

Analysis of the Impacts of Disruptions on Puerto Rico's Construction Material Supply Chain

Adrián Argente del Castillo Garrido, M.S.¹; Carla Lopez del Puerto, Ph.D.²

¹University of Puerto Rico - Mayagüez, Puerto Rico, adrian.argentedelcastillo@upr.edu,

²University of Puerto Rico - Mayagüez, Puerto Rico, carla.lopezdelpuerto@upr.edu

Abstract– *The availability, cost, regulatory framework, logistics, and storage of construction materials, as well as global circumstances, are critical factors in the planning and execution of construction projects. These key components of construction activity are especially relevant in island territories and coastal communities where access to raw materials is limited. This study analyzes the problem of scarcity and rising costs of construction materials in Puerto Rico. The present study examines the complexity of construction development in Puerto Rico by integrating specialized literature with semi-structured interviews with contractors operating in different segments of the sector and in various regions of the island. The interviews focused on these key aspects of construction activity. The results show that dependence on external supply chains, regulatory restrictions, market volatility, and logistical and storage limitations increases the construction sector's vulnerability to external factors and global events. This dependence creates bottlenecks that lead to delays, substantial changes in planning practices, and cost overruns. Therefore, advance planning, supplier diversification, and logistics strategies must ensure a balance between financial efficiency and supply security to strengthen the sector's resilience.*

Keywords-- *construction supply chain, construction material availability, construction cost escalation, construction logistics in insular regions, and global disruptive events.*

Análisis de los impactos de las interrupciones en la cadena de suministro de materiales de construcción en Puerto Rico

Mg. Adrián Argente del Castillo Garrido¹; Dra. Carla Lopez del Puerto²

¹Universidad de Puerto Rico - Mayagüez, Puerto Rico, adrian.argentedelcastillo@upr.edu,

²Universidad de Puerto Rico - Mayagüez, Puerto Rico, carla.lopezdelpuerto@upr.edu

Resumen— La disponibilidad, el costo, el marco regulatorio, la logística y el almacenamiento de los materiales de construcción, así como las situaciones globales son factores críticos en la planificación y ejecución de proyectos de construcción. Dichos componentes clave de la actividad constructiva cobran especial relevancia en territorios insulares y comunidades costeras, donde el acceso a materias primas es limitado. Este estudio analiza la problemática de la escasez y el encarecimiento de materiales de construcción en Puerto Rico. El presente estudio analiza la complejidad del desarrollo de obras en Puerto Rico mediante la integración de la literatura especializada con entrevistas semiestructuradas a contratistas que operan en distintos segmentos del sector y en diversas regiones de la isla. Las entrevistas se realizaron en torno a estos aspectos clave para la actividad constructiva. Los resultados muestran que la dependencia de cadenas de suministro externas, las restricciones regulatorias, la volatilidad del mercado y las limitaciones logísticas y de almacenamiento incrementan la vulnerabilidad del sector de la construcción frente a condicionantes externos y/o eventos de alcance global. Dicha dependencia genera cuellos de botella que generan retrasos, cambios sustanciales en las prácticas de planificación y sobrecostos. Por tanto, la planificación anticipada, la diversificación de proveedores y las estrategias logísticas deben garantizar el equilibrio entre la eficiencia financiera y la seguridad del suministro, a fin de consolidar la resiliencia del sector.

Palabras clave— cadena de suministro de la construcción, disponibilidad de materiales de construcción, aumento de los costos de materiales, logística en regiones insulares y eventos disruptivos globales.

I. INTRODUCCIÓN

Los materiales de construcción constituyen un elemento central en la planificación, logística y ejecución de cualquier proyecto constructivo. La disponibilidad de estos recursos no siempre está garantizada en la zona donde se desarrolla la obra, lo que obliga a una planificación cuidadosa que, en determinados contextos, va más allá de una simple limitación local [1], [2]. Existen regiones donde el acceso a materiales es estructuralmente reducido, ya sea por su localización geográfica, por restricciones económicas, por conflictos geopolíticos o por la ocurrencia de desastres naturales, como sucede con frecuencia en territorios insulares o de difícil accesibilidad.

Diversos estudios han demostrado que los flujos de materiales y la disponibilidad de inventarios están estrechamente vinculados a factores sociales, económicos, políticos y técnicos, influyendo directamente en el desempeño

del sector de la construcción [2]. La escasez de materiales no sólo impacta la logística de los proyectos, sino que genera retrasos y aumentos de costos asociados a la volatilidad de precios y a las disrupciones en la cadena de suministro, siendo identificada como uno de los principales factores de retraso en proyectos de construcción a nivel global [3].

La pandemia de COVID-19 evidenció con especial claridad la vulnerabilidad de estas cadenas de suministro, provocando un incremento significativo en los costos de los materiales de construcción y limitaciones en su disponibilidad a escala mundial [4], [5].

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo analizar la problemática de la escasez y el encarecimiento de materiales de construcción en territorios con acceso limitado a materias primas, tomando como caso de estudio a Puerto Rico. A partir de una revisión de literatura especializada y del análisis de experiencias prácticas del sector de la construcción en la isla, se busca establecer conexiones entre los desafíos globales identificados en estudios previos y las particularidades del contexto insular, con el fin de aportar una comprensión más profunda de los factores logísticos, económicos y regulatorios que condicionan la ejecución de proyectos constructivos en estas regiones.

II. METODOLOGÍA

La triangulación de información es una metodología fundamental en los estudios cualitativos, ya que permite fortalecer la validez de los hallazgos mediante la comparación de distintas fuentes de información [6]. En esta investigación, se ha realizado un ejercicio de análisis entre la revisión de literatura académica sobre los problemas en la cadena de suministro de materiales de construcción y los datos obtenidos basados en las experiencias de los contratistas en Puerto Rico entrevistados. Este análisis detallado busca identificar coincidencias, contrastes y conexiones que permitan profundizar en la comprensión de los desafíos logísticos, económicos y regulatorios del sector de la construcción en un contexto insular. Una limitación del estudio es el tamaño reducido de la muestra, la cual restringe la generalización de los resultados. El enfoque es un análisis profundo del caso estudiado. Para el estudio se buscaron contratistas en diferentes puntos de la isla, así como diferentes tipos de trabajos que incluyen contratistas tienen un desarrollo de la actividad más tradicional, contratistas que basan su actividad en el sector de infraestructuras como carreteras, puentes y otras estructuras

relacionadas con el sector y contratistas cuya actividad es la producción de prefabricados.

Partiendo de la revisión de la literatura, se definieron los principales puntos de análisis, los cuales se resumen en la Tabla I. Con el fin de llevar a cabo el estudio, se diseñó una entrevista que permitiera abarcar de manera integral todos los temas identificados en ambos grupos. Dada la naturaleza de la información que se necesita, que consiste en una mezcla de conocimientos del sector de la construcción por parte del contratista, así como experiencias vividas en diferentes circunstancias, tanto ordinarias como excepcionales, se realizaron entrevistas basadas en preguntas estructuradas relacionadas a los temas expuestos anteriormente, pero siempre abierto a la espontaneidad por parte tanto del participante como del investigador para aquellos temas que puedan surgir en el transcurso de la conversación. La entrevista se conformó de un total de 21 preguntas estructuradas en 5 secciones para poder conducir de una manera más eficiente la entrevista y obtener la mejor información. Además, antes de llevar a cabo el proceso de entrevistas, el cuestionario fue sometido a revisión y aprobado por el IRB. Se contó finalmente con la participación de seis contratistas, aunque uno quedó descartado del estudio.

Para la obtención de la información, se emplearon notas de campo y la grabación en audio de las entrevistas (previo consentimiento de los participantes). Posteriormente, la información fue analizada mediante el programa NVivo.

TABLA I
 RESUMEN DE TEMAS PROPUESTOS A TRATAR EN LA ENCUESTA.

Grupo 1	Grupo 2
Disponibilidad de stock	Logística y planificación
Origen de los materiales	Factores gubernamentales
Calidad de los materiales	Órdenes de cambio
Mercado variable	Planificación antes de obra
Materiales especiales	Planificación durante la construcción
	Problemas en la cadena de suministro por factores externos

III. ANÁLISIS COMPARATIVO DE HALLAZGOS DE LAS EXPERIENCIAS PRÁCTICAS CONSTRUCTIVAS EN PUERTO RICO

Con los datos de las entrevistas, de las experiencias que los contratistas experimentan durante la práctica de la profesión en Puerto Rico se pueden realizar conexiones directas entre las mismas con diferentes experiencias recogidas en la literatura que se han podido analizar en el extranjero. Este análisis pretende contrastar e incluso complementar en la comprensión de las experiencias que los distintos casos han descrito que se enfrentan en el sector de la construcción a nivel de Puerto Rico. Tras analizar los datos obtenidos en cada una de las entrevistas, se pudo identificar unos temas recurrentes que son destacables, que conectan los temas que se tomaron en cuenta en la entrevista. La figura 1 muestra cómo se relacionan estos temas con los temas principales.

El enfoque del estudio centra en 5 temas principales que se resumen en:

1. Disponibilidad de materiales.
2. Aumento de costos.
3. Barreras regulatorias.
4. Logística y almacenamiento.
5. Efectos de eventos disruptivos globales.

Al establecer conexiones entre la literatura y las experiencias relatadas por los contratistas se validan las observaciones para construir un marco de entendimiento sobre la situación local respecto a las experiencias globales que permitan profundizar en la comprensión de los desafíos logísticos, económicos y regulatorios del sector de la construcción en un contexto en Puerto Rico. En contextos altamente dependientes de la importación, como Puerto Rico, estos efectos se vieron amplificados por la concentración del comercio exterior en un único punto de entrada y por la reducción temporal del movimiento de carga durante los periodos más críticos de la crisis sanitaria. A ello se suma la dependencia estructural de materiales clave como el acero, mayoritariamente importado, y del concreto, cuya producción local requiere materias primas externas.



Figura 1 Temas de enfoque del estudio

1. Experiencias relacionadas con la escasez y disponibilidad de materiales de construcción en Puerto Rico.

La escasez de materiales y la disponibilidad es uno de los temas más recurrentes[3] que se encuentran tanto en la literatura como en la información recolectada de las entrevistas realizadas. Estudios como los realizados por Rahman et al. [1] y Hwang et al.[7], presentan la dependencia de materiales importados y las limitaciones geográficas en el incremento de la vulnerabilidad de regiones insulares o con limitaciones de accesibilidad. Los distintos contratistas centran su actividad en Puerto Rico, lo cual puede darnos una visión que se puede asemejar a la expresada en la literatura debido a la situación geográfica de la isla. Como destacan Augiseau y Barles [2] , el flujo y provision de materiales de construcción en territorios con dependencia a la importación están íntimamente ligados a factores logísticos y económicos.

Los dos principales materiales utilizados en las actividades que desarrollan los entrevistados son el hormigón y el acero. En conjunto, las entrevistas confirman que la disponibilidad en

Puerto Rico depende de (1) la capilaridad local (concreteras/canteras cercanas), (2) la exposición a cadenas externas (acero y ciertos insumos), (3) restricciones regulatorias de contenido nacional y (4) la capacidad de anticipación (inventarios y compras en volumen). Impactos externos recientes amplificaron plazos y precios, obligando a rediseñar logística y finanzas de obra para sostener la producción como destacan Arneson et al [8], [9], donde se indica que la resiliencia tras un desastre depende principalmente de la disponibilidad preexistente de materiales y de la coordinación de la cadena de suministro.

De la información obtenida se confirma un esquema mixto: para partidas pequeñas se recurre a mezcla in situ con sacos de cemento, arena y gravilla; para volúmenes mayores, al premezclado de planta. Además, se advierte la necesidad de planificar bien los pedidos para evitar recargos por cargas parciales.

2. *Experiencias relacionadas con el aumento del costo de materiales de construcción en Puerto Rico*

Uno de los temas principales que trataron todos los entrevistados fue el costo de los materiales. Tanto en la literatura como en las propias entrevistas, se marca la importancia que tienen los costos dentro de la industria de la construcción. Rešetar et al.[10] documentan un incremento sostenido de los índices de precios de materiales de construcción a partir de 2017, lo cual coincide con lo expresado durante las entrevistas, en las que todos los contratistas coinciden en que los costos de materiales aumentaron de forma marcada tras 2017–2021, con picos durante y después de la pandemia. En la referencia [11] se estudia la fluctuación del precio de los materiales de construcción. En este artículo se comenta que materiales como el acero suelen ser más estables en el precio mientras el hormigón es más sensible a cambios. En las entrevistas se mencionan alzas “generalizadas en 2020–2021 y, en algunos casos, impactos acumulados mayores cuando se consideran costos integrados de actividades (material + instalación + logística) al igual que en el artículo donde se señala que la cadena de suministro es clave en el alza de los precios de los materiales. Se desprende que el alza de los precios se debió a varios factores mencionados por los entrevistados como:

- 1) Logística y plazos: tiempos de entrega se incrementaron significativamente en “long-lead items” (p. ej., postes) y fabricación de equipos especiales con plazos de entrega a veces cercanos a la duración del proyecto, empujando compras anticipadas y costos. Esta situación fue recogida por Rešetar et al. [10], quienes relacionan la demora en entregas y la dependencia de insumos importados con mayores costos finales de obra.

- 2) Condiciones comerciales: paso de compras a crédito a pagos por adelantado (down payments) para procesar órdenes. Esta situación afecta a la caja y, en la práctica, al costo total del abastecimiento y del trabajo como identifica Ikechukwu et al. [12], remarcando como causa directa del sobrecosto la escasez y los cambios de los términos de pago.
- 3) Mercados energéticos/globales: la guerra en Ucrania se percibe sobre todo vía alza del petróleo, transmitiéndose a fletes y producción. Aunque la guerra provocó alzas globales en los precios de la energía (coincidiendo con el registro de picos internacionales de los precios energéticos tras la invasión nombrado por Rešetar et al. [10] y alteraciones en rutas de comercio, no provocó a nivel local un impacto relevante en el mercado de la construcción en Puerto Rico.
- 4) Dinámica internacional del acero: se mencionan episodios de acaparamiento (p. ej., por China) que restringieron oferta y elevaron precios. Contratistas aluden a esta situación mencionando especialmente el acero, cuyos precios globales se dispararon tras tensiones geopolíticas y restricciones de exportación [10].

En resumen, las entrevistas muestran un aumento significativo en costos de materiales (hormigón, acero, asfalto y agregados), con magnitudes que varían por insumo y periodo: desde +25–30% en hormigón premezclado por yarda, hasta duplicaciones puntuales en acero y picos del 50% luego atenuados. A estos se suman recargos logísticos, cambios en términos de pago y costos energéticos, que elevan el costo total de construir incluso cuando el precio de lista del material empieza a estabilizarse, confirmando que la variación de costos por materiales continúa siendo una de las principales fuentes de riesgo en la industria como se señalan Zidane & Andersen [3].

3. *Experiencias relacionadas con regulaciones y normativas en Puerto Rico.*

La mayor parte de la actividad desarrollada por los entrevistados se financia con fondos federales, por lo que la adquisición de materiales queda sujeta a requisitos de contenido nacional conforme a las disposiciones federales sobre contenido estadounidense en proyectos de infraestructura [13]. Como se puede resumir de las entrevistas, el hormigón y el acero son los dos materiales principales utilizados para la actividad de obra por todas las compañías que componen este estudio. En la práctica, el acero (varilla y estructural) está regulado expresamente por legislaciones como Buy American Act / Buy America, AIS (American Iron and Steel) y BABA (Build America, Buy America Act) debe ser fabricado en EE.

UU., los agregados, por ejemplo, no enfrentan exigencias equivalentes. Para proyectos viales federales no se permite usar acero no fabricado en EE. UU, así varios contratistas confirman que, por norma, los componentes permanentes deben ser de procedencia estadounidense. Esto limita fuentes y condiciona plazos y compras (p. ej., a manufactureros como King Steel Corp. o Insteel Wire & Cable).

Más allá de materiales, se menciona que con la entrada de muchos fondos federales de reconstrucción tras el huracán y los terremotos, han venido también requisitos más estrictos en varios ámbitos. A partir de las entrevistas se identifica que en proyectos con dinero de agencias como FEMA (Federal Emergency Management Agency), las agencias hacen auditorías para verificar cumplimiento laboral. Teniendo que presentar las nóminas de todos los empleados. Los salarios han ido incrementándose gradualmente, lo cual ha provocado un encarecimiento de los procesos constructivos. Adicional a los materiales y el salario, existieron medidas que fueron tomadas durante la pandemia del Covid-19 que afectaron de manera directa a las distintas compañías. Se menciona que las medidas de confinamiento, cierres obligatorios y restricciones sanitarias impactaron la forma de operar de las empresas constructoras como también indican Ayat et al. [5] reportando efectos similares en la productividad y cumplimiento de obras durante la pandemia.

A partir de las experiencias narradas, el cumplimiento regulatorio se concentra en contenido nacional (acero) y en controles federales (auditorías/Salarios). Aunque existen flexibilidades limitadas (USMCA) esta situación provoca que las alternativas sean limitadas y tensiona el tiempo y los costos que pueden incrementarse sobre todo cuando se insinúa la ampliación del alcance regulatorio a más materiales. Se demuestra también, que el gobierno puede actuar para dar preferencia a algunos proyectos en concreto que tengan un carácter prioritario.

4. Experiencias relacionadas con logística y almacenamiento de materiales de construcción en Puerto Rico.

La logística en el sector de la construcción es un factor clave según los casos analizados en la literatura [14]. A partir de las experiencias de los entrevistados se denota que cada constructor mantiene una forma de organizar su volumen de negocio, en parte condicionado por la actividad principal que desempeñan y las circunstancias ocurridas. Desde la consideración de tener un almacenamiento considerable, hasta no tener almacenes, si no ir ordenando los materiales conforme se van desarrollando los proyectos. Las decisiones operativas de los contratistas están condicionadas por factores como la disponibilidad de materiales, los cambios de diseño y financiamiento, que contribuyen a retrasos y sobrecostos [12].

Las variaciones de precios entre materiales como cemento, grava y productos de concreto tienden a transmitirse dentro de la cadena de suministro, lo que refuerza la importancia de planificar las órdenes de compra y almacenamiento para minimizar costos ante posibles incrementos [11]. Una de las estrategias utilizadas por los contratistas para obtener mejores

precios en los productos es realizar ordenes de gran magnitud, de forma que el precio se pueda reducir levemente. Comprar en volumen brinda ventajas adicionales a mejores precios unitarios por compras de gran escala; en ocasiones se incluye el transporte al sitio sin costo adicional de los materiales, al lugar requerido por el contratista, debido a que el precio de los materiales depende, entre otros factores, del monto de la compra, del modo de aprovisionamiento y de los costes de la transportación [10]. Para aquellas actividades las cuales no lleva a cabo el contratista, como son la plomería o la electricidad, se recurre a subcontratar a otras compañías.

El inventario es otro punto importante que se mostró en todas las entrevistas. Se destaca que cada uno de los contratistas apuestan por diferentes modelos de almacenamiento, siendo esta elección condicionada principalmente por la actividad que desempeñan.

Uno de los puntos comunes de todos los entrevistados fue el impuesto de almacenamiento. Aunque algunos contratistas mencionan que cuenta con exenciones contributivas que mitigan el impacto de impuestos sobre almacenamiento (lo que les permite tener un mayor inventario en planta disponible con un menor costo a su producción). En el caso de otros entrevistados, no mencionan esta exención contributiva, indicando que el impuesto al almacenamiento es un factor clave para el desarrollo de su actividad y condiciona la logística de la empresa.

A partir de las entrevistas, quedó claro que la pandemia no solo alteró la disponibilidad de materiales, además obligó a las compañías reevaluar su forma de operar para sostener la continuidad de sus proyectos buscando todas las alternativas disponibles en el mercado. Se reconocen que los suplidores modificaron sus prácticas comerciales, imponiendo pagos adelantados en lugar del crédito tradicional y reduciendo inventarios debido al impuesto sobre almacenamiento, lo que repercute directamente en la agilidad para obtener recursos. En la literatura Ayat et al. [5] confirma esta tendencia, reflejando disrupciones en la cadena de suministro, aumentos de precios y una reconfiguración completa de las estrategias de compra. Debido a los mayores tiempos de entrega y al alza de costos, las empresas han tenido que ajustar la planificación, extender cronogramas de pedidos e incluso buscar alternativas más económicas fuera de la isla, aunque ello implique esperar entre tres y cuatro semanas adicionales. Por otro lado, algunas compañías decidieron anticiparse y asumir el riesgo económico de mantener inventarios amplios, realizando compras grandes para varios proyectos a la vez, aun cuando el impuesto sobre inventario afecta directamente el flujo de efectivo.

En resumen, la logística en Puerto Rico combina entrega directa a obra, inventarios mínimos (limitados por impuesto a inventario) y planificación fina de pedidos para evitar recargos y paros con grandes inventarios en función de la actividad que desarrolle el contratista. Tras los eventos ocurridos en estos años, cuando los plazos se extienden, algunas firmas se pre-abastecen y compran en volumen para asegurar continuidad, apoyándose en la capilaridad local (concreteras/canteras cercanas). La pandemia no solo puso a prueba la flexibilidad

logística, sino que expuso la fragilidad del abastecimiento local y obligó al sector a improvisar, planificar con mayor antelación y operar en un entorno donde el acceso a materiales ya no puede darse por garantizado.

5. *Experiencias relacionadas con eventos globales en Puerto Rico*

El análisis de las entrevistas evidencia que los eventos globales (en particular la pandemia, con la consecución de los cierres de fábricas y puertos, así como las disrupciones marítimas y energéticas) tuvieron una repercusión directa en la disponibilidad y el costo de los materiales de construcción en Puerto Rico. Basado en las experiencias de los contratistas, el impacto que cada compañía experimentó ante los eventos globales no fue uniforme; cada una presentó una situación particular, determinada por la naturaleza de los trabajos que desarrolla y su forma de operación. Algunos relataron encarecimiento de insumos y mayores plazos de entrega. Las diferencias entre empresas muestran que los factores globales no impactaron de la misma manera a todos, sino que su efecto dependió en gran medida de la relación con los proveedores y de las formas particulares en que cada contratista manejó su abastecimiento. Entre los eventos que mencionaron se encuentra la pandemia de Covid-19, los terremotos ocurridos en el área suroeste de PR en 2020, el huracán María y la guerra en Ucrania.

De todas las entrevistas realizadas, la pandemia de COVID-19 emergió como el evento con mayor impacto sobre la actividad del sector construcción, confirmando lo que la literatura ya advertía [4], [5]: interrupciones en la cadena de suministro, incrementos de los precios, escasez de materiales y equipos; que llevó en varios casos a una reconfiguración del funcionamiento de las empresas. Durante los confinamientos, las canteras y plantas de manufactura locales redujeron operaciones o incluso suspendieron las operaciones. Esta circunstancia obligó a buscar materiales en puntos distantes de la isla, aumentando significativamente los costos por transporte y extendiendo los plazos de entrega de semanas a meses. De forma paralela, la escasez global de productos provenientes de mercados como China elevó hasta en un 40-50% los precios de múltiples materiales.

Las afectaciones no se limitaron al flujo de materiales, ya que las medidas sanitarias transformaron la dinámica laboral, reduciendo el tamaño de cuadrillas, ralentizando el ritmo de obra. La imposición de pruebas semanales, la documentación constante ante agencias gubernamentales y la necesidad de subcontratar para mantener varios frentes operativos sin exponer a gran número de empleados fueron factores que se documentan según las experiencias compartidas. Algunos de los contratistas mitigaron el riesgo acumulando inventarios o adelantando compras masivas, aún a costa de afectar su flujo de efectivo. Otros, en cambio, apenas percibieron impactos iniciales debido a la caída temporal en la demanda, pero enfrentaron grandes retrasos para obtener maquinaria especializada, con tiempos de espera que se extendieron hasta

un año. Además, la pandemia en Puerto Rico llegó en un contexto de shocks sucesivos: huracanes, terremotos e interrupciones portuarias que saturaron a los suplidores ante una demanda extraordinaria, generando cuellos de botella adicionales. Incluso eventos internacionales como la guerra en Ucrania tuvieron efectos indirectos (p.ej. encareciendo el petróleo), aunque la dependencia de proveedores estadounidenses amortiguó parte del golpe. A diferencia de algunas industrias europeas que podrían estar fuertemente afectadas por la escasez de acero ucraniano o el alza del costo energético como Rešetar et al [10] mencionan, el principal impacto sobre el sector de la construcción fueron las interrupciones en el suministro de materiales de construcción, equipos y otros recursos necesarios para construir. La Tabla II resume diversos ejemplos de estrategias adoptadas según las experiencias descritas por los entrevistados

TABLA II
 EJEMPLOS DE RESPUESTAS EMPRESARIALES ANTE SHOCKS GLOBALES.

Estrategia aplicada	Cómo se implementa
Pre-abastecimiento	Compra de grandes volúmenes para cubrir plazos, pese al impacto del impuesto a inventario en el flujo de caja.
Pagos y ordenes anticipados	Se pasa de crédito a down payments y pedidos mucho antes de necesitarlos en obra para asegurar cupos/entregas.
Sourcing alternativo	Búsqueda de proveedores en otro país con menor congestión portuaria.
Ajuste de diseño	Sustitución de mallas por tamaños disponibles cuando faltan especificaciones exactas.
Compras centralizadas en emergencia	El gobierno actuó como comprador único (p. ej., puentes Acrow) para obtener prioridad de fabricación y envío y luego entregar al contratista.

Los eventos recientes, tanto globales como locales, las entrevistas confirman que los choques externos se tradujeron en cuellos de botella, plazos más largos y sobrecostos que obligaron a reorganizar la operación de las compañías. A pesar de esto el impacto no fue uniforme: mientras algunas empresas enfrentaron escasez de insumos, cierres de plantas/canteras y falta de diésel, mientras otras empresas, debido a la naturaleza de su trabajo atadas a proveedores en EE. UU. o con mayor capacidad de planificación. Operativamente, las compañías debieron adaptar cuadrillas y protocolos sanitarios, y reposicionar su logística mediante pedidos anticipados, compras en volumen y ajustes de diseño. La capacidad de anticiparse al mercado, diversificar y la planificación fueron claves para sostener la producción y cumplir con los objetivos. En suma, el periodo pandémico expuso la vulnerabilidad estructural del sector, elevó los costos, aumentó la

incertidumbre logística y obligó a las empresas a improvisar soluciones para sostener sus proyectos en marcha.

IV. CONCLUSIÓN

El análisis comparativo entre la literatura especializada y los resultados de las entrevistas que documentan las experiencias prácticas del sector de la construcción en Puerto Rico confirma que la disponibilidad de materiales en contextos insulares responde a una combinación de factores estructurales y coyunturales. La capilaridad local de concreteras y canteras, la dependencia de cadenas de suministro externas (especialmente para el acero y otros insumos importados), las restricciones regulatorias de contenido nacional y la capacidad de anticipación mediante inventarios y compras en volumen configuran un sistema de abastecimiento particularmente vulnerable a eventos disruptivos. Los impactos recientes amplificaron tanto los plazos de entrega como los precios, obligando a las empresas a rediseñar su logística y planificación financiera para sostener la continuidad de los proyectos.

En términos económicos, los resultados evidencian incrementos significativos en los costos de materiales clave como el hormigón, el acero, el asfalto y los agregados, con magnitudes variables según el periodo y el insumo considerado. A estos aumentos se suman recargos logísticos, cambios en las condiciones comerciales (como el paso a pagos adelantados) y el encarecimiento de la energía, factores que continúan elevando el costo total de construir incluso cuando los precios nominales comienzan a estabilizarse. De este modo, la variabilidad de los costos de materiales se consolida como una de las principales fuentes de riesgo para la ejecución de proyectos de construcción en Puerto Rico.

Desde el punto de vista regulatorio, el estudio muestra que el cumplimiento normativo, particularmente en proyectos financiados con fondos federales, condiciona de forma significativa las decisiones de compra y los plazos de ejecución. Los requisitos de contenido nacional para el acero, junto con los controles laborales y administrativos, reducen el margen de maniobra de las empresas y contribuyen al aumento de costos, especialmente ante la posibilidad de una ampliación del alcance regulatorio a otros materiales. No obstante, las experiencias analizadas también reflejan que la intervención gubernamental puede resultar determinante para priorizar proyectos estratégicos y aliviar cuellos de botella en situaciones críticas.

En cuanto a la logística y el almacenamiento, la práctica predominante en Puerto Rico se caracteriza por una combinación de entrega directa a obra, inventarios mínimos limitados por el impuesto al almacenamiento y una planificación detallada de los pedidos para evitar recargos y paralizaciones. Tras los eventos disruptivos recientes, algunas empresas optaron por preabastecerse y realizar compras en volumen para garantizar la continuidad operativa, aun asumiendo impactos negativos sobre su flujo de efectivo. Estas estrategias ponen de relieve la necesidad de equilibrar eficiencia financiera y resiliencia logística en un entorno marcado por la incertidumbre.

Finalmente, los resultados confirman que los eventos globales y locales —en particular la pandemia de COVID-19, junto con fenómenos naturales y interrupciones energéticas— actuaron como catalizadores de vulnerabilidades preexistentes en el sector. El impacto no fue uniforme entre las empresas, dependiendo en gran medida de su relación con los proveedores, su capacidad de planificación y su nivel de dependencia de cadenas externas. En conjunto, este estudio evidencia que la anticipación, la diversificación de fuentes y la planificación estratégica son elementos clave para sostener la producción en contextos insulares, y subraya la necesidad de fortalecer la resiliencia del sector de la construcción en Puerto Rico frente a futuros choques externos.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

This work is supported by the Coastal REsearch And Transportation Education (CREATE) Center and funded by the U.S. Department of Transportation Office of the Assistant Secretary for Research and Technology University Transportation Centers Program under Grant No.69A3552348330. The authors acknowledge the participants who contributed to this study by sharing their insights and experiences.

REFERENCIAS

- [1] M. M. Rahman, Y. H. Yap, N. R. Ramli, M. A. Dullah, and M. S. W. Shamsuddin, "Causes of shortage and delay in material supply: A preliminary study," in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Institute of Physics Publishing, Dec. 2017. doi: 10.1088/1757-899X/271/1/012037.
- [2] V. Augiseau and S. Barles, "Studying construction materials flows and stock: A review," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 123, pp. 153–164, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2016.09.002.
- [3] Y. J. T. Zidane and B. Andersen, "The top 10 universal delay factors in construction projects," *International Journal of Managing Projects in Business*, vol. 11, no. 3, pp. 650–672, May 2018, doi: 10.1108/IJMPB-05-2017-0052.
- [4] F. Sierra, "COVID-19: main challenges during construction stage," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 29, no. 4, pp. 1817–1834, Apr. 2022, doi: 10.1108/ECAM-09-2020-0719.
- [5] M. Ayat, Malikah, and C. W. Kang, "Effects of the COVID-19 pandemic on the construction sector: a systemized review," Mar. 14, 2023, Emerald Publishing. doi: 10.1108/ECAM-08-2021-0704.
- [6] G. Mills and L. Gay, "COMPETENCIES FOR ANALYSIS AND APPLICATIONS TWELFTH EDITION."
- [7] B. G. Hwang and L. P. Leong, "Comparison of schedule delay and causal factors between traditional and green construction projects," *Technological and Economic Development of Economy*, vol. 19, no. 2, pp. 310–330, 2013, doi: 10.3846/20294913.2013.798596.
- [8] E. Arneson, "Construction Capacity and Residential Roofing Reconstruction after Hurricanes in Texas and Puerto Rico," 2019.
- [9] E. Arneson, A. Javernick-Will, and M. Hallowell, "Construction Capacity: The Role of Regional Construction Supply Chain Resources in Post-Disaster Rebuilding," 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/308796405>
- [10] Z. Rešetar, N. P. Rešetar, and F. Lukić, "The impact of the increase in raw material prices on costs in the construction sector in the city of Osijek," in Conference proceedings: ICEMIT, Toplica Academy of Applied Studies, Department of Business Studies Blace, 2023, pp. 257–268. doi: 10.46793/ICEMIT23.257PR.
- [11] M. Abdul Nabi, I. H. El-Adaway, and R. H. Assaad, "Investigating Price Fluctuation Transmission among Construction Materials," in Construction Research Congress 2024, CRC 2024, American Society of Civil Engineers (ASCE), 2024, pp. 339–349. doi: 10.1061/9780784485286.035.

- [12]A. C. Ikechukwu, F. I. Emoh, and O. A. Kelvin, "Causes and Effects of Cost Overruns in Public Building Construction Projects Delivery, In Imo State, Nigeria," IOSR Journal of Business and Management, vol. 19, no. 07, pp. 13–20, Jul. 2017, doi: 10.9790/487x-1907021320.
- [13]"Effects of Buy America on Transportation Infrastructure and U.S . Manufacturing." [Online]. Available: <https://crsreports.congress.gov>
- [14]B. G. Hwang and L. P. Leong, "Comparison of schedule delay and causal factors between traditional and green construction projects," Technological and Economic Development of Economy, vol. 19, no. 2, pp. 310–330, 2013, doi: 10.3846/20294913.2013.798596.