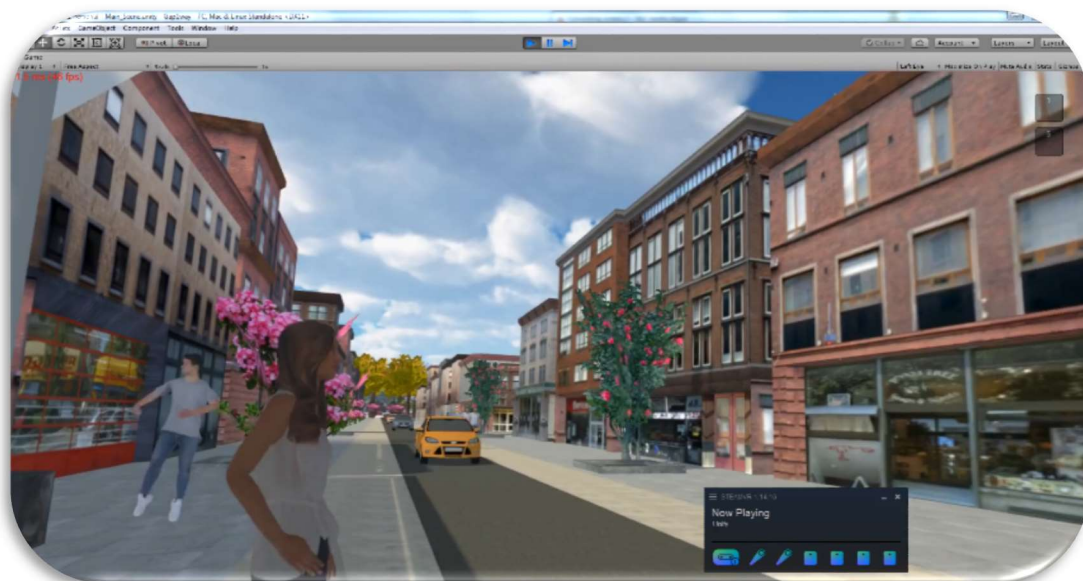


Figura 9: Imagen del simulador virtual en el escenario de cruce de peatones.

Además de los estudios mencionados, se está utilizando el simulador de conducción para estudiar el comportamiento de los conductores bajo los efectos del alcohol y determinar si es realmente seguro conducir con niveles de alcohol en sangre de hasta 0.08%. Luego de haber realizado un estudio preliminar para ratificar el uso de las ecuaciones típicas para identificar cómo aumenta el nivel de alcohol en sangre con diferentes combinaciones de consumo de alcohol, estos resultados se aplicarán para discernir la cantidad de alcohol requerida para que los sujetos de investigación con el simulador alcancen los niveles para los que se van a realizar las pruebas que corresponden al 0.05% y 0.08% de alcohol en sangre.

Los resultados de las investigaciones realizadas con los simuladores de la UPRM se han presentado en diversos foros a nivel nacional e internacional. Los resultados están disponibles a través de la página de internet de SAFER-SIM y además, se han presentado a las agencias a cargo de la operación de los sistemas que se han estudiado para generar cambios positivos en los sistemas que redunden en mejoras a la seguridad vial.

INICIATIVAS INNOVADORAS DE EDC Y STIC EN PUERTO RICO

El Centro de Transferencia de Tecnología en Transportación de Puerto Rico (T²), adscrito a la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez, provee adiestramiento y capacitación en todo lo relacionado a la infraestructura de transportación con énfasis a la seguridad a través de la iniciativa Cada Día Cuenta (EDC) de la Administración Federal de Carreteras del Departamento de Transportación de los Estados Unidos. El Centro, además, es miembro del Concilio de Innovación en el Transporte a nivel Estatal, denominado STIC por sus siglas en inglés. En la Figura 10, se muestran los cuatro pilares de EDC, a saber, Innovación, Ingenio, Invención e Imaginación, y su relación al Concilio de Innovación en la Transportación a Nivel Estatal.

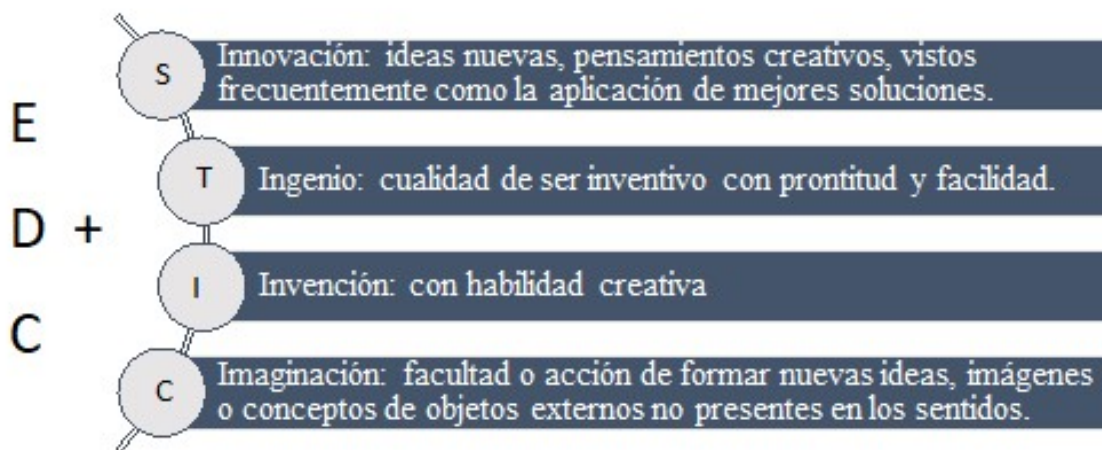


Figura 10: Pilares de la Iniciativa Cada Día Cuenta (EDC) y el Concilio de Innovación en el Transporte a nivel Estatal (STIC).

El Centro, mediante contrato suscrito con la Autoridad de Carreteras y Transportación (ACT) del Departamento de Transportación y Obras Públicas de Puerto Rico (DTOP), está a cargo de la coordinación, supervisión técnica y capacitación en las estrategias de EDC que el Gobierno de Puerto Rico está considerando su implantación plena. Las estrategias de EDC que selecciona el Gobierno de Puerto Rico a través de ACT, desde el 2011 fueron seleccionadas en una de las siguientes tres etapas: desarrollo, demostración o implantación.

El modelo EDC-FHWA se coordina con las agencias de transportación estatal, local y con las partes interesadas de la industria para identificar una serie de innovaciones a ser adoptadas cada dos (2) años. Los beneficios principales al implantar estas innovaciones relacionadas a la transportación en Puerto Rico son ahorro de tiempo, dinero y recursos a los Departamentos de Transporte que pueden ser utilizados para acelerar la entrega de más proyectos a través de todo Puerto Rico.

A continuación, se presentan innovaciones representativas de EDC que se han implantado con éxito en Puerto Rico durante los últimos diez (10) años. Estas historias exitosas de la implantación de EDC en Puerto Rico han sido documentadas a nivel latinoamericano en la Revista LACCEI Innovación (Colucci, et al 2020), la Revista bilingüe El Puente y disponible a través de www.prltap.org (Colucci, et al 2011); (El Puente, 2012).

HISTORIAS DE IMPACTO Y ÉXITO DE INICIATIVAS SELECCIONADAS DE EDC Y STIC

Asfalto de mezcla tibia, WMA, (EDC Ronda 1): La tecnología del asfalto de mezcla tibia (WMA) reduce la temperatura necesaria para este proceso. En Puerto Rico, la preservación y el mantenimiento de la superficie del pavimento es importante en términos de seguridad y manejabilidad. La ACT anualmente desarrolla proyectos de rehabilitación de pavimentos y WMA es uno de los procedimientos aceptados. Esta mezcla facilita la compactación; se puede lograr un ahorro de costos al reducir el tiempo y la mano de obra dedicados a su compactación. Además, la menor temperatura de la WMA permite distancias más largas durante el acarreo reduciendo la exposición a emisiones derivadas de combustible, humos y olores.



Figura 11: Observación de mezclas asfálticas producidas en Puerto Rico (a) mezcla asfáltica caliente (HMA) vs. (b) mezcla asfáltica tibia (WMA).

Manejo Nacional de Incidentes (TIM) entrenamiento a los respondedores (EDC Ronda 2): Cada Estado o territorio evalúa sus estrategias en cuanto a la forma de responder de manera oportuna y con eficacia a los incidentes viales para evitar choques secundarios, reducir la congestión y eliminar los peligros en el sistema de carreteras. Con el fin de ayudar a los Estados y sus territorios en esta misión, la FHWA ofreció los primeros programas nacionales de entrenamiento de respuesta TIM en Puerto Rico y las Islas Vírgenes Estadounidenses en junio de 2013 [9]. Este programa de entrenamiento ayudó a los DOT y a los primeros respondedores a enfocarse en la seguridad, la rápida autorización y a mejorar la comunicación en las escenas de incidentes de tráfico. Un segundo programa de entrenamiento para respondedores del TIM se llevó a cabo en Puerto Rico en marzo de 2016.

Estos programas de capacitación del TIM eran esencialmente cursos de formación de instructores con el objetivo de proporcionar las herramientas de gestión de incidentes necesarias a todos los equipos de primera respuesta en Puerto Rico y las Islas Vírgenes Estadounidenses. Hasta diciembre de 2019, más de 8,000 (65%) primeros respondedores han sido entrenados con el Curso Nacional de Respuesta TIM [1]. El Centro de Administración de Transporte de Puerto Rico (TMC) inaugurado en el otoño de 2019 [10], mejoró la respuesta del TIM. El TMC con patrullas de seguridad en las carreteras y Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) en los corredores primarios del Sistema Nacional de Carreteras (NHS) ayudará a crear conciencia y promover una cultura de seguridad con tecnología innovadora para detectar incidentes de tráfico y tomar medidas en tiempo real con la ayuda de los primeros respondedores para salvar vidas.

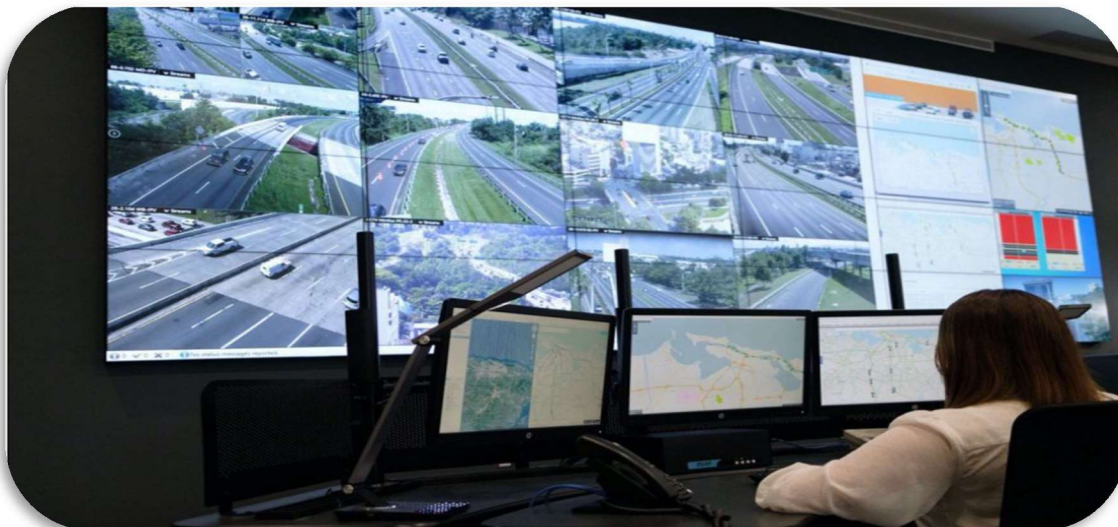


Figura 12: Centro de Manejo de Tránsito de Puerto Rico.

Construcción Acelerada de Puentes, ABC (EDC Ronda 2): La construcción y rehabilitación de puentes se asocia en muchos casos a retrasos en la operación del tráfico en el sistema de carreteras, dependiendo del alcance de los trabajos y de la ubicación. La Construcción Acelerada de Puentes (ABC por sus siglas en inglés) es una innovación de la EDC que reduce el tiempo de construcción y el costo de los proyectos del DOT [7]. El Suelo Reforzado Geosintético (GRS) es una tecnología ABC que proporciona estructuras de bajo costo, fuertes y duraderas. Estas nuevas estructuras pueden ser construidas en semanas en lugar de meses debido a la facilidad de construcción y al uso de materiales y equipos fácilmente disponibles. Los puentes 1121 y 1122 en el Municipio de Yauco fueron construidos con la tecnología GRS [6]. Otra tecnología ABC es la de Elementos y Sistemas Prefabricados de Puentes (PBES). Los PBES son componentes de puentes fuera del sitio y luego traídos al lugar del proyecto, listos para ser erigidos. Los resultados con PBES son la seguridad de los trabajadores, menos retrasos en el tráfico y puentes duraderos. En Puerto Rico, un par de puentes en la PR-29 (arteria principal del Municipio de Bayamón) son rehabilitados con esta tecnología [6].



Figura 13: El Suelo Reforzado Geosintético (GRS) completado en los puentes 1121 y 1122 en la carretera PR-2 en Yauco, Puerto Rico.

Transportación segura para cada peatón, STEP (EDC Ronda 5): En Puerto Rico, la seguridad en las vías es una prioridad máxima. Según los datos de choques fatales y el Plan Estratégico de Seguridad Vial de Puerto Rico (SHSP), aproximadamente el 30% de las muertes en las carreteras son peatones. Es importante desarrollar estrategias orientadas a promover un cruce seguro de las carreteras, especialmente en las ubicaciones de los bloqueos intermedios. STEP es una serie de tecnologías que mejorarán la seguridad de los peatones cuando se utilicen en el contexto vial apropiado [1]. La ACT desarrolló la capacitación de STEP con el apoyo de la T² durante diciembre de 2019 con la participación de profesionales del transporte estatal, local y privado. Ejemplos de contramedidas exitosas de STEP que se han implementado en Puerto Rico incluyen mejoras de visibilidad en los cruces peatonales, cruces peatonales elevados y balizas híbridas para peatones.

Agrupación de proyectos (EDC Ronda 5): Desde 2017, Puerto Rico había sufrido el impacto de fenómenos naturales extremos como los huracanes Irma y María, un huracán de categoría 5, inundaciones repentinas, erosiones costeras, más de 70,000 deslizamientos de tierra, un gran terremoto de magnitud 6.4 en la escala de Richter y más de 3,000 réplicas que afectaron negativamente al estado de las carreteras y puentes, el borde de las carreteras y todos sus componentes. Para restablecer el sistema de carreteras a una condición previa y normal, es necesario el desarrollo e implementación de un Programa de Ayuda de Emergencia (ER). Este Programa de ER incluye los sistemas de semáforos, señales de tráfico, puentes, derrumbes y proyectos de caída de rocas [1]. Para mejorar la racionalización de la entrega de proyectos, así como los beneficios de los métodos de contratación alternativos y tradicionales, la ACT tiene un acuerdo con la División de Carreteras Federales del Este para preparar contratos de agrupación de proyectos de ER. La ACT espera que esta innovación les ayude a agilizar la entrega de proyectos, reducir los costos y mejorar la eficiencia de los contratos durante el proceso.

CONCLUSIONES

Este artículo presenta una visión panorámica de la relevancia de los sistemas de infraestructura de transporte a nivel internacional en el movimiento efectivo, eficiente, seguro y sostenible de todos los usuarios y como contribuye significativamente al desarrollo económico de las ciudades y países para presentes y futuras generaciones. Las herramientas innovadoras que se describieron del programa Cada Día Cuenta, SAFER-SIM y NICR, y la transferencia de conocimiento oportuna de estos hallazgos es vital para salvar vidas, fortalecer el sistema para que sea más eficiente y sostenible, adaptándolo a las nuevas realidades de cambio climático y la nueva norma a raíz del COVID-19. Las investigaciones documentadas en este artículo relacionadas al uso de simuladores de conducción, realidad virtual y sistemas aéreos no tripulados contribuyen al estado del arte conociendo mejor el comportamiento humano en el sistema de transporte existente y proveyendo recomendaciones para mejorar dichos sistemas para que sean más eficientes y seguros, para el beneficio de presentes y futuras generaciones.

La transferencia de conocimiento de estas iniciativas innovadoras en el ámbito presencial y virtual, a través de centros de adiestramiento y capacitación en cada país y región, es vital en la próxima década en la transición a la automatización plena de los vehículos autónomos y comerciales para salvar vidas y mejorar la eficiencia de la infraestructura construida. El uso de materiales reciclables, nuevos diseños geométricos tales como el DDI, rotondas, reconfiguraciones geométricas, reducción a nivel internacional el límite de velocidad en zonas urbanas, reducción en la congestión y métodos alternos de transporte, deben basarse en investigaciones que reconozcan la variabilidad del entorno y los usos, costumbres y diversidad de los usuarios, y la equidad de todos estos sistemas es fundamental para alcanzar el balance de movilidad, accesibilidad y equidad de manera sostenible, resiliente y seguro.

PRÓXIMOS PASOS

Es imperativo en el área de la transportación que las investigaciones incorporen análisis profundos considerando la pertinencia de un desarrollo sostenible, seguro, eficiente y resiliente. Las herramientas innovadoras como el simulador de conducción, la realidad virtual, el uso de drones y otras iniciativas presentadas en el Programa Cada Día Cuenta, son vitales para poder alcanzar un diseño balanceado para atender las necesidades de presentes y futuras generaciones de peatones y usuarios de transporte a nivel local, nacional e internacional. Todos unidos debemos elevar la conciencia para movernos a una cultura de seguridad vial y sostenible para el bien de la humanidad.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen el apoyo del Departamento de Ingeniería civil y agrimensura del RUM de la UPR, de la ACT y la FHWA y del Departamento de Transportación Federal, por auspiciar estos trabajos de investigación. Además, agradecemos el apoyo de los estudiantes subgraduados y graduados que colaboran en estas investigaciones y el apoyo incondicional del Centro de Transferencia de Tecnología en Transportación (PRLTAP-T²) y el Centro de Investigación de Infraestructura Civil (UPRM).

REFERENCIAS

- ASCE. 2017. *2017 Infrastructure Report Card*. American Society of Civil Engineers, disponible en <https://www.infrastructurereportcard.org/>.
- Bureau of Transportation Statistics. 2020. *Transportation Economic Trends*. U.S. Department of Transportation, disponible en www.bts.gov/product/transportation-economic-trends.
- Cambridge Systematics, Inc. y Texas Transportation Institute. 2005. *Traffic Congestion and Reliability: Trends and Advanced Strategies for Congestion Mitigation*. Federal Highway Administration.
- Erhardt, G., Roy, S., Cooper, D., Sana, B. Chen, M. y J. Castiglione. 2019. *Do Transportation Network Companies Decrease or Increase Congestion?* Sciences Advances, Volume 5 No. 5.
- IEA. 2020. *Global EV Outlook: Entering the Decade of Electric Drive?* International Energy Agency.
- Reed, T. 2020. *2019 Global Traffic Scorecard*. INRIX Research..
- NACTO. 2018. *Shared Micromobility in the U.S.* National Association of City Transportation Officials.
- NCPWI. 1988. *Fragile Foundations: A Report on America's Public Works*. National Council on Public Works Improvements.
- Schrank, D., Eisele, B. y T. Lomax. 2019. *2019 Urban Mobility Report*. Texas A&M Transportation Institute.
- Tinnoy, A., Tonnesen, A. y F. Gundersen. 2019. *Effects of Urban Road Capacity Expansion – Experiences from Two Norwegian Cases*. Transportation Research Part D: Transport and Environment. Volume 69, pp. 90-106.
- TRB. 2019. *Critical Issues in Transportation 2019: Policy Snapshot*. Transportation Research Board.
- WHO. 2018. *Global Status Report on Road Safety 2018*. World Health Organization.
- Wagner, I. 2019. *Urban Passenger Mobility Demand Worldwide 2050*. Statista, disponible en <https://www.statista.com/statistics/1013579/urban-passenger-mobility-demand-worldwide/>.
- AASHTO. 2018. *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, 7ª Edición
- Boonsiripant, S. 2009. *Speed Profile Variation as a Surrogate Measure of Road Safety Based on GPS-Equipped Vehicle Data*. Disertación, Georgia Tech, Atlanta, Georgia.
- Colón-Torres, E., García-Rosario R., Rojas, M., Valdés, D., Figueroa, M., Colucci, B. 2020. *Performance Evaluation of Speed Reduction Compliance Strategies in School Zones*. Transportation Research Board 99th Annual Meeting, Washington, D.C.
- Colucci, B. 2015. *Dynamic Toll Lane: A Success Story as Part of the Public Private Partnerships in the Commonwealth of Puerto Rico*. Proceedings of the 2nd International Conference on Public-Private Partnerships. Austin, Texas.
- FHWA. 2012. *Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD)*

- Figuroa-Medina, A., Valdés, D., Colucci, B., Rojas, M., Bustillo, A., Cardona, N. 2020. *Simulation-Based analysis of Driver Performance when Facing Pedestrian Crossings at Uncontrolled Locations*. Transportation Research Board 99th Annual Meeting. Washington, D.C.
- Figuroa, A., Valdés, D., Colucci, B., Cardona, N., Bustillo, A., Chamorro, A. 2020b. *Study of Gap Acceptance and Walking Speeds of Pedestrians Using Virtual Reality Simulation*. Final Report. SAFER-SIM UTC.
- García R., Valdés, D., and Figuroa, A. 2019. *Evaluation of the Effectiveness on the Implementation of a Two-Way Left Turn Lane with Educational Material in PR-107 Using a Driving Simulator*. Transportation Research Board 98th Annual Meeting. Washington, D.C.,
- National Highway Safety Administration (NHTSA). 2020. *Human Factors*. U.S. Department of Transportation, disponible en www.nhtsa.gov/research-data/human-factors.
- Rahman, M. H., M. Abdel-Aty, J. Lee, and M. S. Rahman. 2019. *Enhancing Traffic Safety at School Zones by Operation and Engineering Countermeasures: A Microscopic Simulation Approach*. Simulation Modelling Practice and Theory. Vol. 94, 2019, pp. 334–348.
- Ruiz J., Colucci, B., Valdés, D., Ruiz, B. and Torres, W. 2018. *Evaluation of Roadway Geometrics and posted Speed Limits with Random Forest in the PR-22 Dynamic Toll Lane using a Driving Simulator*. 2018 International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics. Julio 2018.
- Ruiz, B., Valdés, D., Colucci, B., Ruiz J., Fisher D., García R., and Colón E.M. 2017. *Operational and Safety Analysis of Signage and Pavement Marking Treatments in Puerto Rico Dynamic Toll Lane Using a Driving Simulator*. Proceedings of the 8th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics. Los Angeles, CA, USA.
- Valdés D., Colucci B., Fisher D., Valdés J., Colón E.M., García R.E., and Rivera J.M. 2015. *Operational and Safety-Based Analysis of Toll Plaza Signage using Driving Simulation*. Road Safety and Simulation Conference 2015. Orlando, Florida.
- Valdés, D., Colucci, B., Colón E., García R., Ruiz J., y Ruiz B. 2017. *Simuladores de Conducción como Herramienta de Investigación en la Seguridad Vial*. XII Congreso Colombiano de Transporte y Tránsito. Bogotá, Colombia.
- Valdés, D., Colucci, B., Knodler M., Fisher D., Ruiz B., Ruiz J., García R.E., Colón E.M., and Hajiseyedjavadi, F. 2017b. *A Comparative Analysis of Toll Plazas Safety Features in Puerto Rico and Massachusetts Using a Driving Simulator*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2663.
- Valdés, D., López-del-Puerto, C., Colucci, B., Figuroa, M., García R., Colón, E., Rojas, M. Taveras, Y. and Ramos, I. 2019a. *Assessing the Impact of Smartphone Usage While Driving in Highway Work Zones*. Transportation Research Board 98th Annual Meeting. Washington, D.C.
- Valdés, D., Lopez-del-Puerto, C., Colucci, B., Figuroa, A., García R., Colón, E., and Rojas, M. 2019b. *Comparative Analysis between Distracted Driving Texting Laws and Driver's Behavior in Construction Work Zones*. Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction. ASCE. Atlanta, GA.
- Valdés, D., Knodler M., Colucci, B., Figuroa A., Rojas, M., Colón E.M., Campbell, N., and Tainter, F. 2019c. *Speed Behavior in a Suburban School Zone: A Driving Simulation Study with Familiar and Unfamiliar Drivers from Puerto Rico and Massachusetts*. International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics.
- Valdés, D., López-del-Puerto, C., Colucci, B., Figuroa, A., Concepción, E., Taveras, Y. and Sierra C. 2020a. *Driver's Safety Assessment in Two-Lane Rural Road Work Zones*. Final Report. SAFER-SIM UTC.

Valdés, D., Colucci, B., Figueroa, A., Rojas, M., Taveras, Y. and Sierra C. 2020b. *Assessing a Two-Step Posted Speed Reduction as a Potential Countermeasure to Improve Safety in School Zones Using Driving Simulation*. Final Report. SAFER-SIM UTC.

Valdés, D., López-del-Puerto, C., Colucci, B., Figueroa, A., Sotomayor-Irizarry, R. 2020c. *Developing an Educational Module to Increase Engineering Students' Knowledge of Highway Work Zones and Temporary Traffic Control Plans*. American Society of Engineering Education Annual Meeting.

Colucci, B., *Making Every Day Counts in the Caribbean*, El Puente Newsletter, Puerto Rico Transportation Technology Transfer Center, Vol. 25, No. 3, 2011, p. 1.

Colucci, B., *Successful Stories in Training and Implementation of EDC Initiatives in Puerto Rico*, El Puente Newsletter, Puerto Rico Transportation Technology Transfer Center, Vol. 26, No. 1, 2012, pp. 1,3-5.

Colucci, B., Rivera, J.C., Franco, I., *Iniciativas Innovadoras en la Transportación en el Siglo XXI: Cada Día Cuenta (EDC) y Concilio de Innovación en el Transporte a nivel Estatal (STIC)*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions (LACCEI) Innovación, Julio 2020, pp.15-19.