

El Paradigma del Escalamiento: Evaluación de Sostenibilidad en Infraestructuras de Hormigón

Desmitificando las compensaciones ambientales y sociales entre estructuras In Situ y Prefabricadas. Un marco de decisión estratégico.

Diciembre 2026 | Basado en el Análisis de 50 Configuraciones Optimizadas

“

El Mito de la Construcción Sostenible

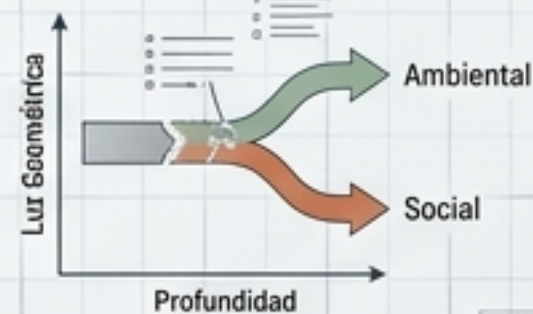
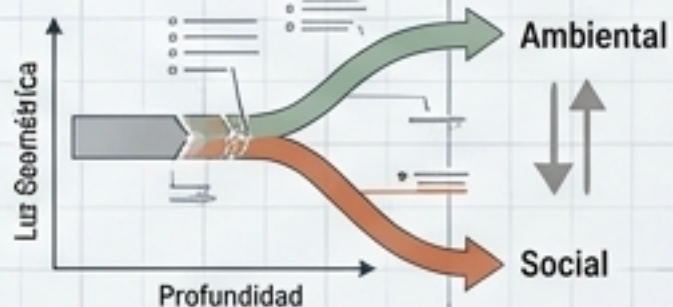
La prefabricación es siempre la opción indiscutible para la sostenibilidad de las infraestructuras.

El sesgo: Se asume que la eficiencia del material y el control industrial siempre superan a la construcción tradicional.

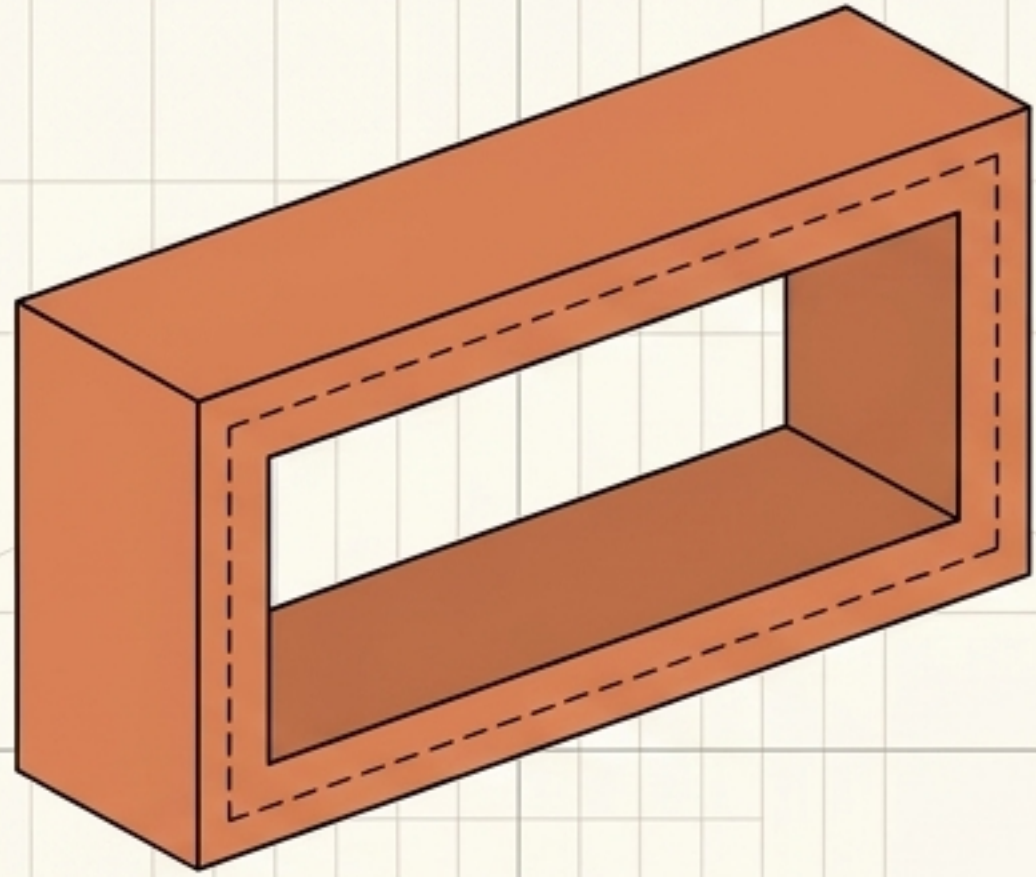
La Realidad del Escalamiento

La sostenibilidad no es un atributo estático; es una compensación dependiente de la escala.

El descubrimiento: A medida que aumentan la luz geométrica y la profundidad, el método ganador cambia drásticamente. Lo que beneficia al medio ambiente a gran escala puede penalizar gravemente la métrica social.

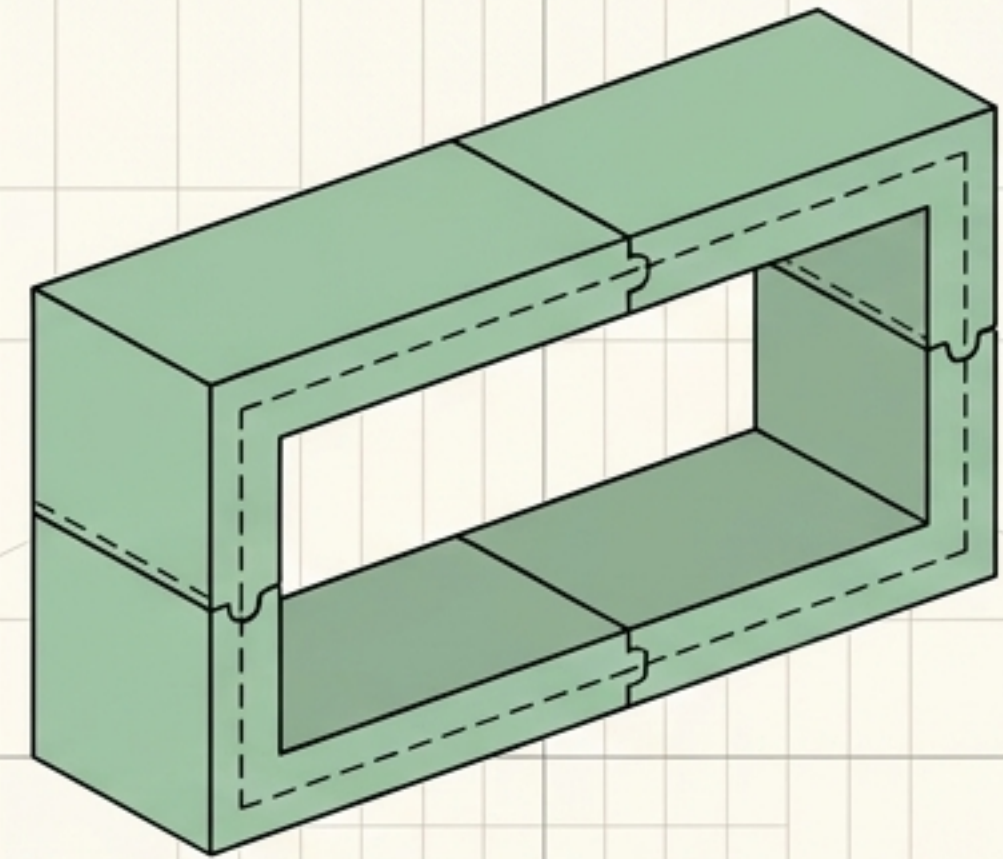


Los Contendientes: Diseños Optimizados por Costes



Marcos In Situ (ISRCF)

- **Estructura:** Marco cerrado y monolítico, hormigonado en obra.
- **Logística:** Alta dependencia de mano de obra local y encofrado intensivo (madera con 15 usos).
- **Foco de Impacto:** Distribución equilibrada entre construcción y materiales.



Marcos Prefabricados (PRCAF)

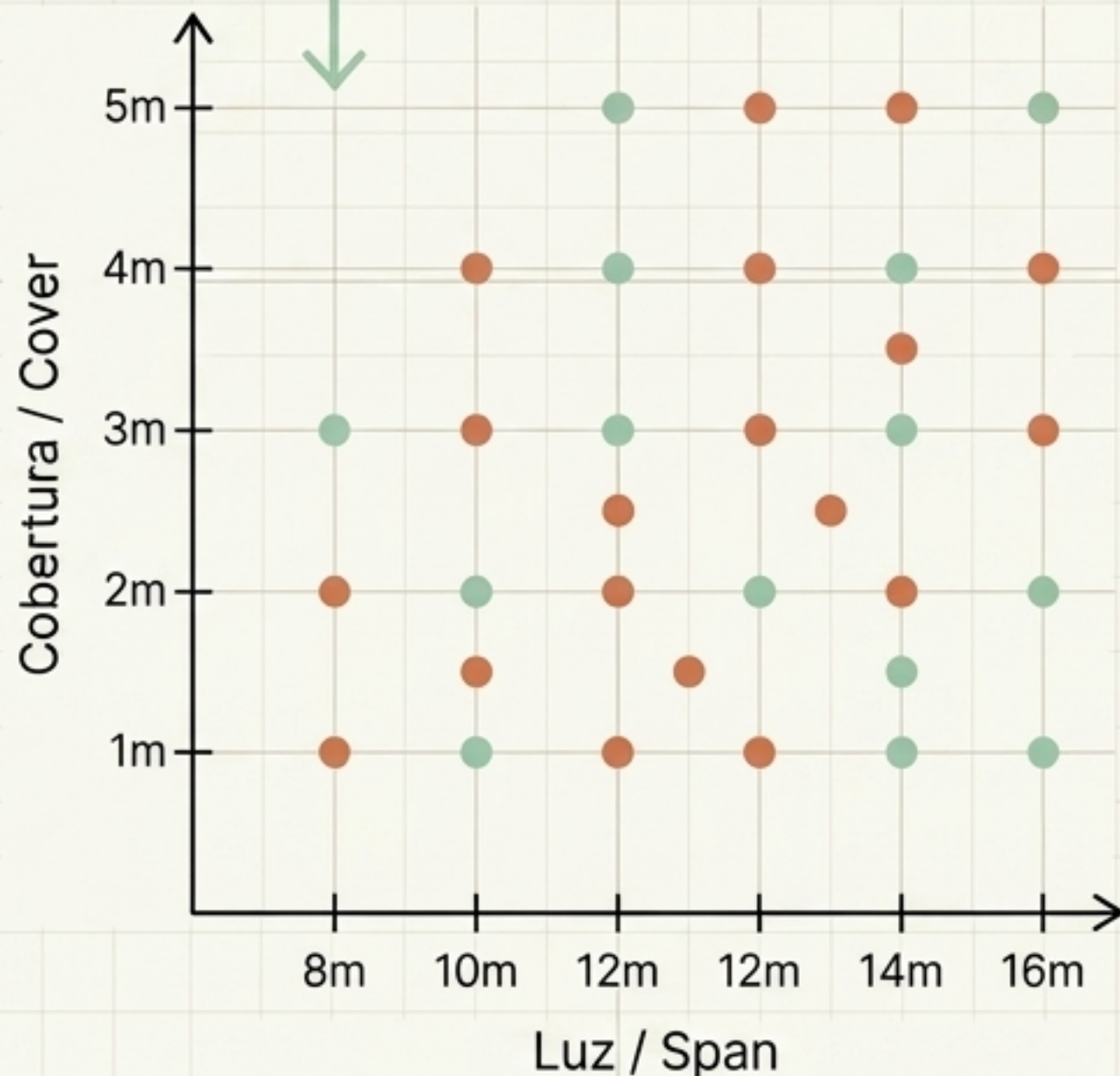
- **Estructura:** Marco modular articulado (piezas en U), ensamblado en obra.
- **Logística:** Fabricación industrializada (moldes de acero con 150 usos), requiere grúas de alto tonelaje.
- **Foco de Impacto:** Altamente concentrado en la fase de fabricación.

Footer Note: Ambos sistemas utilizan hormigón C25 (275 kg/m³ de cemento) y acero B500S para garantizar la comparabilidad estructural en un ciclo de vida de 100 años.

El Espacio de Diseño: Geometría como Motor de Impacto

El estudio evaluó 50 configuraciones paramétricas optimizadas (unidad funcional: 1 metro lineal).

**Regla de la Cobertura (Cover):
Crecimiento Lineal.**
Añadir 1 metro de tierra aumenta el GWP en solo un 11%, ya que afecta principalmente a las cargas verticales directas.

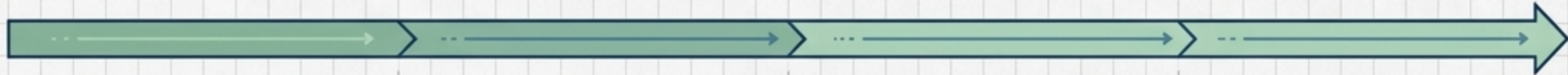


**Regla de la Luz (Span):
Crecimiento Cuadrático.**
Ampliar la luz 2 metros dispara el Potencial de Calentamiento Global (GWP) en un 23-25%. Exige un aumento desproporcionado de sección y armadura por flexión.

Un Marco de Evaluación Multidimensional

Track 1: E-LCA (ReCiPe 2016)

Mide el daño físico: Ecosistemas (species·yr), Salud Humana (DALY), y Recursos (\$).



Fabricación



Construcción



Uso (Carbonatación)



Fin de Vida

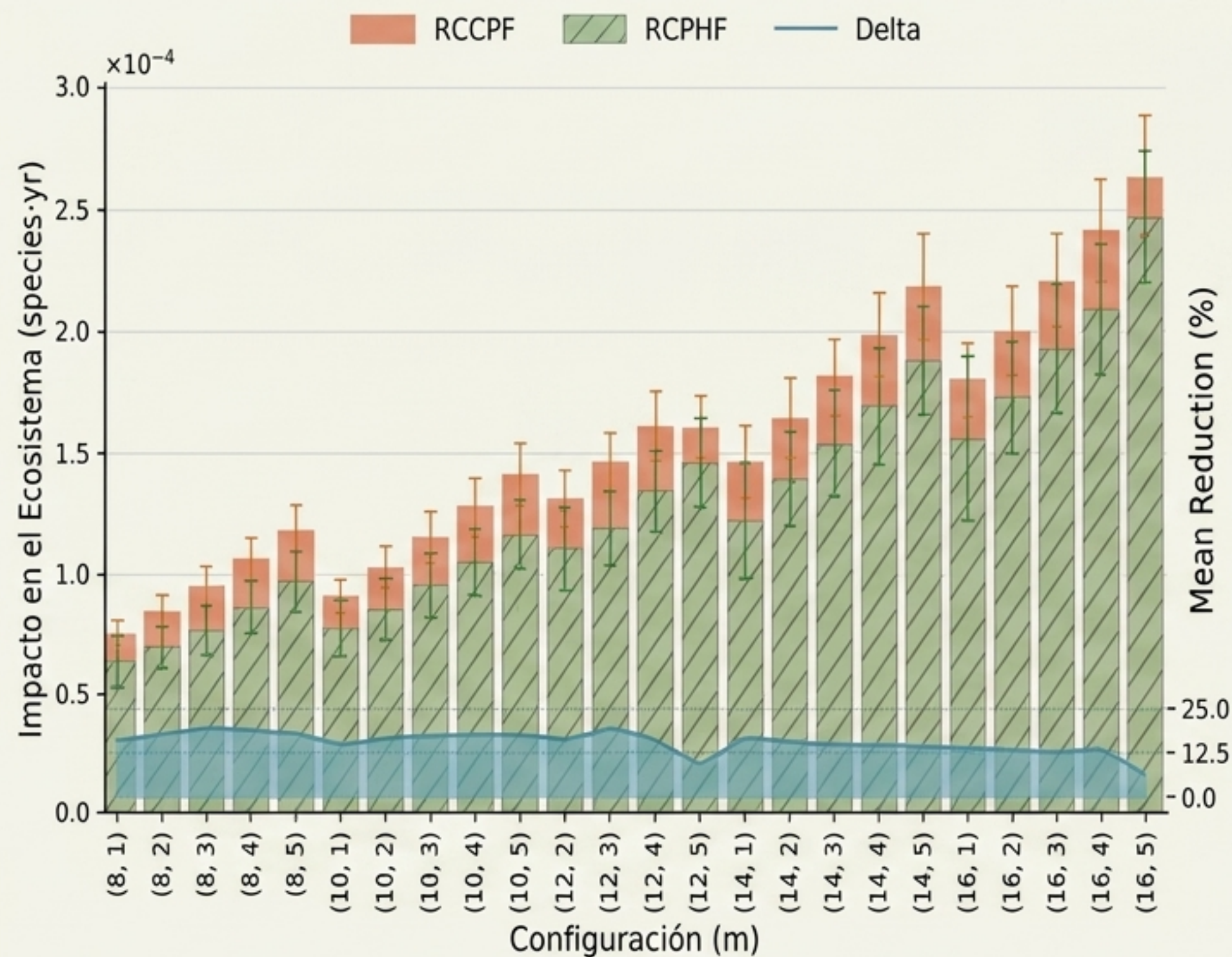


Track 2: S-LCA (PSILCA / SOCA v2)

Mide el riesgo social (Horas de Riesgo Medio - MRH) en cuatro grupos:
Trabajadores, Comunidad Local, Sociedad, y Cadena de Valor.

Evaluar ambas dimensiones en paralelo previene la «**falsa sostenibilidad**», donde la reducción de carbono en un país genera explotación laboral en otro.

Veredicto Ambiental: La Supremacía del Prefabricado



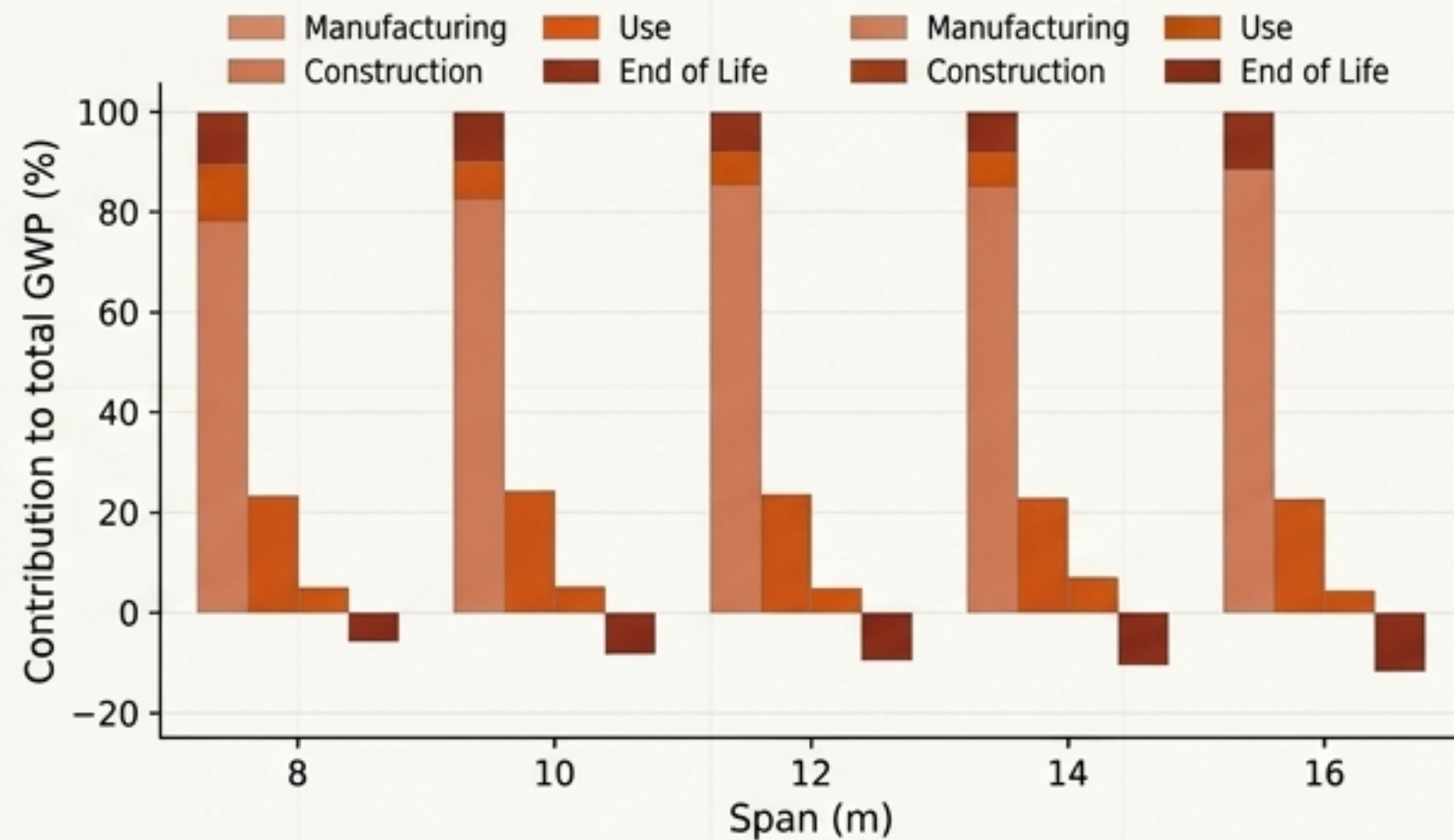
9-17%

de reducción en emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GWP) frente a In Situ.

- **Victoria Consistente:** Los sistemas PRCAF (Prefabricados) logran menores impactos en 24 de las 25 configuraciones evaluadas.
- **Eficiencia Material:** Menor consumo de cemento y eliminación de encofrados de madera desechables.
- **Impacto de Escala:** La ventaja comparativa del prefabricado disminuye a medida que la luz aumenta (del 18% a los 8m, bajando al 12% a los 16m), pero la reducción absoluta de emisiones sigue siendo superior.

La Anatomía del Impacto Ambiental

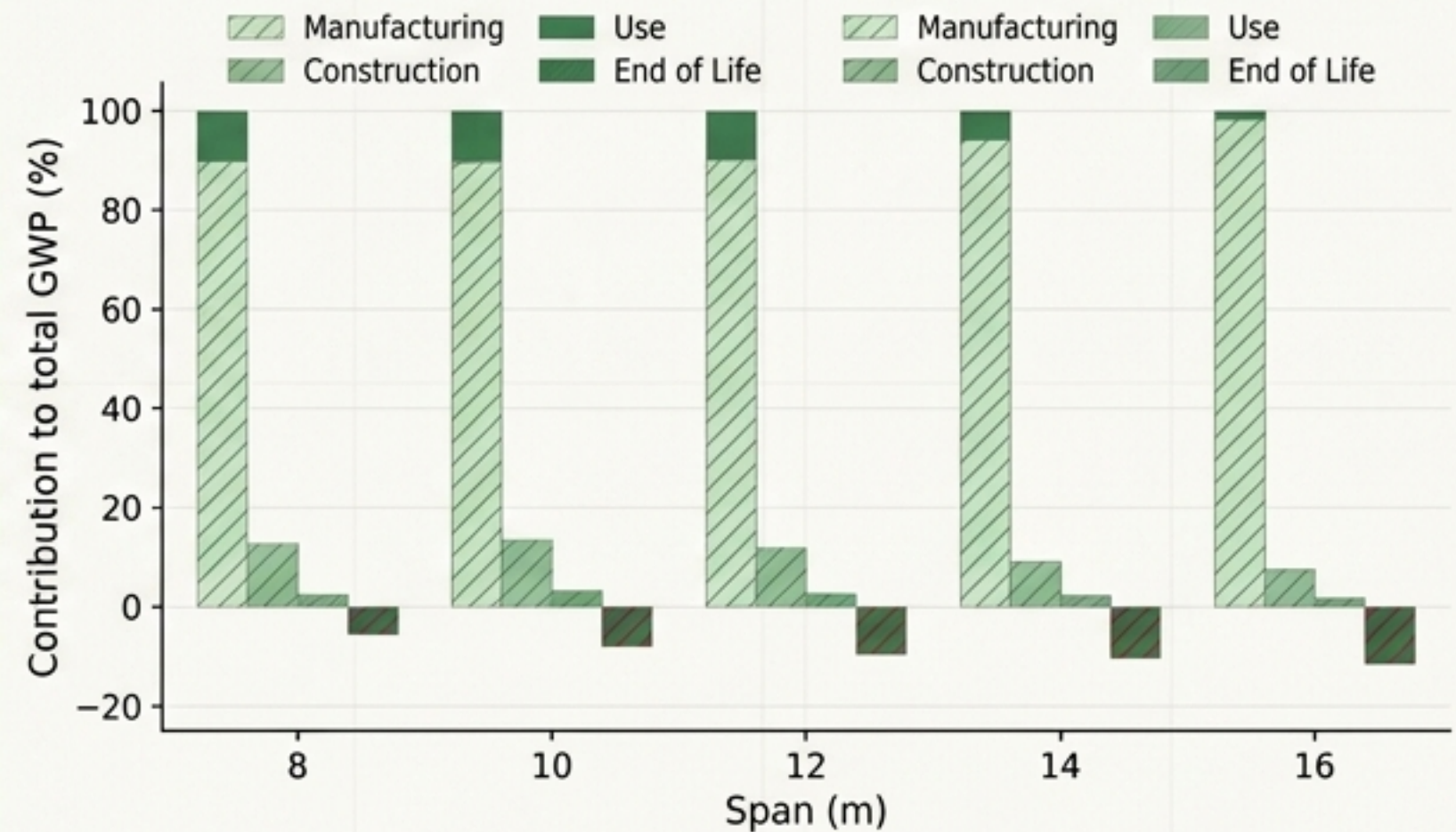
Marcos In Situ: Impacto Distribuido



La fabricación representa el 78%-88% del GWP.

- Mayor contribución relativa en la fase de Construcción (hasta 23%) y Fin de Vida, debido a procesos de demolición mecánica extensiva en obra.

Marcos Prefabricados: Gravedad Industrial

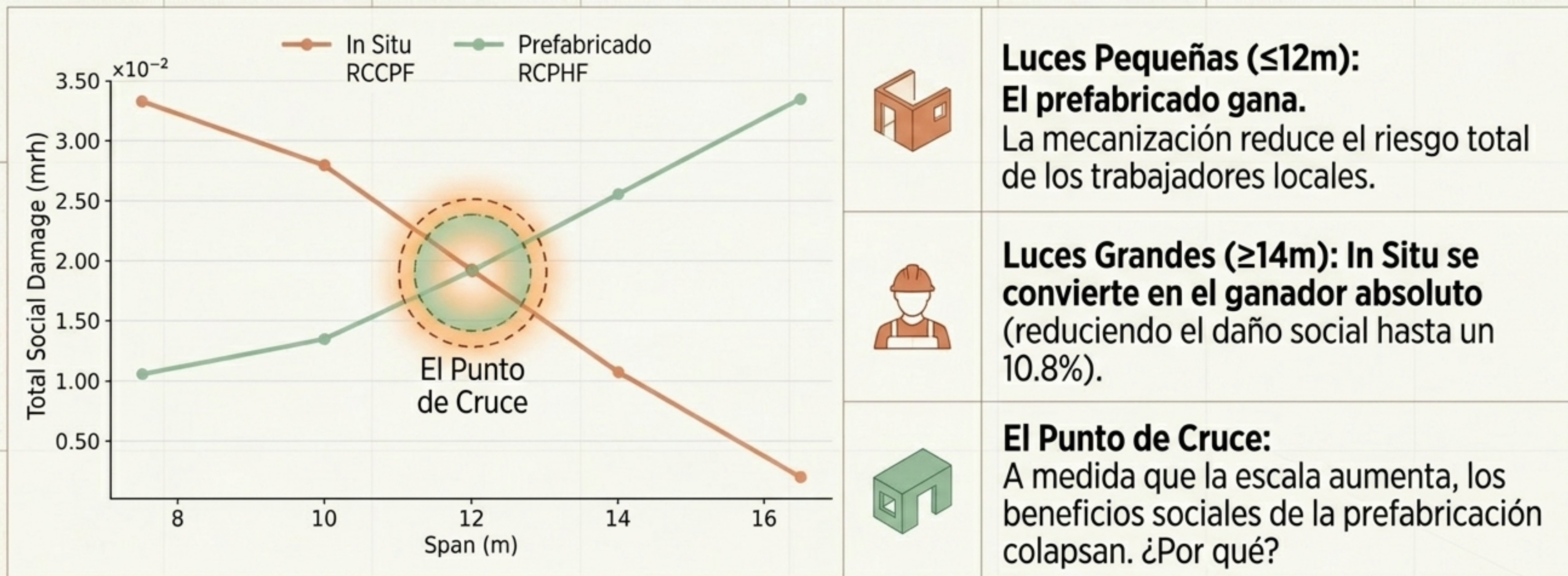


La Fabricación absorbe casi la totalidad del impacto (89% hasta casi 100% en luces grandes).

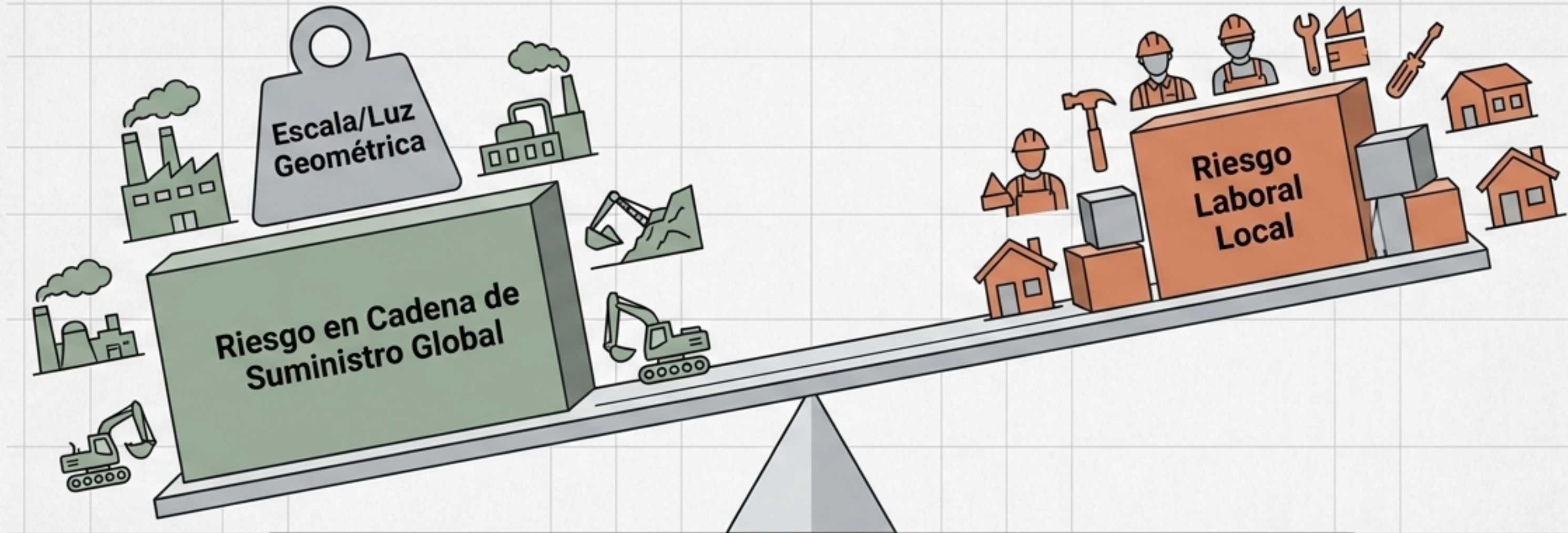
- El ensamblaje rápido (grúas de 45 min) y el desmontaje modular limpio minimizan drásticamente las emisiones en el sitio y mejoran la fijación de CO₂.

El Giro Inesperado: La Paradoja de la Dimensión Social

Si la evaluación terminara en el Medio Ambiente, el prefabricado ganaría siempre. Pero el Análisis Social de Ciclo de Vida (S-LCA) revela un comportamiento dependiente de la escala.



El Balancín del Riesgo Social: Cadena de Suministro vs. Trabajo Local

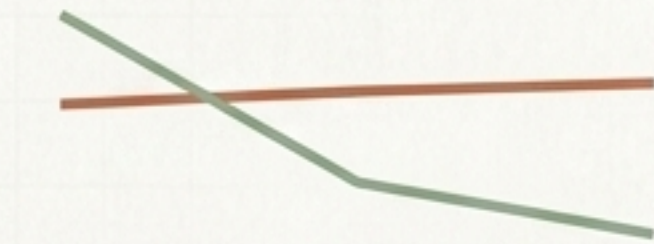


A medida que aumenta la luz geométrica, la demanda masiva de materiales del prefabricado traslada el riesgo social hacia arriba en la cadena de suministro global (extracción de materias primas y fabricación intensiva), donde la intensidad de riesgo acumulado es mayor según las bases de datos globales (PSILCA).

El Modelo In Situ: La construcción tradicional depende de procesos locales intensivos en mano de obra. Aunque parezca menos eficiente, retiene la actividad dentro de la comunidad local, distribuyendo el impacto de manera más equitativa y evitando picos de riesgo extremo en sectores industriales opacos.

Matriz de Partes Interesadas: ¿Quién asume el riesgo a gran escala?

Trabajadores (Workers)

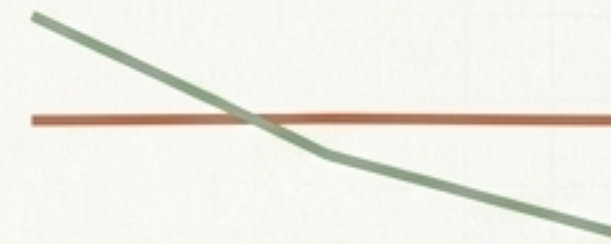


16m span from reference image (d) Workers)

Ganador a gran escala: In Situ (Terracotta)

En luces > 12m, In Situ reduce el riesgo en un 17.6%. El trabajo local controlado presenta menos horas de riesgo que las fases de extracción profunda.

Comunidad Local



16m span from reference image (a) Local Community)

Ganador a gran escala: In Situ (Terracotta)

Las ventajas iniciales del montaje rápido del prefabricado desaparecen en estructuras masivas, donde los impactos logísticos castigan a las comunidades.

Sociedad

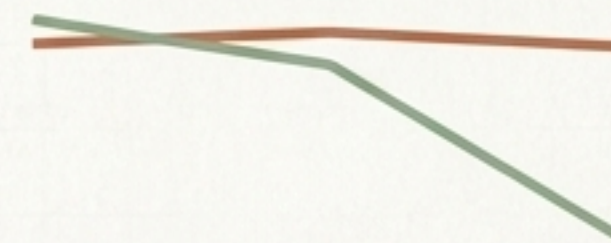


16m span from reference image (b) Society)

Ganador a corto plazo: Prefabricado (Sage Green)

El prefabricado es favorable en luces cortas, pero a partir de los 12 metros, el riesgo social colapsa.

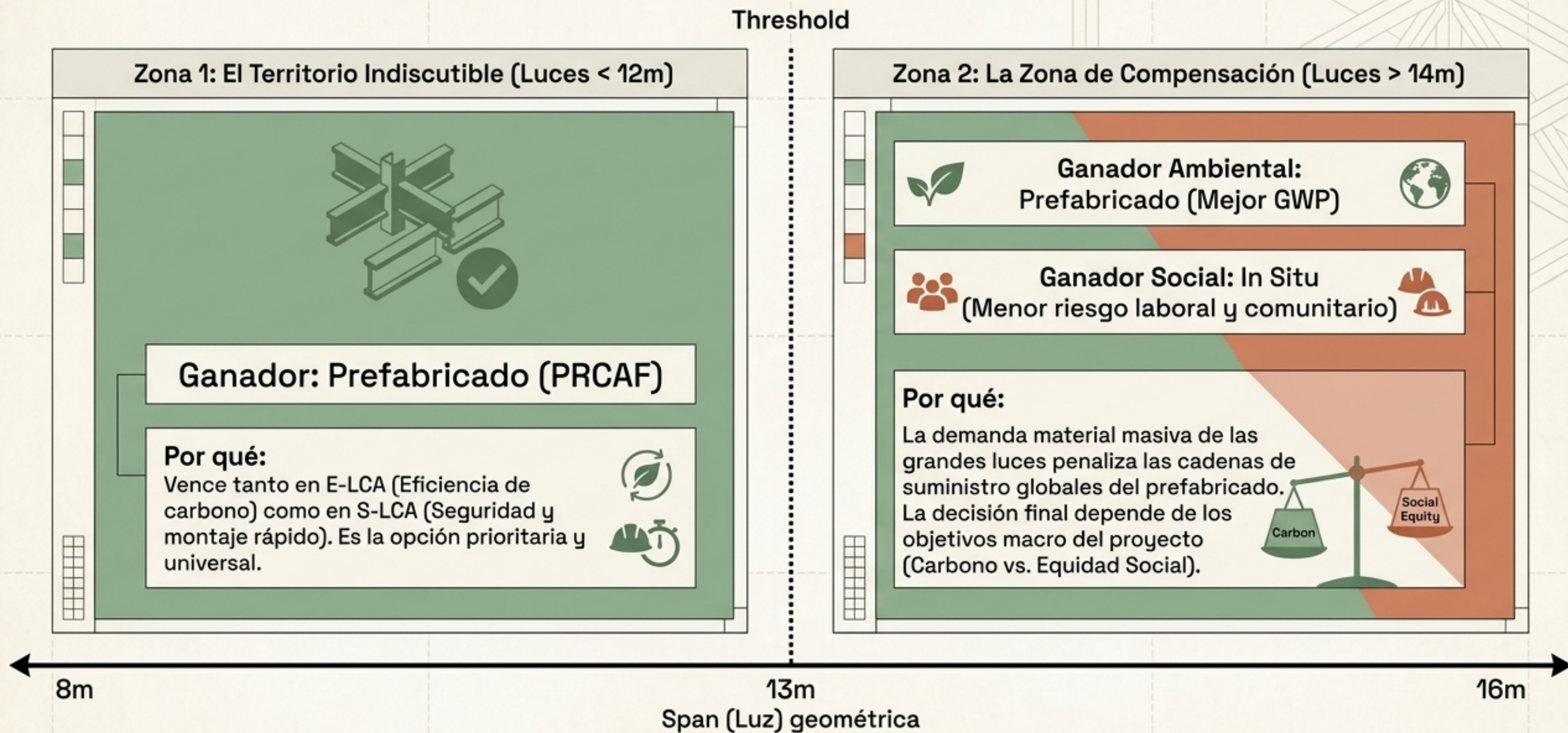
Cadena de Valor



16m span from reference image (c) Value Chain Actors)

Tendencia de riesgo a gran escala: Alta penalidad para Prefabricado
Las cadenas globales de suministro penalizan gravemente al PRCFAF debido a la masiva extracción de minerales requerida para sus secciones estructurales a medida que crece la escala.

La Síntesis: Matriz de Decisión Estratégica

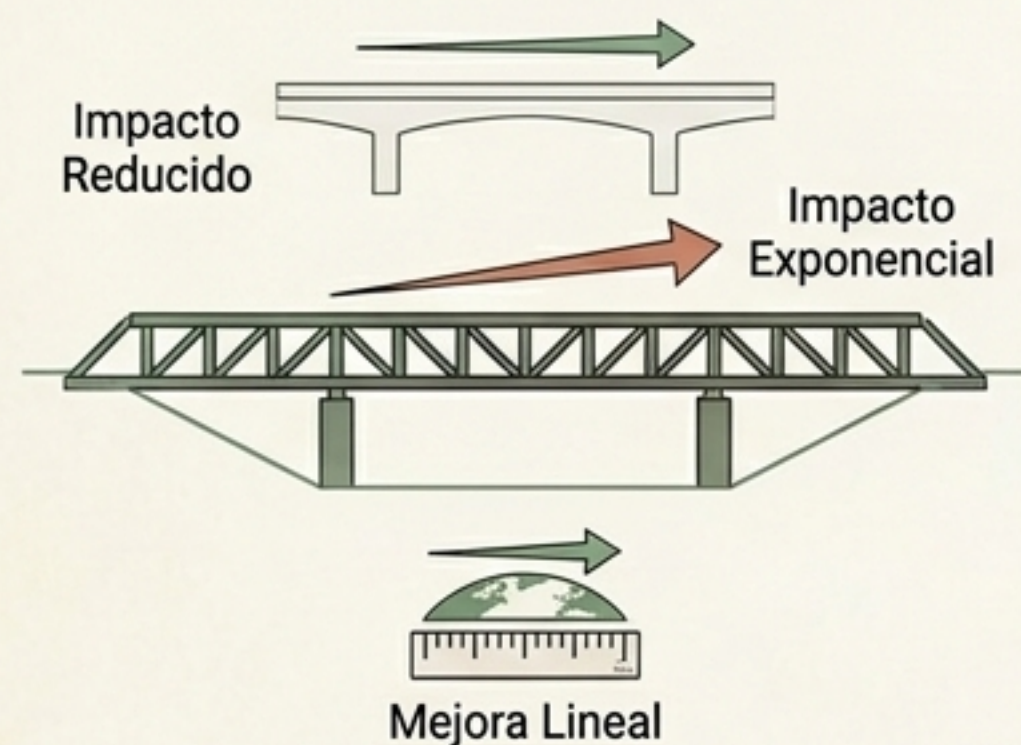


Directrices Estratégicas para la Planificación de Infraestructuras

1

Priorice la Luz sobre la Cobertura

Para reducir la huella de carbono total, invierta en optimizar la luz geométrica. Reducir la luz atenúa el impacto exponencialmente; modificar la cobertura de tierra solo aporta mejoras lineales.



2

Abandone la Regla de Talla Única

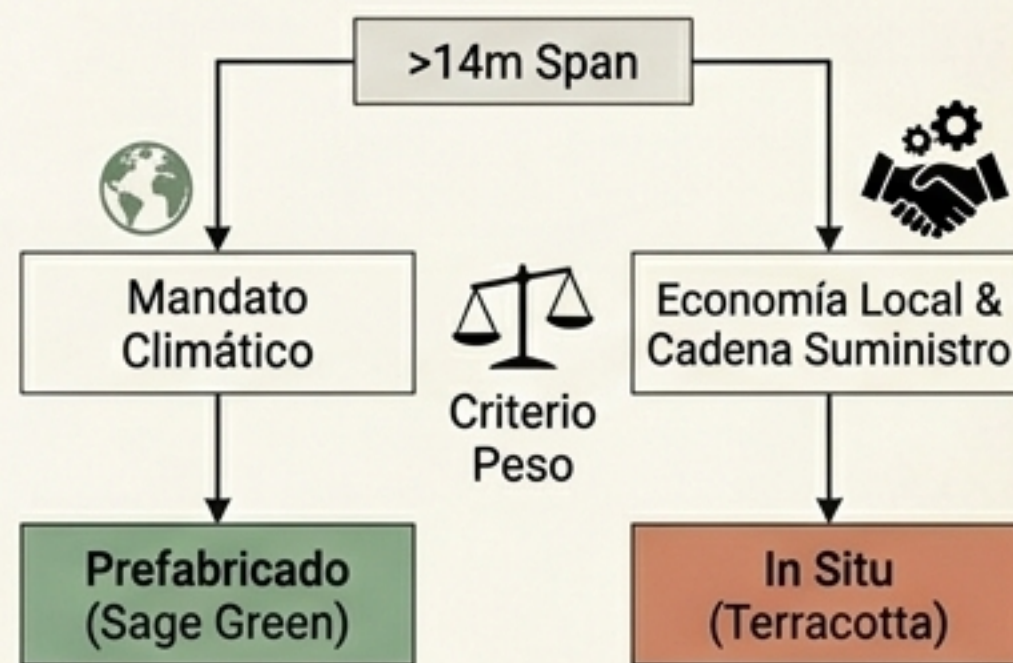
La prefabricación no es la solución universal. Integre el ACV Social (S-LCA) en la fase de viabilidad técnica para evitar que la reducción de CO₂ local externalice el riesgo laboral a otros países.

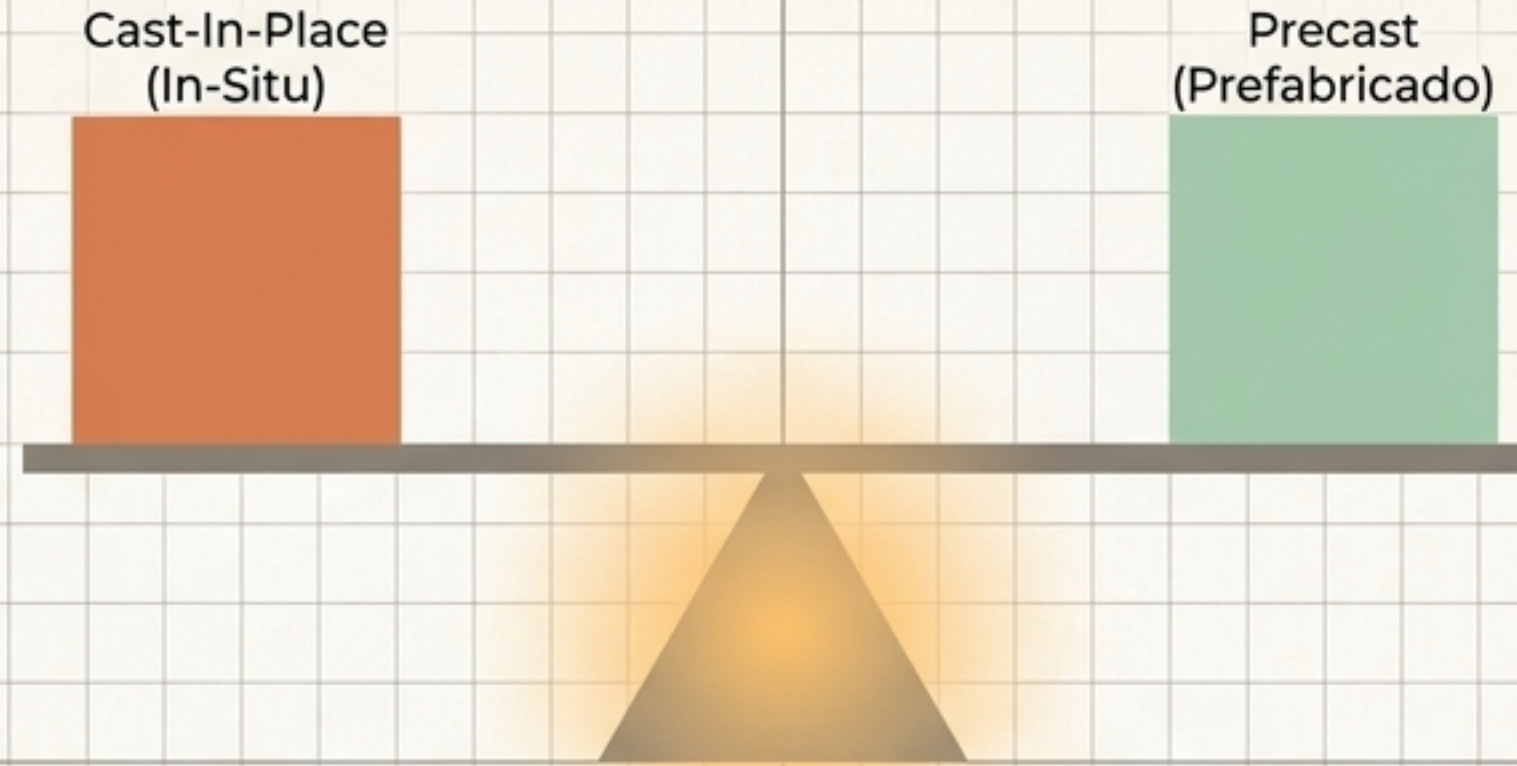


3

Defina el Mandato del Proyecto

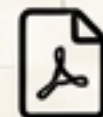
En el diseño de luces largas (>14m), la administración pública debe definir el peso del criterio. Si el mandato es estrictamente climático, utilice Prefabricado. Si el proyecto busca fomentar la economía local y proteger cadenas de suministro, evalúe el In Situ.





La Sostenibilidad es un Ejercicio de Escala

“Ningún método de construcción está exento de impacto. La verdadera ingeniería sostenible no consiste en buscar un material milagroso, sino en aplicar la geometría correcta al sistema de producción adecuado, equilibrando la atmósfera global con la sociedad local.”



Publicación completa en Elsevier: Life-cycle environmental and social trade-offs in concrete road frame systems