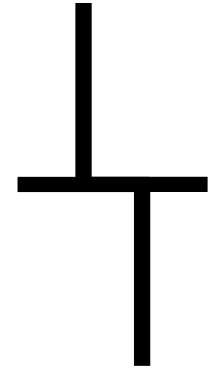




TEXTOS DE TECNOLOGÍA



REVISTA DEL INSTITUTO DE TECNOLOGÍAS  
FACULTAD DE ARQUITECTURA, DISEÑO Y URBANISMO  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

AÑO 4  
NÚMERO 07  
DICIEMBRE DE 2023  
MONTEVIDEO  
URUGUAY

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
**DR. RODRIGO ARIM**  
RECTOR

FACULTAD DE ARQUITECTURA,  
DISEÑO Y URBANISMO  
**ARQ. MARCELO DANZA**  
DECANO

CONSEJO FADU  
ORDEN DOCENTE  
**LUÍA BOGLIACCINI**  
**ANA VALLARINO**  
**DANIEL BERGARA**  
**MERCEDES MEDINA**  
**JUAN ARTICARDI**  
ORDEN ESTUDIANTIL  
**ANDREA GARCÍA**  
**MAILÉN DÁVILA**  
**VALENTINA HERNÁNDEZ**  
ORDEN EGRESADOS  
**SONIA PRIETO**  
**MERCEDES ESPASANDÍN**  
**GUILLERMO REY**

COMISIÓN DEL INSTITUTO  
DE TECNOLOGÍAS  
ORDEN DOCENTE:  
**ARIEL RUCHANSKY**  
**FEDERICO GIMÉNEZ**  
**JESSICA BERÓN**  
**GRACIELA MUSSIO**  
**LAURA BOZZO**  
ALTERNOS:  
**ALEJANDRO FERREIRO**  
**TIAGO MACHAIN**  
EUCD, UA ASOCIADA:  
**SARITA ETCHEVERRY**  
ORDEN EGRESADOS:  
**EVANDRO SARTHOU**  
ALTERNOS:  
**ANDRÉS CROZA**  
ORDEN ESTUDIANTIL:  
**FELIPE RODRÍGUEZ**  
ALTERNOS:  
**MATHÍAS GONZÁLEZ**  
**VALENTINA BARRACO**  
**JOSÉ SILVEIRA**

DIRECTORA DEL INSTITUTO  
DE TECNOLOGÍAS:  
**LAURA BOZZO**

#### TEXTOS DE TECNOLOGÍA

© IT - FADU - UDELAR, 2023,  
MONTEVIDEO, URUGUAY

#### COMITÉ EDITORIAL

**MARIO BELLÓN**  
**JUAN JOSE FONTANA**  
**JORGE GAMBINI**  
**CLAUDIA VARIN**  
**GUILLERMO ZUBELDÍA**

#### CORRECCIÓN

**LAURA ALONSO**

#### DISEÑO Y ARMADO

**JOSÉ DE LOS SANTOS Y SANTIAGO PIÑEIRÚA**

#### FOTO DE TAPA

**GUILLERMO ZUBELDÍA**

PUBLICACIÓN COMPUESTA CON TITILLIUM WEB  
(OPEN FONT LICENSE) DISPONIBLE EN  
[FONTS.GOOGLE.COM/SPECIMEN/TITILLIUM+WEB](https://fonts.google.com/specimen/Titillium+Web)

AUSPICIA ESTA PUBLICACIÓN



IMPRESIÓN Y ENCUADERNADO POR NESTA LTDA.,  
CONVENCIÓN 1319, CP. 11.100, MONTEVIDEO, URUGUAY

ISSN PAPEL: 2730-499X

ISSN EN LÍNEA: 2730-5007

DEPÓSITO LEGAL: 380.991

COMISIÓN DEL PAPEL. EDICIÓN AMPARADA  
EN EL DECRETO 218/96

# Sustentabilidad II

## TEXTOS DE TECNOLOGÍA

REVISTA DEL INSTITUTO DE TECNOLOGÍAS  
FACULTAD DE ARQUITECTURA, DISEÑO Y URBANISMO  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

# Contenidos

TEXTOS DE TECNOLOGÍA

AÑO 4  
NÚMERO 07  
DICIEMBRE DE 2023  
MONTEVIDEO  
URUGUAY

## técnica

09

Fondo de publicaciones  
COMITÉ EDITORIAL

11

SEPARATA  
Amazonia  
FINOTTI, L.

29

Certificaciones de sostenibilidad  
CORUJO GROS, I.

39

Desarrollo de lineamientos de diseño estructural para la construcción de viviendas de entramado ligero con maderas de pino y eucalipto de Uruguay  
MOYA, L.; BÖTHIG, S.; FONTANA, J.J.; FRANCO, J.; GODDY, D.; ARREJURÍA, S.; SAURA, M.; VILA, V.; PENADÉS, V.

47

Una mirada holística  
Hacia una construcción sostenible  
COMAS, M.

59

Planificación del territorio para un saneamiento adecuado  
CHABALGOITY LAMAS, L.

## materia

71

Hacia una industria cementera más sustentable  
RODRÍGUEZ, G.

81

*Wood plastic composite:* una alternativa de economía circular  
RAIMONDA, C.; MOSCA, D.; RAIMONDA P.; IBÁÑEZ, M.

95

Aislante a partir de fibras naturales de lana de oveja  
ARREJURIA, S.

105

Restauración arquitectónica  
Un paradigma de construcción sostenible a través de la reducción de la huella de carbono  
RIQUELME BRAVO, A.

## experimentación

119

Centro de innovación para el departamento de Caldas  
Colombia  
HENAJO CARVAJAL, ED.; LLANOS CHAPARRO, I.

139

Piezas de resistencia  
GONZALO NOGUÉS, C.

157

Centro deportivo y cultural en Romont  
Suiza  
GNWA

## producción

## Fondo de publicaciones

Desde el número cero de la revista, el equipo editor ha planteado una serie de desafíos con el objetivo de posicionar la publicación en el ámbito académico y profesional.

Las formas de divulgación han experimentado una transformación radical, generando alternativas positivas, especialmente en la amplia difusión que hoy tienen los trabajos publicados bajo estas premisas. La plataforma OJS, en particular, promueve el acceso gratuito y universal, contando además con estructuras de datos que facilitan la labor de los motores de búsqueda de las ediciones digitales.

También hemos apostado por mantener el formato papel, que complementa el valor de la información a través de un objeto de alta calidad, digno de ser incorporado en las bibliotecas.

Este año, hemos renovado el compromiso asumido con la creación del Fondo de Publicaciones y Divulgación, impulsando la realización de un llamado abierto para la publicación de trabajos de investigación de los equipos docentes del Instituto de Tecnologías. Esto se llevará a cabo en una doble modalidad: edición digital a través de un portal OJS de acceso libre y formato papel mediante la impresión a demanda de un mínimo de cien ejemplares.

Entendemos como fundamental la incorporación de medios y posibilidades de divulgación del trabajo de investigación que se lleva a cabo, y desde el equipo asumimos la tarea de avanzar en ese propósito, estableciendo metas realizables año tras año.

# Amazonia

## LEONARDO FINOTTI

Es artista visual y tiene su trayectoria estructurada sobre dos pilares complementarios, emprendiendo a través de la fotografía tanto una exploración rigurosa de la arquitectura moderna como una investigación de los espacios urbanos anónimos e informales.

En 2008, fue invitado por Barry Bergdoll, curador en jefe del MoMA de Nueva York, para formar parte de la exposición «*Latin America in Construction: Architecture 1955-1980*», un proyecto desarrollado a lo largo de siete años, que reinterpreta visualmente el legado de la arquitectura moderna de América Latina.







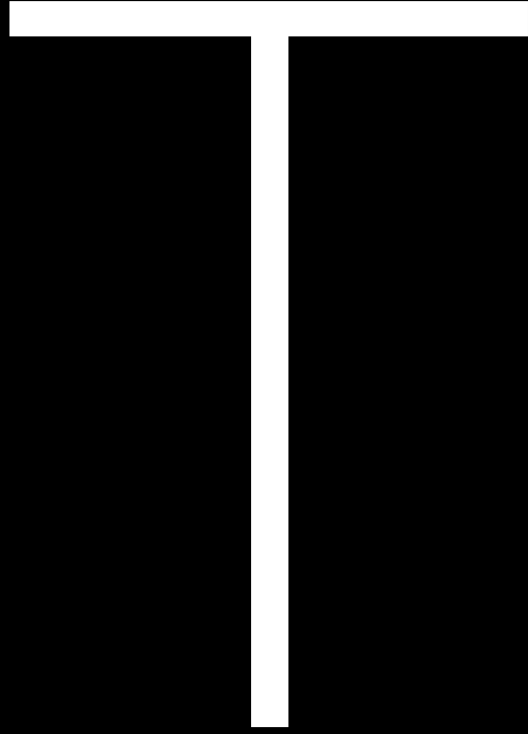








técnica



## Certificaciones de sostenibilidad

### PALABRAS CLAVE

CERTIFICACIÓN; SOSTENIBILIDAD; SUSTENTABILIDAD; EFICIENCIA; URUGUAY

### ISABEL CORUJO GROS

Arquitecta egresada de la Universidad ORT. Magíster en Arquitectura y Sostenibilidad (Universidad Politécnica de Cataluña). LEED Green Associate. EDGE Expert. Evaluadora Energética CEV. Asesora CES y CVS en Chile. Asesora MAS en Uruguay. Formó parte del equipo ganador del Solar Decathlon 2015: Latin America and Caribbean, con el proyecto La Casa Uruguaya. Trabaja en el estudio chileno Pasiva, que se dedica al asesoramiento en sostenibilidad y eficiencia energética para desarrollos inmobiliarios en Chile y Uruguay.

### Introducción

Pasa el tiempo y el mercado cambia. Desde que se demostró cómo las actividades humanas afectan el planeta, han surgido nuevas políticas de desarrollo para su protección y preservación. De esta forma, en 1990, en el Reino Unido, nació la primera certificación de sostenibilidad para desarrollos inmobiliarios: Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology [BREEAM]. Con la intención de reducir el impacto negativo que tanto la construcción como la operación de proyectos tienen en su entorno, estas certificaciones buscan ser una alternativa positiva para reducir los daños al medioambiente, ser más conscientes a nivel social, y más rentables económicamente.

Latinoamérica es parte del cambio. A partir del primer edificio con certificación de sostenibilidad —en la década del 2000—, su interés ha aumentado, dando lugar a nuevas certificaciones de sostenibilidad locales y a desarrollos que impulsan el mercado inmobiliario.

Treinta años después, en Uruguay aparece la certificación Medioambiente, Arquitectura y Sociedad [MAS], cuyo objetivo es incentivar la construcción sostenible a partir de la educación y ejecución de proyectos locales. La certificación MAS es impulsada por LATU + Quality Austria [LSQA] y fue desarrollada para el mercado inmobiliario del país, estableciendo metas similares a las de Leadership in Energy and Environmental Design [LEED] y BREEAM en sus orígenes.

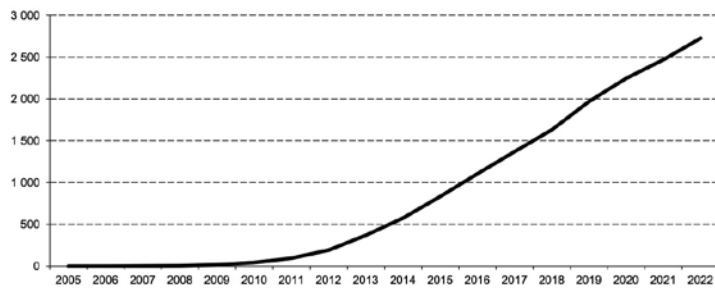


FIGURA 1. GRÁFICA DE CANTIDAD DE PROYECTOS CERTIFICADOS LEED EN AMÉRICA LATINA, 2005-2022. FUENTE: TOMADA DE CERTIFICACIONES EMPRESARIALES DE SOSTENIBILIDAD EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (P. 12) DE ARAYA, N. Y CORREA, F. (2023).

En este artículo, veremos qué son las certificaciones de sostenibilidad para desarrollos inmobiliarios y en qué consisten. A su vez, qué certificaciones de sostenibilidad son las que se manejan a nivel local y cuál es su presencia en Uruguay.

### Certificaciones de sostenibilidad: ¿qué son y para qué sirven?

Las certificaciones actúan como sellos de aprobación de estándares, que comunican —a los inversores, los compradores y la comunidad en general— el compromiso de un desarrollo con sostenibilidad. Buscan evaluar de forma objetiva y comparable, definiendo metas cuantificables que permitan guiar el proyecto hacia un modelo más eficiente.

Su validez y su credibilidad están garantizadas a través de un proceso administrativo imparcial y transparente. Usualmente, un miembro del equipo de proyecto recolecta información para enviarla a un revisor externo. Posteriormente, este envía sus comentarios al administrador de la certificación. Una vez que el administrador de la certificación revisa y aprueba el material, se puede considerar que el proyecto está certificado.

Las certificaciones de sostenibilidad para proyectos arquitectónicos son voluntarias. Surgieron a principios de los años noventa, en Europa y Estados Unidos, en respuesta a una preocupación creciente —aún presente— por el impacto negativo de la construcción en el futuro de nuestro planeta. Cuidar los recursos naturales y buscar alternativas más amigables que no comprometan nuestro entorno nos obliga a reconsiderar la forma en que vivimos y, con ello, asumir nuevos retos y compromisos.

Hoy existen varias certificaciones de este tipo a nivel mundial y hay una tendencia al alza. Según la CEPAL (Araya, 2023), desde que las certificaciones de sostenibilidad aparecieron en América Latina, la cantidad de desarrollos certificados y de certificaciones de sostenibilidad continúa en aumento. Esto sucede, en

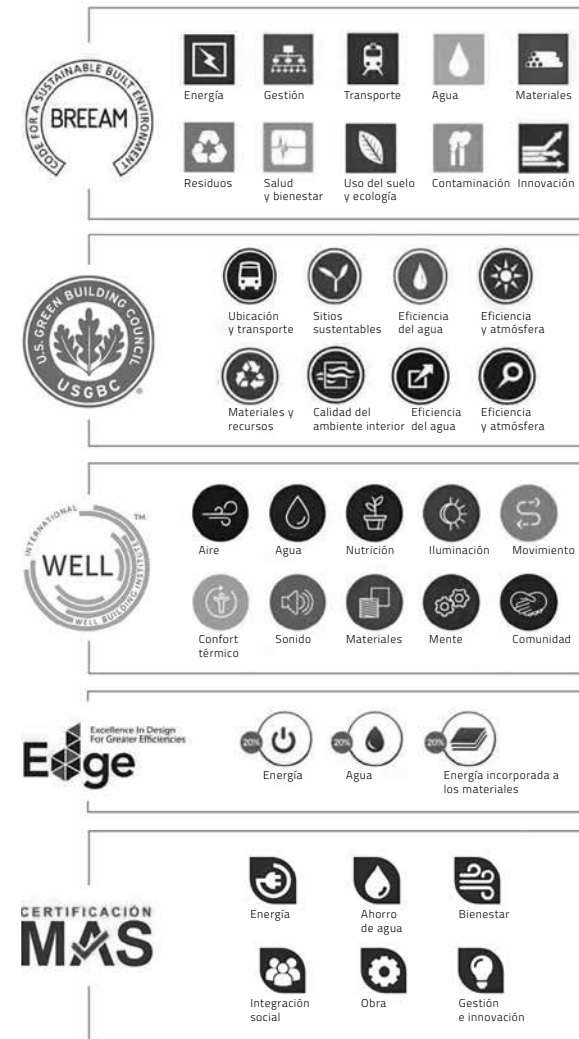


FIGURA 2. EJEMPLOS DE CERTIFICACIONES DE SOSTENIBILIDAD Y CATEGORÍAS DE EVALUACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

parte, porque las certificaciones permiten diferenciar más fácilmente proyectos sostenibles de los que expresan un ecoblanqueo o *greenwashing*.<sup>1</sup> Su presencia y crecimiento también se debe al interés de instituciones mundiales como la Organización de las Naciones Unidas [ONU] —con su Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible—, el Banco Interamericano de Desarrollo [BID], el Banco Mundial y la Corporación Financiera Internacional [IFC]. Instituciones que han impulsado este tipo de iniciativas probadamente beneficiosas para el medioambiente y las personas, demostrando —a su vez— ser rentables y empujar cambios en la educación y los mercados locales.

1. Concepto referente a aquella información engañosa que conduce a pensar que un producto es «verde» o sostenible cuando en verdad no lo es.

En esencia, la mayoría de las certificaciones apuntan a: la elaboración de proyectos más eficientes; la reducción de la huella de carbono y los gases de efecto invernadero; la optimización de los recursos y la mejora de la experiencia y rentabilidad del usuario. Pero pueden centrarse en aspectos distintos y, con eso, crear un marco de categorías y exigencias diferentes entre sí. LEED, PassivHaus, Excellence in Design for Greater Efficiencies [EDGE] y Wellness [WELL] son algunas de las certificaciones internacionales más comunes en Latinoamérica, que presentan grandes diferencias entre sí. A modo de ejemplo, mientras que PassivHaus se concentra en el diseño de la envolvente térmica para lograr un edificio pasivo, LEED divide su atención en varias categorías como: reducción del consumo energético; reducción del consumo de agua; materiales; planificación de obra; ubicación y transporte; calidad del aire interior; entre otras que son consideradas clave para entender un proyecto como sostenible. EDGE es más nueva que las anteriores y busca demostrar el ahorro de energía en tres categorías: energía operacional, energía en agua y energía incorporada en los materiales. Por otro lado, WELL expresa un compromiso en desarrollar ambientes interiores sanos y confortables, tomando en cuenta factores como la calidad del agua, el mobiliario y la luz interior, para lograr el bienestar de los ocupantes.

Al momento de elegir la certificación adecuada, se deben tener claras sus especificidades, ya que cada certificación tiene un foco distinto y posee limitaciones. Si participa un asesor, es importante que contemple las diferencias y los alcances de cada una de ellas, para poder cruzarlas con el proyecto en cuestión.

### Beneficios medioambientales, sociales y económicos

Los beneficios de las certificaciones se pueden entender dentro de los tres pilares de la sostenibilidad: el medioambiental, el social y el económico.

#### MEDIOAMBIENTAL

Los proyectos que incorporan estrategias de sostenibilidad disminuyen, en gran medida, el impacto negativo que la construcción y la operación del edificio tienen sobre el medioambiente. Planificar en etapa de diseño permite reducir conflictos, optimizar recursos y minimizar la descoordinación que pueda surgir más adelante.

Una estrategia de obra adecuada permite ser más eficiente y reducir tiempos, crear ambientes seguros de trabajo y desarrollar tácticas que ayuden a mitigar la contaminación medioambiental asociada. En este sentido, la prevención de la contaminación de las napas subterráneas y el control de la propagación de sedimentos y polvo fuera de la obra son algunas de las medidas que permiten evitar la contaminación y cuidar los recursos naturales presentes. A la vez, establecer procedimientos para la disposición de los residuos de obra ayuda a la reducción de los Gases de Efecto Invernadero [GEI],

que —de acuerdo a la Intendencia de Montevideo (2023)— constituyen el tercer subsector que genera localmente más emisiones, luego del transporte y la industria.

La reducción del consumo de agua potable también es un beneficio, ya que se estima que el 16% del consumo mundial del agua potable proviene de la construcción.

#### SOCIAL

Los beneficios sociales se pueden atribuir a la conservación y cuidado de los ambientes naturales, eliminando la posibilidad de explotar, verter y/o extraer recursos de lugares inadecuados, que pueden afectar el entorno directo de algunos habitantes —usualmente aquellos de menores recursos— y el desarrollo de espacios confortables y «sanos» para los usuarios.

#### ECONÓMICO

Los edificios sostenibles no son necesariamente más costosos que un desarrollo convencional. Si se definen objetivos sostenibles desde un inicio —es decir, en una etapa temprana de diseño—, los sobrecostos no llegan al 2%.

El Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (2020) realizó, junto a otras entidades reconocidas de Latinoamérica, un estudio sobre la presencia de la certificación LEED en la región por un período de quince años. El resultado indicó que en la mayoría de los proyectos que tomaron decisiones en etapas tempranas de diseño, la inversión adicional fue igual o menor al 1%. En cambio, para los proyectos que admitían haber tomado decisiones en etapas avanzadas de diseño o durante la construcción, los sobrecostos aumentaban entre el 5% y el 10%. Adicionalmente, aquellos desarrollos con un sobrecosto menor lograron un retorno de la inversión en menos de un año.

El estudio destaca el potencial de estos proyectos a través de la perspectiva de los desarrolladores. Estos destacan, a su vez, beneficios que van desde la reducción de costos de operación del edificio hasta una mejora en la salud y bienestar de los ocupantes, una mayor rentabilidad, comercialización más rápida y mejor documentación del proyecto.

### Uruguay

Uruguay avanza por el camino de la sustentabilidad. A partir de medidas gubernamentales que datan del 2009, el mercado se ha ido transformando. Se pueden destacar, entre otras iniciativas: el Premio Nacional de Eficiencia Energética; el Programa de Normalización y Etiquetado del Proyecto de Eficiencia Energética; el modelo Sustentabilidad Ambiental de la Vivienda [Suamvi]; la creación del Fideicomiso Uruguayo de Ahorro y Eficiencia Energética [Fudae] y el Plan Nacional de Eficiencia Energética 2015-2024, junto a la transición a energías limpias y renovables.

En el proceso, han surgido proyectos como el edificio Celebra —con la certificación LEED [2012] y La Casa Uruguaya [2015]—, que demuestran que es posible un modelo de construcción sostenible en Uruguay.

Actualmente, hay en nuestro país desarrollos que buscan ser parte del cambio y —para demostrarlo— se vuelcan a las certificaciones. Gracias a la Comisión de Aplicación de la Ley de Inversiones [COMAP] —que da puntos a los desarrolladores por proyectos certificados en sostenibilidad— y a los préstamos hipotecarios verdes de instituciones como el BBVA y Santander para proyectos con certificaciones LEED, EDGE o MAS, se cuenta con incentivos para que este modelo crezca.

LEED —que es la certificación internacional más reconocida a nivel local, administrada por el United States Green Building Council [USGBC]— le lleva una ventaja de treinta años al mercado nacional, volviéndose en muchos casos, un objetivo muy difícil de alcanzar. Es por eso que aparecen otras certificaciones como EDGE —fundada en el 2012 por el IFC y el Banco Mundial para países en vía de desarrollo— y la certificación MAS. Ambas pretenden disminuir la brecha y ser ese punto de partida que fue LEED al inicio, contando con proyectos certificados en Uruguay.

La certificación MAS tuvo su lanzamiento oficial a principios del 2022, de la mano de LSQA y el estudio Pasiva. Se creó para edificios de vivienda, uso comercial y público. Es una certificación para el mercado uruguayo y cuenta con el apoyo de varias instituciones gubernamentales y privadas para su desarrollo. MAS busca que los edificios cumplan con estándares mínimos de ahorro en energía y agua, y aportar al bienestar interior de los usuarios, sumar a la integración social y educación local, generar conciencia sobre la disposición de residuos y ayudar a mitigar los impactos negativos de las obras. El resultado es un proyecto comprometido a un proceso más sostenible, con beneficios medioambientales, sociales y económicos, y alineado a los objetivos del país.

## Estrategias y beneficios

### REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA

Se premia una envolvente bien diseñada, con una orientación, con control solar y con aislaciones térmicas calculadas, que permitan el ahorro de energía en su operación. Eso significa no sobredimensionar equipos de climatización o eliminarlos por completo, lo cual disminuye el costo de inversión. A su vez, la reducción de la cantidad de energía necesaria para que los usuarios estén confortables se traduce en ahorros económicos, tanto por evitar el servicio constante como por disminuir el mantenimiento de los equipos, el desgaste de uso y los impactos ambientales negativos.

### REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA POTABLE

La disminución del consumo de agua potable se puede lograr por distintos medios. Uno es seleccionando griferías de bajo caudal y regulando la presión de

salida del agua, lo cual permite que salga menos agua del grifo y se reduzcan gastos innecesarios. Bien diseñada, esta estrategia no debería comprometer la calidad ni el confort del usuario, sino simplemente disminuir y eliminar los excesos de consumo de agua.

A su vez, si el grifo —como la ducha— está conectado al sistema de agua caliente, dado que está entrando y saliendo menos agua del sistema —ejemplo, calefón—, el consumo de energía para calentar el agua disminuye. Esto se vuelve un ahorro energético con beneficios en lo medioambiental y un ahorro económico.

Otra forma es la recolección y reutilización de agua no potable —como el agua de lluvia—, como alternativa cuando el agua potable no es necesaria; por ejemplo, para el riego de plantas o lavados no potables.

También con sistemas de depuración y filtrado se permite que el agua recolectada se use dentro de la vivienda aumentando el ahorro, pero deben ser consideradas las reglamentaciones locales para su implementación.

### MEJORA DE LA CALIDAD DEL AMBIENTE INTERIOR

El ambiente interior puede verse afectado por la arquitectura a través de la temperatura, la calidad del aire, la calidad de la iluminación natural y artificial, la correcta ventilación, la acústica y las vistas. MAS no define criterios sobre las vistas, pero sí sobre los aspectos anteriores, que son determinantes para que una persona esté en confort.

Los beneficios de un ambiente confortable pueden implicar desde un aumento en la productividad laboral a una mejora en la concentración de un estudiante. Estas consecuencias —producto de un buen diseño— tienen sus implicancias a nivel social y económico.

### SELECCIÓN DE MATERIALES

Siempre es preferible que los materiales tengan contenido reciclado, sean reutilizados o provengan de fuentes que garanticen una extracción de la materia prima responsable. También, que sean producidos localmente para reducir la energía que implica el traslado del material a la obra.

Ser consciente de esta selección significa preservar recursos naturales y reducir la cantidad de GEI liberados al ambiente. A su vez, la reutilización de materiales puede llevar a obtener beneficios económicos, aprovechando los recursos existentes para algo nuevo.

En los espacios interiores, son preferentes los materiales con bajo contenido de compuestos orgánicos volátiles [COV]. Estos compuestos, en grandes cantidades, pueden afectar la calidad del aire interior y resultar dañinos para la salud de los ocupantes. Su ausencia indica ambientes más saludables, un diferenciador positivo en el mercado.

### GESTIÓN DE RESIDUOS

Los residuos son manejados desde dos perspectivas: en obra y durante la operación del edificio. En ambas se busca un mismo fin: clasificar residuos,

identificando aquellos que pueden tener un segundo uso o reciclarse para disminuir la cantidad de material que llega al vertedero. El vertedero es la disposición final del material, convirtiéndose en contaminación que afecta el medioambiente. El desviar los residuos de vertederos para su reutilización disminuye la necesidad de materias primas, eliminando la energía incorporada a la producción de un material nuevo y los GEI asociados.

### Caso

Como se mencionó, la aplicación de una certificación de sostenibilidad implica una metodología estandarizada y cuantificable. Se define una línea base —que puede cambiar según la certificación— y se trabaja para mejorar el rendimiento del edificio a partir de esa línea base. Los resultados se convierten en una herramienta ilustrativa y, muchas veces, un diferenciador ante otros proyectos.

Un ejemplo es el barrio residencial Pilar de los Horneros, ubicado en Canelones, que es el primer proyecto de su tipo que cuenta en Uruguay con la certificación preliminar EDGE Advanced. Logró un ahorro del 48% en uso de energía, 31%

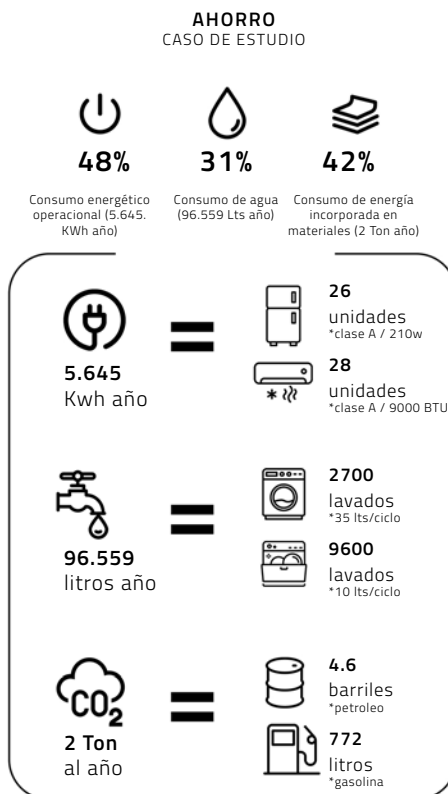


FIGURA 3. ESQUEMA DE AHORROS;  
CASO DE ESTUDIO.  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

en uso de agua y 42% de energía en los materiales, al ser comparado con otros edificios estándar de la región.

Dicho de otra forma, las estrategias aplicadas permiten que cada vivienda ahorre 5645 KWh en energía eléctrica al año. Esa energía es equivalente al funcionamiento anual de 28 aires acondicionados o 26 heladeras en una casa.<sup>2</sup>

Con respecto al agua, se eligen griferías de bajo consumo y se alcanza un ahorro de 96559 l por año en cada vivienda. Esa cantidad es equivalente a 2700 lavados de ropa o 9600 lavados de lavavajillas.<sup>3</sup>

La herramienta EDGE App también calculó las emisiones de CO<sub>2</sub> ahorradas según los materiales definidos en el diseño, alcanzando un valor de 2 t. Ese número es equivalente a las emisiones de CO<sub>2</sub> de 4,6 barriles de petróleo, 772 l de gasolina consumida o 220705 cargas de un celular inteligente.<sup>4</sup>

### Conclusión

Para finalizar, es necesario dejar en claro que la ausencia de una certificación de sostenibilidad en un desarrollo inmobiliario no significa que este no sea sostenible. Las certificaciones comunican y garantizan que un proyecto cumple con estándares definidos de sostenibilidad. Su metodología de trabajo permite medir y mostrar resultados cuantificables, por lo que ha ganado cada vez más impulso en Latinoamérica. En Uruguay, cada vez más proyectos incluyen la decisión de certificarse y se prevé que, a través de certificaciones de sostenibilidad como EDGE y MAS, esto se extienda.

### Referencias bibliográficas

- Araya, N. y Correa, F. (2023). *Certificaciones empresariales de sostenibilidad en América Latina y el Caribe*. Santiago: CEPAL. Recuperado de [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/48907/1/S2300159\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/48907/1/S2300159_es.pdf)
- Consejo Colombiano de Construcción Sostenible. (2020). *Caso de Negocio de LEED en Latinoamérica*. Recuperado de [https://www.chilegbc.cl/assets/images/documentos/Caso\\_LEED2021.pdf](https://www.chilegbc.cl/assets/images/documentos/Caso_LEED2021.pdf)
- Intendencia de Montevideo. (2023). *Inventario de emisiones de Gases de Efecto Invernadero de Montevideo. Año 2021 y serie 2006-2021*. Recuperado de <https://montevideo.gub.uy/sites/default/files/biblioteca/reporteinventariogeimdeo2021final.pdf>

2. Energía. Calculadora de consumo: <https://www.copelnet.com.ar/informacion-de-interes/energia/calculadora-de-consumo>

3. Son valores referenciales. Los consumos pueden variar de acuerdo a la capacidad y funcionamiento de cada equipo

4. Calculador de equivalencias de Gases de Efecto Invernadero, de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés): <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculador-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero#results>

# Desarrollo de lineamientos de diseño estructural para la construcción de viviendas de entramado ligero con maderas de pino y eucalipto de Uruguay

LAURA MOYA, SILVIA BÖTHIG, JUAN JOSÉ FONTANA,  
JORGE FRANCO, DANIEL GODOY, STEPHANY ARREJURÍA,  
MARIANA SAURA, VIRGINIA VILA Y VALENTINA PENADÉS

## PALABRAS CLAVE

CONSTRUCCIÓN CON MADERA; ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS; PROTOTIPO;  
DISEÑO Y CÁLCULO; UNIONES

Arquitecta (FArq-Udelar, 1991). Magíster en Diseño y Construcción en Madera (FarCoDi-Universidad del Bío-Bío, Chile, 2001). Doctora en Gestión de Recursos Naturales (Department of Bioproducts and Biosystems Engineering, University of Minnesota, 2008). Profesora Titular de Estructuras 4, investigadora y coordinadora académica del Diploma de Especialización en Diseño, Cálculo y Construcción de Estructuras de Madera (Facultad de Arquitectura-Universidad ORT, Uruguay).

## Introducción

A partir del proyecto «Documentos base para la estandarización de edificaciones y construcciones en madera», un grupo de docentes e investigadores del Equipo Multidisciplinario para la Madera Estructural [EMME] —pertenecientes a la Fundación Latitud del LATU; la Facultad de Arquitectura de la Universidad ORT Uruguay; la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo [FADU] y la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República [Udelar]— desarrolló el documento *Lineamientos de diseño estructural para viviendas de entramado ligero construidas con maderas de pino y eucalipto de Uruguay. Soluciones estandarizadas basadas en normas nacionales y en el criterio del Eurocódigo 5*.

El proyecto fue financiado a través de una cooperación técnica con el Fondo Financiero para el Desarrollo de la Cuenca del Plata [Fonplata] y gestionado por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA] y la Dirección General Forestal del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca [MGAP] de Uruguay. Se contó, además, con el asesoramiento del Dr. Ing. Juan Carlos Piter y de la Ing. María Rocío Ramos, del Grupo de Estudio de Maderas de la Facultad Regional Concepción del Uruguay, de la Universidad Tecnológica Nacional de Argentina [UTN].

Si bien a nivel internacional existe una gran variedad de documentos referidos al tema, la creación de códigos y de normativa nacional adquiere especial importancia, ya que permite contemplar las características de los materiales

producidos en nuestro país y disponibles en el mercado local. El comité especializado UNIT de Madera para Uso Estructural está en proceso de adoptar el Eurocódigo 5 (Asociación Española de Normalización, 2016) y de crear un Anexo nacional que contemple estas especificidades locales. Considerando la experiencia de países de la región en relación con los pasos adoptados para la creación de documentos técnicos y normativa específica para diseño estructural en madera, el equipo investigador se propuso generar una guía técnica con un conjunto de reglas acordes a los materiales y tecnologías disponibles en el mercado nacional.

El documento está basado en las soluciones constructivas en madera más comúnmente utilizadas en el país, en normas nacionales para la determinación de acciones sobre las construcciones y en los criterios generales establecidos en el Eurocódigo 5 (Asociación Española de Normalización, 2016).

El objetivo general del trabajo es contribuir a la incorporación de madera de producción nacional en la construcción de viviendas, promoviendo la estandarización del proceso de diseño. Se espera que este documento brinde respaldo a los profesionales de la construcción, sirva como referencia para los técnicos involucrados en la aprobación de permisos de construcción y contribuya al desarrollo del sector industrial, al sistematizar procedimientos y otorgar confiabilidad a todos los interesados.

## Antecedentes y justificación

Dentro de las metas consensuadas por el Consejo Sectorial Tripartito Forestal-Madera, se encuentra la incorporación de 100000 m<sup>3</sup> de productos de madera en la construcción de viviendas, en la industria de la construcción en general y en la fabricación de muebles (Ministerio de Industria, Energía y Minería, 2012). Para alcanzar esta meta, se requieren fuertes políticas públicas de promoción del uso intensivo de madera y productos de ingeniería de madera en arquitectura e ingeniería civil. Estas políticas y acciones de promoción deben sostenerse en un mercado que ofrezca materiales estructurales adecuados, así como documentos técnicos y normativas que establezcan estándares de diseño y construcción específicos.

Estos factores, junto con la formación de recursos humanos y una estrategia de comunicación destinada a informar a los usuarios los beneficios de habitar espacios construidos con madera nacional, constituyen una base indispensable para el desarrollo de la tecnología de construcción con este material y, consecuentemente, para el desarrollo completo de la cadena forestal maderera.

La creación de este documento, consideramos, facilitará la correcta aplicación del citado Eurocódigo 5 en el país y brindará respaldo a los profesionales, contribuyendo a la sistematización de los distintos procedimientos, ya que ofrece al proyectista un instructivo que integra todas las etapas de diseño y establece, claramente, las especificaciones técnicas de los materiales a utilizar.

La propuesta está alineada con los objetivos de la Comisión Honoraria de la Madera que los autores integramos, que promueve el uso de maderas y productos de ingeniería de madera de origen nacional, provenientes de bosques renovables y manejados, de modo de garantizar el cumplimiento de las normas nacionales de calidad.

## El documento *Lineamientos de diseño estructural para viviendas de entramado ligero construidas con maderas de pino y eucalipto de Uruguay. Soluciones estandarizadas basadas en normas nacionales y en el criterio del Eurocódigo 5*

El documento se focaliza en proyectos de edificaciones de viviendas con estructura de madera realizadas con el sistema constructivo de entramado ligero y centrado en viviendas unifamiliares de uno y dos niveles.

Se proponen soluciones a problemas típicos de diseño y cálculo que pueden ser aplicadas a casos estandarizados, contemplando la falta de experiencia en la aplicación de la normativa europea —Eurocódigos— a proyectos realizados con maderas nacionales.

Se consideran las características físicas y mecánicas de los materiales de producción nacional, las normativas locales complementarias para el cálculo de acciones, y aquellas prácticas constructivas que son habituales en el medio nacional.

El documento incluye el diseño de uniones y tablas de dimensionado para las unidades estructurales más relevantes, tanto de cubiertas como de muros, tabiques y entpisos, considerando las distintas clases resistentes de la madera nacional.

Las soluciones que se ofrecen en el documento están restringidas al siguiente campo de aplicación:

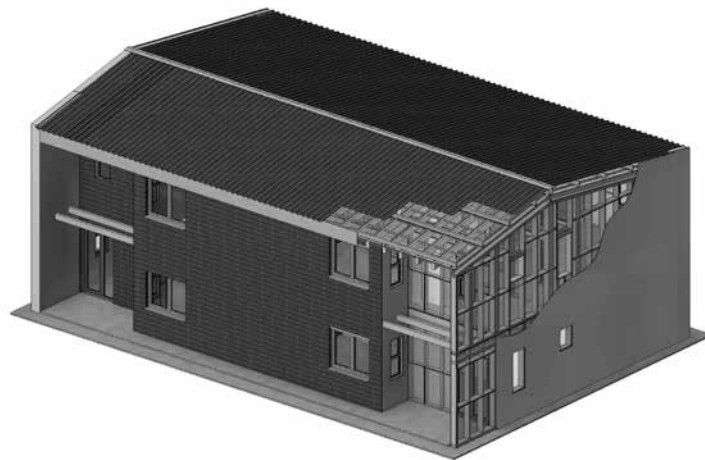
- La vivienda debe estar ubicada en Uruguay, ya que las acciones gravitatorias y la acción del viento fueron determinadas de acuerdo a las normas UNIT 33 (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 1991) y UNIT 50 (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 1984), respectivamente.
- La forma de la planta de la vivienda debe ser preponderantemente cuadrada o rectangular. Toda dimensión horizontal según sus direcciones principales debe ser igual o menor a 16 m y, la relación entre sus dimensiones [a/b], igual o menor a 2.
- La cubierta podrá tener una pendiente comprendida entre 15% y 30%.
- La altura máxima para viviendas de una planta deberá ser igual o menor a 5 m.
- La altura máxima para viviendas de dos plantas deberá ser igual o menor a 8 m.
- La dimensión mínima de los locales ubicados en la planta alta deberá ser igual o menor a 5 m.
- La calidad visual de la madera aserrada de pino —*Pinus taeda* o *Pinus elliottii*— deberá ser EC1 o ECO, y la de la madera aserrada de eucalipto

—*Eucalyptus grandis*— deberá ser EF1. La clase estructural de la madera laminada encolada deberá ser GL 20 h, GL 22 h o GL 24 h.

Se consideró una resistencia mínima de la estructura de 30 min en caso de incendio. Para el caso de elementos sin ninguna protección al fuego, la verificación de la seguridad fue realizada con el método de la sección reducida.

El documento presenta soluciones —dimensiones, especies y calidades— para los componentes típicos de las construcciones de entramado ligero empleados en la cubierta, en los cerramientos verticales y en los entrepisos.

La Fig. 1 muestra el prototipo de vivienda de dos niveles desarrollado como modelo en la Guía.



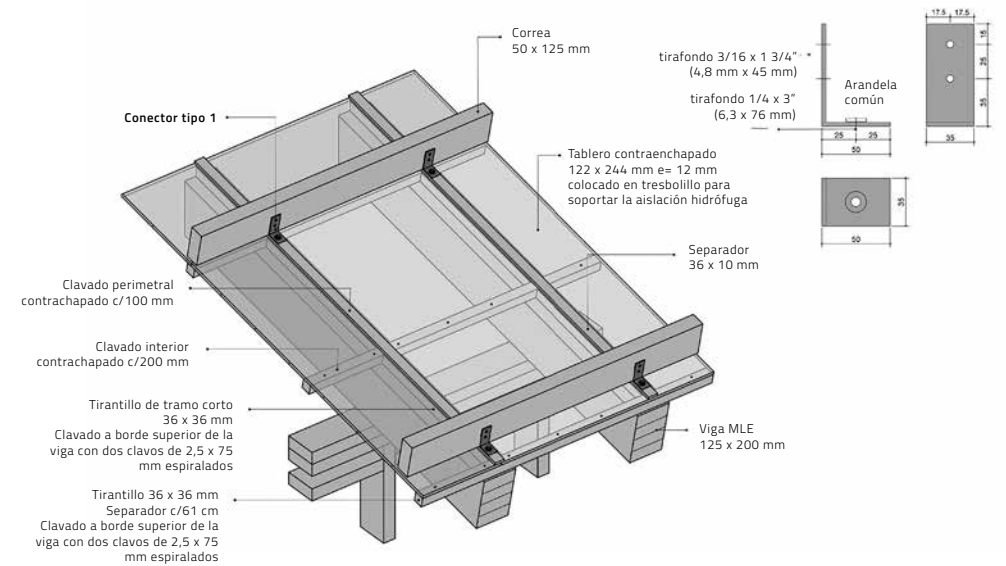
**FIGURA 1.** PROTOTIPO DE VIVIENDA DE DOS NIVELES CON ESTRUCTURA DE ENTRAMADO LIGERO DE MADERA.  
**FUENTE:** DOCUMENTO COMENTADO EN EL ARTÍCULO

Se incluye una gran cantidad de detalles constructivos que abarcan empalmes, uniones en nudos —con placas de conexión de tablero contrachapado y clavos de acero—, anclajes, etc. Además, se proveen los esfuerzos de levantamiento para poder diseñar anclajes alternativos.

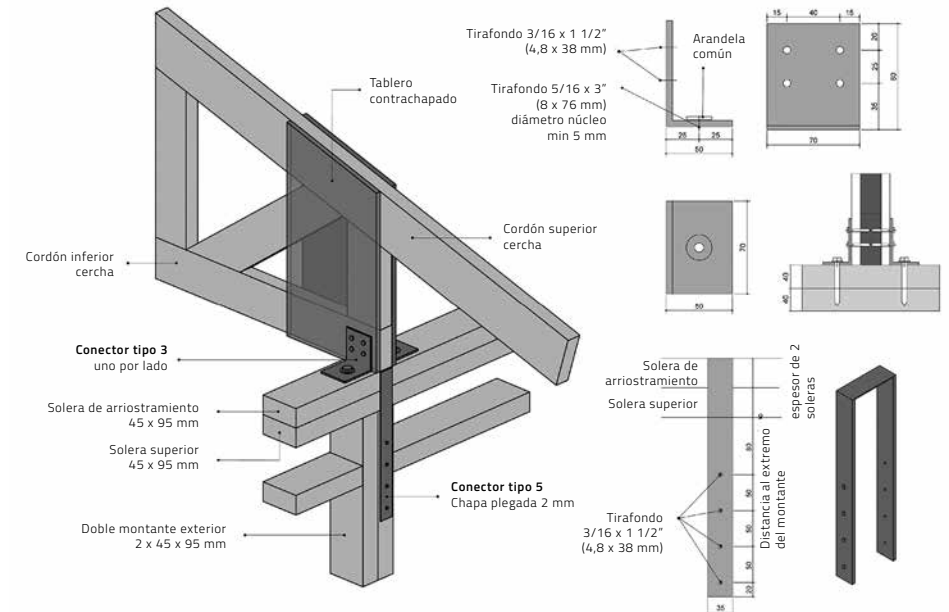
Componentes de cubierta: se presentan soluciones de correas de madera aserrada; vigas de madera aserrada con y sin protección frente al fuego —placas de yeso o protección superficial— y de madera laminada encolada sin protección frente al fuego; cerchas con una y dos pendientes de madera aserrada con protección frente al fuego, y diafragmas —planos rígidos inclinados sobre el borde superior de las vigas o planos rígidos horizontales debajo de los cordones inferiores de las cerchas—.

La Fig. 2 y la Fig. 3 muestran soluciones de cubiertas con vigas de madera laminada encolada y con cerchas de madera aserrada, respectivamente.

Componentes de los cerramientos verticales: se incluyen montantes de madera aserrada; se especifican longitudes necesarias de muros de corte, dinteles y pilares de madera aserrada y madera laminada encolada, con o sin protección



**FIGURA 2.** CUBIERTA CON VIGAS DE MADERA LAMINADA ENCOLADA. **FUENTE:** DOCUMENTO COMENTADO EN EL ARTÍCULO



**FIGURA 3.** DETALLE DEL APOYO DE UNA CERCHA SOBRE LA SOLERA. **FUENTE:** DOCUMENTO COMENTADO EN EL ARTÍCULO

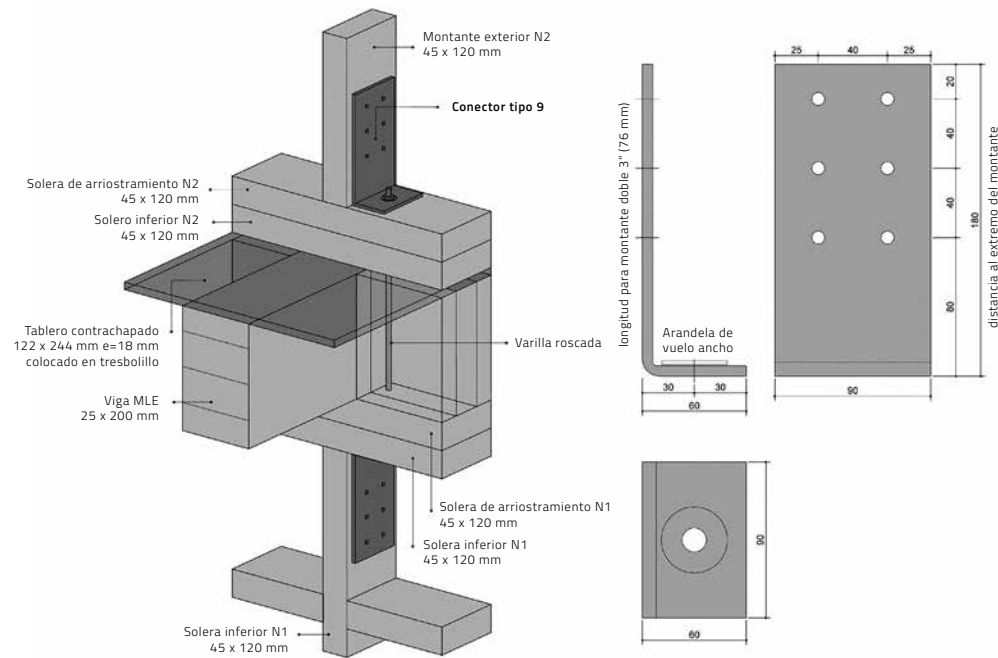


FIGURA 4. DETALLE DE CONECTORES ENTRE MONTANTES. FUENTE: DOCUMENTO COMENTADO EN EL ARTÍCULO

frente al fuego. Los muros portantes, en todos los casos, fueron considerados en el diseño estructural como elementos protegidos frente a la acción del fuego, ya que deben ser revestidos por placas de yeso.

La Fig. 4 muestra un detalle de conexión entre un montante de planta baja y otro de planta alta.

Componentes de los entrepisos: se ofrecen tres tipos de soluciones estandarizadas que tienen en consideración el adecuado control de las vibraciones inducidas por el tránsito humano. Entrepisos livianos sobre vigas —de madera aserrada y madera laminada encolada—; entrepisos compactos sobre vigas —de madera aserrada y madera laminada encolada—, y entrepisos macizos autoportantes —de madera aserrada—.

En las soluciones de entrepisos livianos y compactos, se proponen vigas que soportan el piso y se apoyan sobre las soleras de los muros portantes de la planta baja, en coincidencia con los montantes. Esta configuración de piso liviano es recomendable cuando no sea necesario alcanzar un nivel de aislación acústica elevado, mientras que la configuración de piso compacto es conveniente cuando se requiera un nivel de confort relativamente alto. Las soluciones de entrepisos macizos consisten en losas de tablas clavadas [NLT], cuyos extremos apoyan en forma continua sobre las soleras de los muros portantes de planta baja.

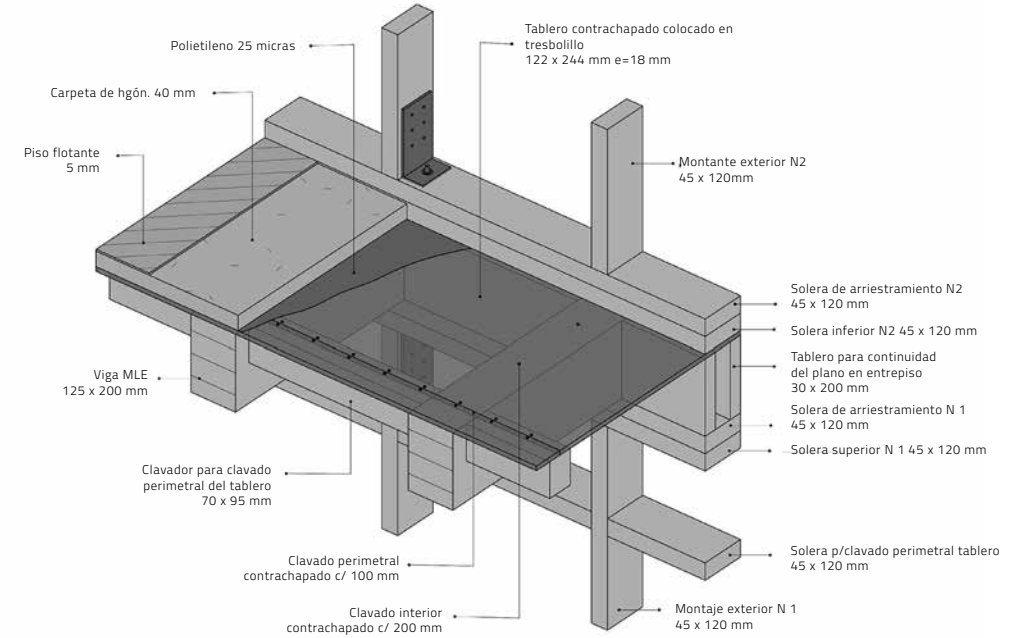


FIGURA 5. DETALLE DE UN ENTREPISO COMPACTO. FUENTE: DOCUMENTO COMENTADO EN EL ARTÍCULO

Se incluyen, además, soluciones de diafragmas de entrepiso.

La Fig. 5 muestra el detalle de un entrepiso compacto.

### Impactos esperados

Se espera que la aplicación de los lineamientos descritos en este documento contribuya a una mejor comprensión del material y de su tecnología por parte de todos los actores involucrados en la cadena productiva, y —por tanto— a una mayor utilización de la madera nacional en el sector de la construcción.

### Normas utilizadas para la elaboración del documento

UNIT 1261. (2018). *Madera aserrada de uso estructural - Clasificación visual - Madera de pino taeda y pino ellioti (Pinus taeda y Pinus ellioti)*. Montevideo: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

UNIT 1262. (2018). *Madera aserrada de uso estructural - Clasificación visual - Madera de eucalipto (Eucalyptus grandis)*. Montevideo: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

- UNIT 1264. (2019). *Estructuras de madera – Madera laminada encolada – Requisitos de fabricación*. Montevideo: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.
- UNIT 1265. (2020). *Estructuras de madera – Madera laminada encolada – Requisitos*. Montevideo: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.
- UNIT 33. (1991). *Cargas a utilizar en el proyecto de edificios*. Montevideo: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.
- UNIT 50. (1984), 2ª Revisión. *Acción del viento sobre construcciones*. Montevideo: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.
- UNE-EN 1995-1-1. (2016). *Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1.1: Reglas generales y reglas para edificación*. Madrid: AENOR.
- UNE-EN 1995-1-1. (2016). *Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1.2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego*. Madrid: AENOR.

## Referencias bibliográficas

- Asociación Española de Normalización. (2016). *Reglas unificadas para el cálculo de estructuras de madera* (UNE-EN 1995-1-2). Madrid: AENOR.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. (1984). *Acción del viento sobre construcciones* (Norma UNIT n° 50:1984). <https://www.unit.org.uy/normalizacion/norma/697>
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. (1991). *Cargas a utilizar en el proyecto de edificios* (Norma UNIT n° 33:1991). <https://www.unit.org.uy/normalizacion/norma/644>
- Ministerio de Industria, Energía y Minería. (2012). *Plan industrial, fase 1: automotor, biotecnológico, farmacéutico, forestal/madera, naval*. Montevideo: Mastergraf S.R.L.

## Una mirada holística

### Hacia una construcción sostenible

#### MARTÍN COMAS

Nacido en Montevideo, cuando había 340 ppm de CO<sub>2</sub> en nuestra atmósfera. Arquitecto (FArq-Udelar, 2009). Director en Arquitectura Regenerativa (sitio *web*: [linktr.ee/arre.bio](http://linktr.ee/arre.bio)). Miembro fundador del capítulo en Uruguay del Instituto Latinoamericano PassivHaus (ILAPH). Especialista en proyectos de altas prestaciones, en los que se combinan materiales naturales, bioconstrucción del siglo XXI y conceptos PassivHaus. Desde el 2019, hemos secuestrado en nuestras obras, aproximadamente, 100 t de carbono. Hemos evitado que además se emitan, aproximadamente, 400 t de CO<sub>2</sub>e.

#### La ciencia a disposición de una construcción más sostenible

A continuación, vamos a desarrollar una mirada capa a capa, *layer a layer*, sobre diferentes conceptos que, a nuestro entender, otorgan una manera de construir y proyectar arquitectura más actualizada a las necesidades climáticas de los próximos cincuenta a cien años. Cada estrato se explicará de manera unitaria, aunque se irán sumando hasta llegar a un todo.

Ya no se puede mirar una casa como una sumatoria de partes, hay que mirarla como un sistema, donde cada parte es igual de importante. Obtendremos así un resultado más robusto, superior y, por último, más elegante. Por eso hablamos de una mirada holística.

Por momentos, utilizaremos un lenguaje más coloquial y no tan técnico, puesto que la finalidad es simplificar de alguna forma los conceptos. Sepan disculparnos.

#### **BLOWER DOOR**

Si no tenés idea de lo que es un *Blower Door* [ver Fig.1], este artículo es para ti. El *Blower Door* existe desde 1977. Es una prueba normalizada de diagnóstico que permite medir el grado de hermeticidad de un edificio mediante la detección de infiltraciones de aire a través de su envolvente. Conocer el nivel de estanquidad de un inmueble es fundamental para construir edificios de bajo consumo energético. Una mayor hermeticidad permite, entre otras cosas, reducir la demanda energética.

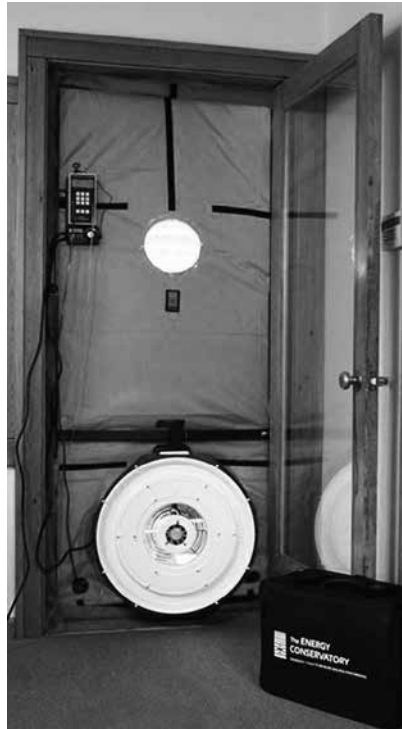


FIGURA 1. BLOWER DOOR.  
FUENTE: FOTOGRAFÍA DEL AUTOR  
DEL ARTÍCULO

Dicho «en criollo»: la casa se «infla» como un globo para medir el volumen de aire que hay que usar para mantenerla inflada. Sin embargo, lo más importante no es lo que mide esta prueba, sino el concepto de que las casas terminadas se pueden medir de una forma estandarizada.

A modo referencial, la sumatoria de agujeros en una casa estándar puede equivaler a un área aproximada de 1 m x 2 m (entre 15 ACH50 y 20 ACH50). Dicho «en criollo»: es lo mismo que tener la puerta de entrada de tu casa abierta las veinticuatro horas del día, los siete días de la semana. Por más nueva que sea la casa, si el resultado del *Blower Door* está dentro de estos parámetros, entonces lo que tenemos es una casa nueva, pero con tecnología obsoleta.

Pongamos esto en contexto. En Alemania existe un estándar llamado PassivHaus. En Darmstadt se construyó, en 1990, el primer edificio bajo este estándar. Para certificar PassivHaus, hay que hacer un ensayo de *Blower Door*. La sumatoria máxima de agujeros admitida desde 1989 es de 10 cm x 10 cm (0,6 ACH50) para obras nuevas y de 12 cm x 12 cm (1,04 ACH50) para reformas.

La reflexión obvia es la siguiente: ¿cómo puede ser que desde 1977 o 1990 existan en el mundo estándares de construcción con esos niveles de hermeticidad y estudios estandarizados que ayudan a medir científicamente las obras construidas y en Uruguay ni siquiera estemos enterados de ello! Lo que en otros países es algo común, cotidiano, acá ni siquiera está «arriba de la mesa».

## INTERCAMBIADOR DE CALOR, VENTILACIÓN DE DOBLE FLUJO

Ahora que tenemos una casa hermética, dimos un paso importante para lograr una casa de altas prestaciones, saludable y con mínimo consumo. El aire ya no entra por cualquier lado, ya no entra por la sumatoria de agujeros que tenemos en la casa. Gracias a esta hermeticidad, ahora somos nosotros quienes controlamos por dónde se filtra y también la calidad de lo que ingresa y egresa.

Notas:

¿Sabías que el 90% de nuestro tiempo lo pasamos en espacios interiores?

¿Sabías que el 30% de nuestra vida la pasamos en nuestro dormitorio?

¿Sabías que el 90% del tiempo que pasamos en nuestro dormitorio el aire alcanza niveles de CO<sub>2</sub> superiores al umbral de las 1000 ppm que recomienda la Organización Mundial de la Salud para establecer si un ambiente es saludable?

¿Estás dispuesto a levantarte cada una hora durante todas las noches para evitar que no se supere ese umbral?

¿Estás dispuesto a dormir con 10 °C (que sería la temperatura que tendrías si abrieras la ventana quince minutos cada una hora durante una noche de invierno)?

Gracias a la hermeticidad lograda en estas casas de altas prestaciones, tenemos la posibilidad de dar solución a todas estas problemáticas. Acá es donde aparece un equipo centralizado (o descentralizado) de ventilación de doble flujo [ver Fig. 2].

¿Qué es un intercambiador de calor de doble flujo? Sin mezclarse, el aire que se extrae de la vivienda a 21 °C se cruza con el aire que entra a 7 °C y, mediante varias capas (como un radiador de un auto), el aire que sale le transfiere su energía al que entra, de forma tal que el que entra, en vez de entrar a 7 °C, entra a 19 °C, y el que sale, en vez de salir a 21 °C, sale a 9 °C.

De esta forma, se logra una de las mayores eficiencias energéticas que podamos imaginar. Estamos reduciendo drásticamente los recursos que necesitaríamos para calefaccionar la casa, ya que el mínimo de aire ahora es de 19 °C. Solamente tenemos que lograr pasar ese aire de 19 °C a 21 °C.

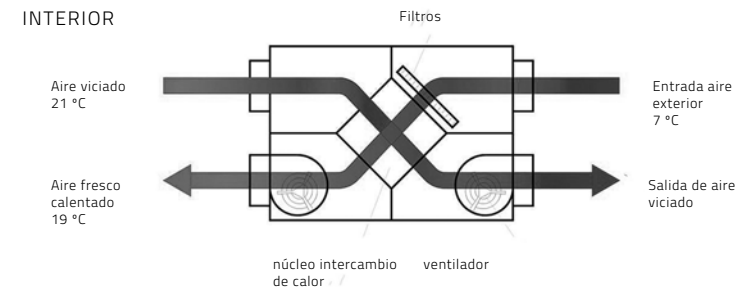


FIGURA 2. ESQUEMA DE LA VENTILACIÓN DE DOBLE FLUJO. FUENTE: ALEMARQUITECTURA.COM

Además de esta economía, con un sistema centralizado de ventilación de doble flujo logramos tener una distribución pareja del aire en todas las habitaciones de la casa. De esta forma, eliminamos la situación de encontrar 5 °C más frío un dormitorio o una habitación que no se esté usando cuando venimos del living-comedor. Tenemos una distribución del calor pareja, lo que nos brinda máximo confort.

Otra de las ventajas de estos equipos es que se calculan para que su caudal renueve el 100% del aire de la casa cada tres horas. Además, como están centralizados, ya aprovechamos y les ponemos un filtro. Podemos decir, entonces, que el aire interior de estas casas es todo el tiempo más puro; incluso, más que el aire exterior.

Al tener aire puro y renovado, superamos las prestaciones que nos brinda la ventilación cruzada: logramos pasar todas las noches en nuestros dormitorios sin superar el umbral de CO<sub>2</sub>, nuestros hijos se mantienen a resguardo de alergias durante las temporadas en que estas suelen ser frecuentes, se regula la humedad relativa interior, por lo que en los baños no tenemos más esporas en los cielorrasos. En conclusión, obtenemos ambientes interiores saludables. ¡Y no nos olvidemos que todo esto lo hacemos calefaccionando menos!

Conclusiones (sabemos que van a ser polémicas):

- ventilación cruzada: obsoleta;
- ventanales corredizos: obsoletos;
- extractores de cocina: obsoletos;
- extractores de baño: obsoletos.

#### PUENTES TÉRMICOS, ABERTURAS DE ALTAS PRESTACIONES, PROTECCIÓN SOLAR

Sigamos avanzando. Ya tenemos una casa hermética que consume muy poco, es saludable y además renueva el 100% de su aire interior cada tres horas. Ahora debemos prestar atención a los detalles. Detalles que resultan insignificantes cuando tenés una puerta abierta las veinticuatro horas del día, los siete días de la semana, pero que empiezan a tornarse importantes cuando estás en búsqueda de una casa de altas prestaciones.

Estas construcciones no pueden tener puentes térmicos y agradecen protecciones solares externas para las épocas de verano.

- Losas de hormigón que salen de la envolvente térmica para generar balcones: obsoletas;
- plateas de hormigón apoyadas directamente en el terreno, sin aislación térmica: obsoletas;
- aberturas de aluminio sin ruptura de puente térmico: obsoletas;
- aberturas de vidrios simples: obsoletas;
- vidrios DVH con cámaras de 12 mm o menos: obsoletos;
- vidrios DVH con separadores metálicos: obsoletos,
- etc.

Tenemos que cambiar muchas de las cosas que hacemos a diario sin darnos cuenta, pero, ojo, de nada sirve hacer una de estas cosas sin hacer las otras. Es vital entender la casa como un todo, como un sistema. Tenemos que prestar atención a los detalles para poder lograr una casa de altas prestaciones.

#### La importancia del análisis del ciclo de vida de la construcción

Hemos ido agregando capa tras capa y así hemos logrado construir una casa con el estándar más exigente de eficiencia energética que hay a nivel mundial: Passiv Haus. Además, hemos conseguido una casa de altas prestaciones con mínimo consumo. Una casa saludable para quienes la ocupan.

Ahora te pido que no te desanimes con lo que se viene, pues hasta aquí solo hemos descripto una de las tres partes que deben tenerse en cuenta. Hablemos ahora del concepto «análisis de ciclo de vida» [ACV; LCA, por sus siglas en inglés] aplicado a la construcción.

Definición parcial de Wikipedia («Análisis de ciclo de vida», 2023):

El ACV es una metodología que se diferencia por el uso de métodos cuantitativos y por su particularidad de identificar los aspectos ambientales clave de un producto, proceso o servicio y cuantificar sus impactos ambientales potenciales a lo largo de su ciclo de vida, comenzando por la extracción de materias primas y la producción de energía utilizada para fabricar el producto, uso del mismo y disposición final.

Aparecen conceptos como CO<sub>2</sub>e o *Global Warming Potential* [GWP] y *Environmental Product Declaration* [EPD].

El ACV se puede dividir en tres grandes etapas:

1. **Carbono embebido:** todas las energías y todas las emisiones que se necesitaron para fabricar y entregar al cliente el producto. En el caso de la construcción, todas las energías y todas las emisiones que se necesitaron para fabricar los materiales y construir la casa hasta el momento en que ingresa la familia a hacer uso de esta.
2. **Carbono operativo:** todas las energías y todas las emisiones que consumirá la casa para tener confort durante sus sesenta o cien años de uso —acá es donde interviene el PassivHaus, ya que nos brinda máximo confort con mínimo consumo—.
3. **Disposición final:** todas las energías y todas las emisiones que se necesitan tanto para desmantelar la casa construida como para que todos los elementos vuelvan al origen, cerrando el ciclo de vida.

La mayoría de los estándares internacionales referidos a la construcción hacen mayor hincapié en la parte del carbono operativo. Desde nuestro punto de vista, esto puede estar relacionado con el hecho de que es el más fácil de medir y controlar.

Igualmente, en los últimos años se está hablando de la importancia del carbono embebido. Se estima que el consumo de energía y las emisiones de esta etapa es el mismo que en la etapa del carbono operativo. Pero con una diferencia temporal importante: el carbono embebido se consume todo junto previo a la entrega de la casa, mientras que el total del carbono operativo se produce en un lapso de cien años.

Uno de los problemas que tenemos hoy es el exceso de CO<sub>2</sub>e en la atmósfera: estamos por las 440 ppm cuando no deberíamos superar las 300 ppm. Suficiente razón, entonces, para tener en cuenta estas emisiones inmediatas generadas por la construcción en la etapa de carbono embebido, ya que pueden tener un impacto significativo.

De hecho, Naciones Unidas habla de que el carbono embebido del rubro construcción equivale aproximadamente a un 20% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Esto es similar al 20% emitido por todo el transporte mundial. Si consideramos el 20% extra que emiten las casas por el carbono operativo, estamos hablando, entonces, de que la industria de la construcción, a nivel mundial, es la industria que más emisiones genera.

### ¿Qué podemos hacer?

Primero, reducir al máximo el uso del hormigón armado. Es el material más usado del planeta y el responsable del 10% de las emisiones.

Segundo, dejar de usar la aislación térmica que estás usando y emplear celulosa proyectada. La celulosa proyectada es un material reciclado que tiene excelentes propiedades aislantes. A diferencia de los materiales sintéticos, la celulosa proyectada mantiene estas propiedades aun en condiciones de altas humedades relativas, tales como las que se dan en Uruguay durante todo el año. Por último, no presenta diferencias económicas con respecto a las soluciones sintéticas.

Tercero, dejar de hacer movimientos de suelo para poner la casa sobre una platea. Existen otras soluciones para hacer las casas elevadas. Resulta más económico, además de que es mucho mejor tanto desde el punto de vista térmico como medioambiental.

Cuarto, usar madera nacional. A partir de los 10 cm sobre nivel de suelo, usemos madera.

Estas cuatro acciones constituyen un resumen de cosas que se pueden hacer ya mismo en Uruguay, pues tienen un impacto tremendo en términos medioambientales, entran dentro del mismo presupuesto que estás manejando y, en algunos casos, superan la calidad técnica de los materiales estándar. Es decir, no hay excusas.

### CARBON IMPACTS OF INSULATION

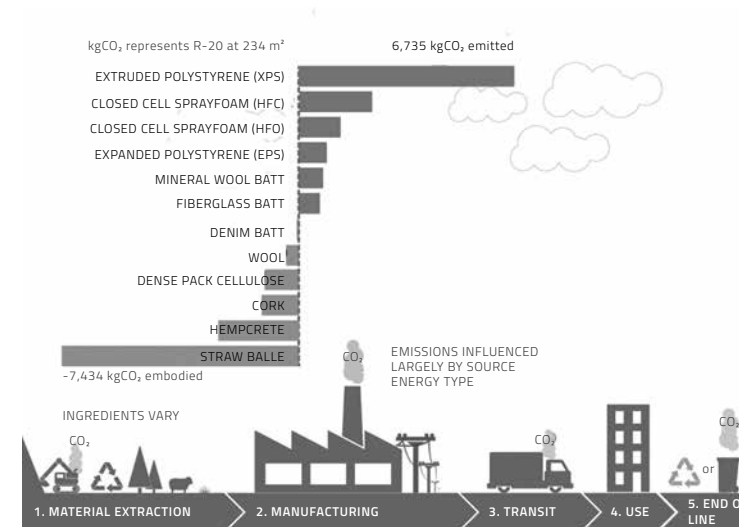


FIGURA 3. EMISIONES SEGÚN AISLANTE TÉRMICO. FUENTE: BUILDERSFORCLIMATEACTION.ORG/

### ¿Qué estamos haciendo?

En Arquitectura Regenerativa usamos todos estos conceptos desde el 2019, año en el que descubrimos tanto el estándar PassivHaus como la bioconstrucción. Combinamos los conceptos PassivHaus con el uso de materiales naturales y locales, además de fomentar la mano de obra nacional.

En una casa construida en Sauce de Portezuelo, uno de los propietarios dejó de usar su inhalador. En una casa construida en El Pinar, de 150 m<sup>2</sup> interiores, están consumiendo la misma energía que consumían en su apartamento anterior, de 60 m<sup>2</sup>, pero ahora tienen toda la casa a igual temperatura y no tienen condensación ni en las aberturas ni en los baños.

En una casa construida en Canelones, de 185 m<sup>2</sup>, la calefacción fue resuelta con dos aires acondicionados *inverter* de 12.000 BTU cada uno. En verano solamente encienden una hora por día del living, a las 19 h, cuando entran a la casa. En invierno encienden dos horas por día ese y el del dormitorio, también a las 19 h. Esta casa tiene el honor de ser la primera casa uruguaya en la base de datos internacional del PassivHaus Institute. Además, cabe agregar que es una casa que secuestra carbono, dado que se usaron fardos de paja comprimida en el piso y en las paredes.

En una casa construida este año en Punta Colorada —en seis semanas—, se llegó a finales de agosto sin que aún fuese necesaria la colocación de un sistema de calefacción. Cuando necesitan, prenden una estufa eléctrica de las de cuarzo, una o dos horas antes de irse a dormir.



FIGURA 4. OBRAS REALIZADAS. FUENTE: FOTOGRAFÍAS DEL AUTOR DEL ARTÍCULO

Todas estas viviendas serán por lo menos un 80% compostables al final de su vida útil, dentro de cien años. Además, están por debajo de los 1500 U\$/m<sup>2</sup> (venta), fueron construidas en menos de ocho meses, son bioconstrucciones de altas prestaciones, tienen el test del *Blower Door* realizado, respetan el medioambiente y son sanas y amigables para las familias que las habitan.

## Propósito

En Arquitectura Regenerativa estamos atacando las tres partes del ciclo de vida al mismo tiempo. Proyectamos casas con carbono embebido mínimo o negativo. Proyectamos casas con carbono operativo superreducido, pero manteniendo el máximo confort. Proyectamos casas cuya disposición final se puede compostar en el propio terreno.

En Arquitectura Regenerativa no nos interesa proyectar casas estéticas con el único fin de que salgan en las fotos de las revistas. Obviamente, esa estética es importante, pero no debe ser un fin en sí mismo. Entendemos que hay belleza en la simplicidad, en la salud y en el alto confort. Aceptamos con orgullo el desafío y la responsabilidad de incorporar estos otros conceptos que, si bien complejizan bastante más nuestra profesión, nos abren puertas a otras bellezas más robustas y que contienen un mayor significado. En Arquitectura Regenerativa proyectamos con propósito, polinizamos soberanía, construimos legado.

Somos conscientes de que no tenemos todas las respuestas. Nos queda un montón por aprender, pero para aquello que esté a nuestro alcance estamos más que a disposición, para ayudar y compartir lo aprendido en el corto pero intenso camino que hemos recorrido. Estamos convencidos de que esto es posible y también de que este es el camino.

## Estándares: PassivHaus, LEED, EDGE, WELL, MAS, entre otros

### PASSIVHAUS



FIGURA 5. IZQ.: LOGO DE PASSIVHAUS; DCHA.: RETRATOS DE FUNDADORES.  
FUENTE: WIKIPEDIA («PASSIVHAUS», 2023)

Dice Wikipedia («Passivhaus», 2023):

*Passivhaus* (del alemán casa pasiva, y del inglés *passive house standard*) es un estándar para la construcción de viviendas originado a partir de una conversación (en mayo de 1988) entre los profesores Bo Adamson de la Lund University, Suecia, y Wolfgang Feist del *Institut für Wohnen und Umwelt* [Instituto de Vivienda y Medio Ambiente].

[...] Se basa en levantar construcciones que cuenten con gran aislamiento térmico, un riguroso control de infiltraciones y una máxima calidad del aire interior, además de aprovechar la energía del sol para una mejor climatización, reduciendo el consumo energético en el orden de un 70% (sobre las construcciones convencionales).

[...] El primer edificio construido con el estándar Passivhaus se localizó en Darmstadt, Alemania, en 1990, y fue ocupado en los años siguientes. En septiembre de 1996 el *Passivhaus-Institut* fue fundado en Darmstadt con el objetivo de promocionar y controlar este estándar. Se estima que se han construido miles de casas con el *Estándar Passivhaus*, muchas de estas en Alemania y Austria.

### Otros estándares

Resulta que existen muchísimos estándares que hablan de una construcción más eficiente. LEED, EDGE y WELL son algunos de los varios que existen internacionalmente. Hace poco salió en Uruguay la certificación MAS, impulsada por el LATU-LSQA.

### ¿Por qué PassivHaus?

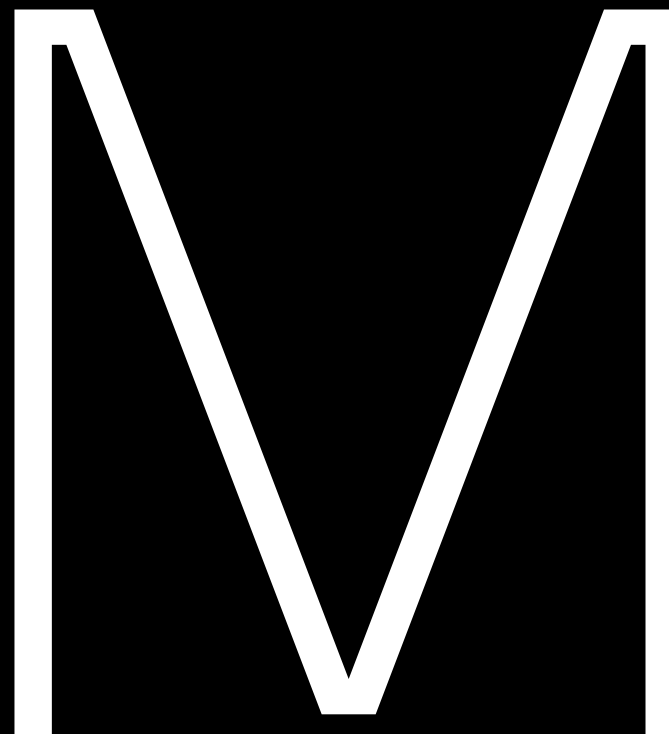
Cada estándar tiene una impronta que aporta valor desde un lugar diferente, pero nosotros estamos convencidos de que el estándar PassivHaus es el más exigente, más independiente y el que pone la vara más alta. No es nuestro estilo hacer las cosas a medias y por ello tenemos al PassivHaus como estándar de referencia para nuestros trabajos.

Somos miembros fundadores del capítulo uruguayo del Instituto Latinoamericano PassivHaus,<sup>1</sup> un instituto que brinda cursos en español y *online*, lo que es un gran avance, ya que en mi época había que ir a España a dar el examen. Con presencia en más de diecinueve países de Latinoamérica, América Central y América del Norte también tiene vínculo directo con PassivHaus Alemania, PassivHaus España y varias universidades a nivel regional y mundial.

### Referencias bibliográficas

Análisis de ciclo de vida. (2023, 23 de mayo). En *Wikipedia*. [https://es.wikipedia.org/wiki/An%C3%A1lisis\\_de\\_ciclo\\_de\\_vida](https://es.wikipedia.org/wiki/An%C3%A1lisis_de_ciclo_de_vida)

1. <https://www.passivhaus.lat/> Passivhaus. (2023, 2 de febrero). En *Wikipedia*. <https://es.wikipedia.org/wiki/Passivhaus>



## Planificación del territorio para un saneamiento adecuado

LUCÍA CHABALGOITY LAMAS

Arquitecta (FArq, Udelar, 2006), especialista en Manejo Costero Integrado (Udelar, 2022) y técnica en instalaciones sanitarias (UTU, 2000). Ha recibido formación ambiental a nivel nacional (Facultad de Ciencias, Udelar) e internacional (Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales, Universidad de Cádiz), y en cálculo hidráulico (Universidad Politécnica de Valencia). Desde el 2014, es funcionaria en el Ministerio de Ambiente, vinculada a procesos de planificación como el Plan Ambiental Nacional para el Desarrollo Sostenible y Evaluación Ambiental Estratégica. Desde el año 2007, desempeña tareas de investigación y docencia en la FADU (Udelar) y es profesora adjunta de la Unidad Curricular Instalaciones 1. En el ámbito profesional, es arquitecta proyectista y directora de obra de instalación sanitaria en programas tanto de vivienda como educativos, comerciales, entre otros.

### PALABRAS CLAVE

DERECHOS HUMANOS; GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA; AMBIENTE Y SALUD

### Resumen

El artículo n°47 de la Constitución de la República reconoce el acceso al agua potable y al saneamiento como derechos humanos fundamentales. Adicionalmente, Uruguay asumió —en 2015— compromisos internacionales con los Objetivos de Desarrollo Sostenible [ODS], uno de los cuales es el acceso a saneamiento para todos.

Existe una definición consensuada del concepto «agua potable» a nivel internacional y nacional, lo cual no sucede en el caso de «saneamiento»; los distintos criterios expresan coberturas no comparables (López Díaz, 2015). Nuestro país ha avanzado en este sentido y, actualmente, se entiende el saneamiento como un sistema que comprende diferentes etapas y varias soluciones bajo el concepto «saneamiento adecuado».

En Uruguay, la cobertura de agua potable es casi del 100% para población nucleada (OSE, 2023), pero el saneamiento presenta deficiencias que se evidencian en enfermedades de transmisión hídrica (Assandri, 2018) y afectaciones negativas en el ambiente (Ministerio de Ambiente, 2020).

Si bien en los últimos quince años Uruguay avanzó en un marco normativo, conceptual y de gestión, le falta prosperar a escala padrón/edificio. Las normas departamentales tienen el desafío de abordar un saneamiento adecuado y contribuir a una gestión del agua integral y sustentable. Como punto de partida, la viabilidad de un sistema de saneamiento debe formar parte del proceso de planificación, sin ser solo una sumatoria fragmentada de elementos que lo conforman para dar respuesta a un territorio ya planificado.

## El saneamiento como derecho humano fundamental

La reforma<sup>1</sup> del artículo n° 47 de la Constitución de la República (Uruguay, 1967), establece el acceso al agua potable y al saneamiento como derecho humano fundamental. Asimismo, expresa que la política nacional de aguas y saneamiento se basará en una gestión sustentable, anteponiendo el orden social al económico.

Positivamente, el concepto «agua potable» presenta definiciones consensuadas por todos los actores vinculados al suministro, el control y la gestión. La Norma UNIT 833:2008 la define como «agua apta para consumo humano que no represente riesgos para la salud durante toda la vida del consumidor o que genere rechazo por parte del mismo» (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2008, p. 2) y establece los parámetros a considerar.

Esto habilita a que parte del objetivo expresado en la Constitución tenga un objeto claro y medible. Obras Sanitarias del Estado [OSE] señala una situación favorable, ya que la cobertura para población nucleada es del 99%. Adicionalmente, el derecho social al agua se refleja en mayor medida en el modelo tarifario.

En el marco de la crisis hídrica transitada en Uruguay, los parámetros de agua potable habilitan la gestión del recurso; el Ministerio de Salud Pública [MSP] recurre a estimar nuevos valores máximos, que diariamente se difunden a la población.

En lo que refiere a nuestra actividad como arquitectos, los gobiernos municipales incorporan la Norma UNIT 833:2008; la instalación sanitaria debe ofrecer agua potable a los usuarios, en cantidad y calidad (IMM, 2009). Diámetros y materiales de cañerías, valvulerías, depósitos de agua, sistemas de presurización y bombeo, ubicación en el padrón y en la tipología de los distintos elementos se pueden hacer operativos en virtud de contar con reglas del juego claras.

En lo relativo al saneamiento, ¿se puede dar cumplimiento al mandato constitucional cuando no está consensuado a nivel de planificación territorial cómo se materializa el objeto? Desde nuestro quehacer profesional, ¿tenemos reglas del juego claras —a través de los gobiernos municipales— respecto de cómo abordar un saneamiento desde una gestión sustentable en caso de no contar con un sistema de red de colectores? Un depósito impermeable de 5 m<sup>3</sup> en un hogar de cuatro habitantes, al que deberá de llamarse camión barométrico cada 10 días promedio: ¿se considera una solución en la cual prima el orden social por sobre el económico, para el usuario?

Las deficiencias en saneamiento conllevan problemas ambientales (Soumestre, 2017), sociales y económicos. Nuestro país cuenta con varios estudios que evidencian presencia de parásitos en niños en zonas urbanas (Assandri et al., 2018; Lena Lacuesta, 2006) y afectaciones negativas en el ambiente (Ministerio de Ambiente, 2020).

Hasta el año 2020, en el que se aprobó el Plan Nacional de Saneamiento, se carecía de una definición acordada. A modo de ejemplo, el Ministerio de Desarrollo Social [Mides] —en su Observatorio Social— categoriza como *viviendas con saneamiento inadecuado* a aquellas que disponen de servicio higiénico que no

cuenta con cisterna o cuyo sistema de evacuación no es red general o fosa séptica (Mides, 2020). Siguiendo esta categorización realizada por el Mides, solamente un 4% de las viviendas del país estaba, en el 2018, en esa situación. Por otro lado, si observamos el mapa con cobertura de saneamiento de la Intendencia Municipal de Montevideo [IMM], vemos que refiere únicamente a la zona donde hay presencia de colectores.

De esta manera surge, en primer lugar, la necesidad de consensuar la definición de saneamiento, para avanzar en lo establecido por el artículo n° 47 de la Constitución.

## Saneamiento adecuado

El Decreto n° 78/010 (Uruguay, 2010), reglamentario de la Política Nacional de Aguas —Ley n° 18610 (Uruguay, 2009)—, define varios sistemas de saneamiento constituidos por etapas como almacenaje, transporte, tratamiento y disposición. Surgió así una mirada más integral, que supera las soluciones fragmentadas por componentes y el precepto de que el saneamiento es exclusivamente una red de colectores, rompiendo de esta manera tanto con la visión dicotómica colector/pozo negro como con cierto tipo de propuestas sin contenido técnico, mal llamadas «ecológicas».

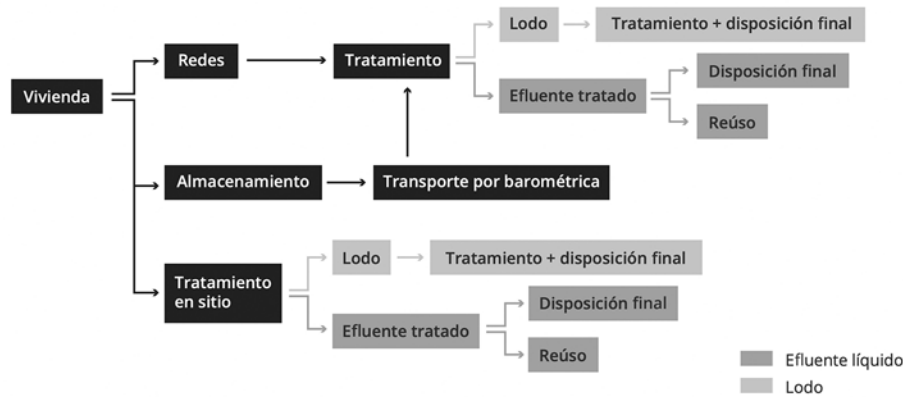
A partir de la mencionada Ley n° 18610, retomando sus principios de gestión integrada de los recursos hídricos y criterios de sustentabilidad, se elabora el Plan Nacional de Aguas (MVOTMA, 2017). Este plan define entre sus objetivos nacionales lo expresado en el artículo n° 47 de la Constitución: el acceso al agua potable y el saneamiento como derecho humano fundamental, así como la necesidad de disponer de agua en cantidad y calidad, en el marco de un desarrollo sostenible. Como desafío para el saneamiento en el escenario a 2030, señala el «acceso a saneamiento adecuado para toda la población» (MVOTMA, 2017, p.126).

El avance en definición y marco conceptual se desarrolla en el Plan Nacional de Saneamiento [PNS] (DNA y SNAACC, 2019). El sistema de saneamiento adecuado reúne tres características: gestión segura; marco normativo, infraestructura y recursos para gestión, y control y asequibilidad universal. De esta manera, se abordan las tres dimensiones de la sostenibilidad, teniendo como foco a la población y el ambiente.

Este consenso a nivel nacional respecto del término expresado en la Constitución es un avance hacia su cumplimiento como derecho universal. Su consideración como sistema —es decir, como conjunto de elementos interrelacionados, que responden a un objetivo— es sustancial.

El sistema presenta etapas y recorre todo el proceso desde la generación en la vivienda hasta su disposición final. No hay un único sistema de saneamiento adecuado ni un sistema *a priori* que sea adecuado; esto varía con la solución presentada para cada etapa, según el usuario/territorio/ambiente en que se desarrolle. Por lo tanto, su definición debe realizarse con la planificación del territorio.

1. Realizada en el año 2004



**FIGURA 1.** ESQUEMA SIMPLIFICADO DE CONFIGURACIÓN DE SANEAMIENTO.  
**FUENTE:** TOMADO DE *PLAN NACIONAL DE SANEAMIENTO* (P. 23) DE DIRECCIÓN NACIONAL DE AGUAS Y SECRETARÍA NACIONAL DE AMBIENTE, AGUA Y CAMBIO CLIMÁTICO. (2019)

### GESTIÓN EN FORMA SEGURA

Esta característica implica que los efluentes no estén en contacto con las personas en el transcurrir de todo el proceso del sistema, brinden garantías de salubridad y eviten afectación negativa del ambiente.

Un depósito impermeable con sus efluentes transportados por un camión barométrico, con un eventual tratamiento y disposición en un lugar que no afecte la salud de las personas ni genere efectos negativos en el ambiente, podría ser considerado saneamiento adecuado, en una vivienda estacional.

Un sistema de tratamiento primario mediante fosa séptica con un tratamiento secundario de humedales de flujo subsuperficial —que disponga sus efluentes en un padrón rural y brinde garantías en el tratamiento— también podría ser considerado saneamiento adecuado.

Asimismo, un sistema por red de colectores que no presenta tratamiento y vierte en el Río de la Plata —generando eutrofización en temporada estival y presencia de coliformes en la playa— no debería considerarse como tal.

### MARCO NORMATIVO, INFRAESTRUCTURA ADECUADA Y RECURSOS

Este ítem es medular desde la práctica disciplinar. Como arquitectos, debemos realizar un proyecto de instalación sanitaria en el marco de los permisos de construcción ante los gobiernos departamentales o viabilidad ante OSE.

De presentarse un sistema por red de colectores, el cuadro normativo es claro; si es separativo, solamente vertemos los efluentes generados en la vivienda; si es unitario, adicionamos el agua pluvial. Vinculada a la altimetría, la profundidad máxima de la cámara de inspección está condicionada por las características del colector. Pero donde hay ausencia de colectores, la norma sanitaria interna carece de marco de referencia para avanzar en aplicar una propuesta de saneamiento adecuado, mayormente porque no se ha planificado. Y,

específicamente, no existen normas operativas a esa escala, instrumentos y recursos para gestión y control.

Una gran área de la zona metropolitana carece de red de colectores y se propone un sistema estático con transporte de barométrica ¿Cuáles son los controles para que los depósitos sean realmente impermeables? ¿Existen indicadores como la cantidad de camiones barométricos que solicita una vivienda en un periodo de tiempo? ¿Se presentan garantías ambientales para la disposición de los camiones barométricos?

A modo de ejemplo, según el censo 2011, Canelones presenta un 15% de cobertura de colectores. En las Figuras 1 y 2, se observa el sector de la localidad de Las Piedras atravesado por el Arroyo del Colorado. El mayor número de padrones promedia un área de 400 m<sup>2</sup> y la red de colectores alcanza a una mínima fracción. A la fecha, la solución de saneamiento implica depósitos estáticos y puede generar afectaciones en el ambiente, como contaminación en la cuenca del Arroyo del Colorado, tributario del río Santa Lucía.

Surge la necesidad de una planificación territorial y normativa de sanitaria interna que viabilice un proyecto en el marco de un saneamiento adecuado, en vínculo con los planes y políticas nacionales para que, desde la arquitectura, podamos contribuir a un ambiente sustentable y una mejor calidad de vida de la población y su salubridad.

### ASEQUIBILIDAD UNIVERSAL

El Plan Nacional de Saneamiento contribuye al cumplimiento del mandato constitucional, al definir entre sus principios rectores que el servicio de saneamiento debe ser brindado a través de una tarifa asequible, así como de una prestación viable y económicamente sostenible.

Nuevamente, si pensamos en la solución de un depósito impermeable al que una familia promedio debería llamar tres veces por mes en caso de ser residencia permanente, ¿puede considerarse asequible con el costo de la tarifa actual? ¿Es asequible, pensando en el acceso de un camión barométrico que debe ingresar a zonas que no cuentan con infraestructura vial hacia el padrón?



**FIGURA 2.** VISUALIZADOR DE OSE EN LA LOCALIDAD DE LAS PIEDRAS. **FUENTE:** [HTTPS://GISDEV.OSE.COM.UY/VISOR](https://gisdev.ose.com.uy/visor)



**FIGURA 3.** VISUALIZADOR DEL OBSERVATORIO AMBIENTAL DEL MINISTERIO DE AMBIENTE. **FUENTE:** [HTTPS://WWW.AMBIENTE.GUB.UY/VISUALIZADOR/INDEX.PHP?VIS=SIG#](https://www.ambiente.gub.uy/visualizador/index.php?vis=sig#)

Si la opción es un sistema con tratamiento y disposición en sitio, ¿cómo se puede contribuir a la asequebilidad en el mantenimiento y monitoreo de la calidad del efluente?

### Distintos sistemas de saneamiento según el Decreto n° 78/010

El Decreto n° 78/010 (Uruguay, 2010) expresa alternativas a considerarse como sistemas de saneamiento. A continuación, se presentan alguna de ellas.

#### RED DE ALCANTARILLADO CON PLANTA DE TRATAMIENTO O DISPOSICIÓN FINAL MEDIANTE EMISARIO

Este sistema está constituido por la red de colectores separativos o unitarios (o mixtos). El prestador del servicio en la capital es la Intendencia de Montevideo y, en el resto del país, OSE.

La instalación sanitaria incluye la cámara de inspección [CI] n° 1 que se conecta a colector.

La Ley n° 18840 (Uruguay, 2011) establece la obligatoriedad de conexión a las redes públicas de saneamiento para todos los inmuebles con frente a estas, ya sean existentes o futuras.

#### DEPÓSITO IMPERMEABLE CON VACIADO POR BAROMÉTRICA, DEBIENDO LOS CAMIONES DESCARGAR EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO

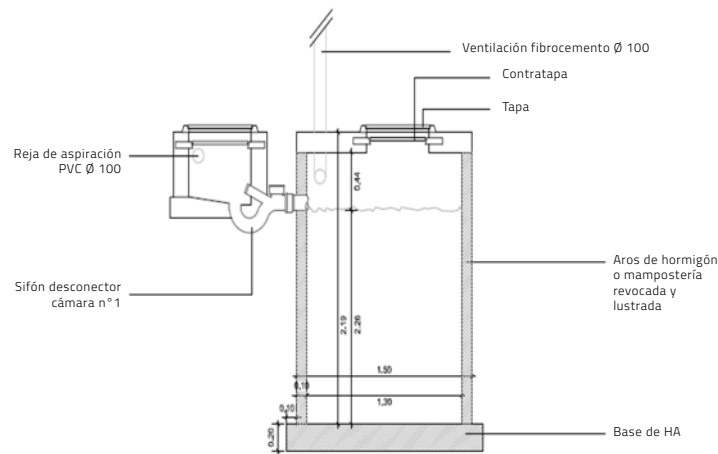


FIGURA 4. CI N° 1 Y DEPÓSITO IMPERMEABLE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En este caso, la instalación sanitaria interna incluye, además de la CI n° 1, el depósito impermeable.

La mayoría de las normas define una capacidad mínima útil de 5000 l para vivienda, así como un volumen de abastecimiento en el orden de 150 l por habitante por día. Por lo tanto, se deduce que un hogar constituido por cuatro habitantes deberá acudir cada nueve días al servicio de barométrica.

#### RED DE EFLUENTES DECANTADOS CON SISTEMAS DE LAGUNAS PARA EL TRATAMIENTO DE LOS LÍQUIDOS Y VACIADO PERIÓDICO DE LODOS DE FOSA SÉPTICA

El sistema de efluentes decantados habilita colectores con menores pendientes y diámetros en virtud de las características del efluente. Para ello, previamente debe realizarse un tratamiento primario mediante una fosa séptica, y sus lodos deben ser retirados periódicamente por camión barométrico, para ser tratados y dispuestos.

Este sistema es utilizado por Mevir en varios grupos de viviendas, a través de cámara séptica en cada unidad o colectiva.

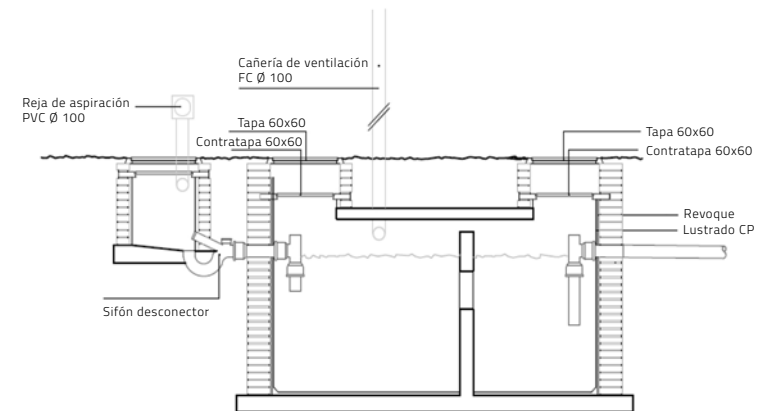


FIGURA 5. CÁMARA SÉPTICA INDIVIDUAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

#### DEPÓSITOS FILTRANTES Y OTRAS ALTERNATIVAS DE INFILTRACIÓN EN EL TERRENO

Esta opción puede incluir tratamiento primario (cámara séptica) y secundario (por ejemplo, humedal artificial) (OSE-Udelar, 2013). El desarrollo de este sistema está condicionado por las dimensiones del padrón, el aporte de agua residual, la estacionalidad, la gestión de pluviales, las características del soporte físico como tipo de suelo, la profundidad de napa freática, entre otros aspectos.

Todo el sistema de saneamiento se puede resolver en el padrón: la CI n° 1, sistema de tratamiento (primario, secundario) y disposición. De ser así, el funcionamiento, el mantenimiento y la verificación de parámetros para disposición estarían, en principio, a cargo del propietario.

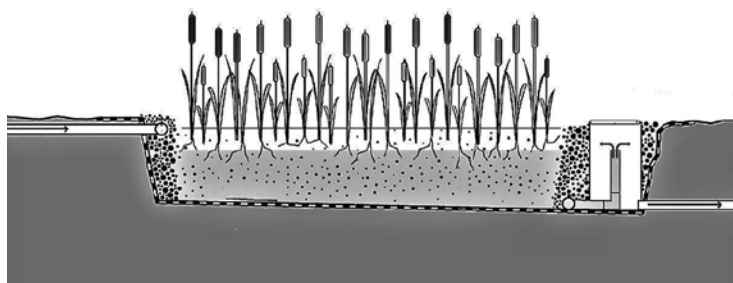


FIGURA 6. ESQUEMA HUMEDAL HORIZONTAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL. FUENTE: TOMADO DE COMPENDIO DE SISTEMAS Y TECNOLOGÍAS DE SANEAMIENTO (P. 116) DE TILLEY, E. ET AL. (2018)

### Agua, territorio y ambiente

No se puede asumir al saneamiento adecuado sin planificación territorial y ambiental. En este sentido, el artículo n° 47 indica que la política nacional de aguas y saneamiento estará basada en el ordenamiento del territorio, la conservación y protección ambiental, y la restauración de la naturaleza.

A partir del año 2008, la Ley n° 18308 de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible [LOTDS] (Uruguay, 2008) contribuye en avanzar en una normativa que incorpora el saneamiento como un componente más en la planificación del territorio. De acuerdo a este marco jurídico, la planificación territorial y su ejecución se realizarán a través de los instrumentos de ordenamiento territorial [IOT].

Reglamentario de la LOTDS, el Decreto n° 221/009 (Uruguay, 2009b) indica la manera en que se integra la dimensión ambiental en el proceso de elaboración de los IOT. Uno de los temas ambientales relevantes que se incorporan en la elaboración del instrumento es la viabilidad del sistema de saneamiento.

El ambiente, por lo tanto, es condicionante. Se puede definir como tal la articulación de la relación entre la sociedad (demandas de la población y actividades) con la naturaleza (Allen, 1998); así, la urbanización y el hombre forman parte del ambiente.

Concretamente, en el proceso de planificación territorial, un ambiente urbano es distinto a uno costero u otro rural que forma parte de la cuenca del Santa Lucía y, consecuentemente, el sistema de saneamiento presentará distintas condicionantes para su viabilidad.

#### SANEAMIENTO EN ZONAS URBANAS

La LOTDS es un punto de inflexión en los requisitos para que un ámbito territorial sea considerado urbano. Su artículo n° 32 expresa un listado de infraestructura con la que debe contar «en calidad y proporción adecuada a las necesidades» (Uruguay, 2009b). Por un lado, brinda garantías de que las personas que habitarán ese espacio territorial dispondrán de cierta infraestructura —entre la que se encuentra la red de agua potable, el drenaje de agua pluvial

y la «evacuación de aguas servidas»— y, por otro, hace énfasis en la necesidad de planificar el ambiente de acuerdo a su capacidad de carga o cobertura presente o futura.

En zonas urbanas, y específicamente las consolidadas, un sistema por red de colectores se presenta en primera instancia como un saneamiento adecuado. En el marco del proceso de planificación, el Decreto n° 30/20 (Uruguay, 2020), reglamentario de la Ley n° 19525, que aprueba las Directrices Nacionales de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible (Uruguay, 2017), indica que los IOT deberán prever dichas infraestructuras en las dimensiones adecuadas y con capacidad de soportar la demanda agregada en función de la densidad proyectada, así como estar funcionando previamente a la ocupación del suelo. Posteriormente, solicita que —de ser necesaria la extensión de alguno de los componentes del sistema— las intendencias departamentales (a excepción de Montevideo) deberán solicitar a OSE la viabilidad de dichas infraestructuras.

Esto resulta un gran avance; en un horizonte de máxima ocupación, el sistema debe, además de transportar los nuevos caudales de efluentes, tratar dicho volumen en función de la capacidad del cuerpo receptor. Eso es fundamental para hacer viable una planificación territorial con un saneamiento adecuado.

#### SANEAMIENTO EN ZONAS SUBURBANAS

Esta categoría de suelo presenta menores densidades de ocupación que el suelo urbano. Si observamos el visualizador del Sistema Territorial del MVOT, gran parte del espacio costero y de la zona metropolitana es categorizada como tal.

Es aquí, en mayor medida, donde se evidencian contradicciones normativas y operativas. En el año 1979, se elabora el Decreto n° 253/979 (Uruguay, 1979), que tiene por objeto «prevenir la contaminación ambiental, a través del control de las aguas» y define, entre otros temas, que el efluente que cumpla ciertos parámetros solamente admitirá la infiltración al terreno en zonas rurales. Si bien este decreto se encuentra hace varios años en proceso de revisión —entre otros aspectos, respecto del criterio de categorización de suelo, que en ese momento no estaba planteado— aún no se ha arribado a un consenso para su modificación.

Por otro lado, si observamos los decretos departamentales en los que se habilita el sistema de saneamiento para los IOT, muchas veces se considera la disposición en terreno como una posibilidad; sucede lo mismo con algunas normas de sanitaria interna.

El departamento de Rocha, puntualmente, presenta un amplio porcentaje del espacio costero suburbano o urbano no consolidado. La normativa de sanitaria interna establece, en su artículo n° 83, tres opciones para disposición final de efluentes domiciliarios: hacia colector (obligatorio en caso de existir), almacenamiento con transporte mediante barométrica, o tratamiento individual con su disposición final. La Intendencia de Rocha permite infiltrar en zonas urbanizadas, si cuentan con tratamiento previo y presentan aval de un profesional competente (Intendencia de Rocha, 2015).

## Agua potable, agua segura

El volumen que descargan algunas cisternas existentes en el mercado es de 14 l, lo equivalente al consumo de agua de una persona promedio en una semana. La crisis hídrica transitada por Uruguay en 2023 expuso la necesidad de cuestionar cómo gestionamos el agua potable.

Desde la arquitectura, se ha planteado la necesidad de disminuir el consumo de agua potable. Ante esto, el desafío está en responder de qué manera el edificio/padrón gestiona el agua de manera sustentable. Por un lado, minimizar el consumo y, por otro, el reúso de agua pluvial o tratada.

Con relación a esto último, el Plan Nacional de Aguas (MVOTMA, 2017) señala que existen usos domésticos que no requieren agua potable; el agua segura podría usarse para riego o lavado de veredas o autos, entre otros usos. A modo de ejemplo, la posibilidad de reúso —que ya se realiza en los jardines de lluvia— de los volúmenes de laminación se identifica como contribución.

Si retornamos al saneamiento, se visualiza la oportunidad de utilizar el agua tratada en riego; de alguna manera, la infiltración al terreno puede considerarse en algunos casos como tal. Pero es medular posicionarnos en los conceptos «saneamiento adecuado» y «planificación territorial»: deben existir garantías en la calidad del efluente tratado para su reúso, así como un soporte ambiental que lo viabilice.

Estos sistemas mixtos de abastecimiento —agua potable/agua segura— requieren una definición en proyecto, una ejecución y un plan de monitoreo y mantenimiento en los que se inhabilite el cruce de circuitos o la contaminación cruzada.

## Desafíos

Para poder dar cumplimiento al mandato constitucional, nuestro país presenta definiciones sobre los términos «agua potable» y «saneamiento», y un marco normativo referente. Sin embargo, resta avanzar en una planificación que desarrolle el saneamiento adecuado según el modelo territorial y las características ambientales específicas del ámbito.

Asimismo, es necesario que se aborde la gestión del agua de manera integral y sostenible, concibiéndola como un sistema que supere la fragmentación entre abastecimiento, saneamiento y gestión de pluviales. A modo de ejemplo, las medidas de control de escurrimiento o sobre sistemas de saneamiento pueden contribuir al reúso de agua a través de agua segura, condicionado por el monitoreo de la calidad del efluente y excluyendo la posibilidad de contaminación cruzada con agua potable.

Desde la práctica profesional, el desafío es contar con una normativa que habilite al edificio/padrón a una gestión integral del agua, para que —mediante los lineamientos emanados de la planificación territorial— podamos proyectar, construir y ser usuarios de saneamiento adecuado. De esta manera, como arquitectos, seremos actores tributarios a lo definido en el artículo n° 47 de la Constitución de la República.

## Referencias bibliográficas

- Allen, A. (1998). Sustentabilidad ambiental, desarrollo y ciudad. En *Curso de Posgrado en Gestión y Planificación Urbana*. Montevideo: Universidad de la República, Maestría de Ordenamiento Territorial.
- Assandri, E., Skapino, E., Da Rosa, D., Alemán, A. y Acuña, A. M. (2018). Anemia, estado nutricional y parasitosis intestinales en niños pertenecientes a hogares vulnerables de Montevideo. *Archivos de Pediatría del Uruguay*, 89(2), 86-98.
- López Díaz, J. (2015). *Sistemas de saneamiento adecuado*. (Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Udelar, Montevideo). Repositorio institucional de la Udelar: <https://hdl.handle.net/20.500.12008/26234>
- Dirección Nacional de Aguas y Secretaría Nacional de Ambiente, Agua y Cambio Climático. (2019). *Plan Nacional de Saneamiento*. Recuperado de [https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/2020-07/PNS\\_Saneamiento\\_1.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/2020-07/PNS_Saneamiento_1.pdf)
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. (2008). *Agua potable. Requisitos* (Norma UNIT 833:2008). Recuperado de [https://www.unit.org.uy/misc/ver/UNIT\\_833:2008/UNIT\\_833:2008.pdf/normalizacion/catalogo\\_previa/](https://www.unit.org.uy/misc/ver/UNIT_833:2008/UNIT_833:2008.pdf/normalizacion/catalogo_previa/)
- Intendencia de Montevideo. (2009). *Obras sanitarias internas*. Recuperado de <https://normativa.montevideo.gub.uy/articulos/82825>
- Intendencia de Rocha. (2014). *Plan parcial los Cabos*. Recuperado de <https://sit.mvotma.gub.uy/RegistroWeb/PDFs/FichaInstrumento5141.pdf>.
- Intendencia de Rocha. (2015). *Ordenanza de Instalaciones Sanitarias*. Recuperado de [https://sig.rocha.gub.uy/sig/datapub/ordenanza/ORDENANZA\\_SANITARIA\\_Oct\\_2015\\_IDR.pdf](https://sig.rocha.gub.uy/sig/datapub/ordenanza/ORDENANZA_SANITARIA_Oct_2015_IDR.pdf)
- Lena Lacuesta, A. (2006). *Oxiurosis y desempeño cognitivo*. (Monografía de posgrado, Facultad de Medicina-Escuela de Graduados, Udelar, Montevideo). Repositorio institucional de la Udelar: <https://hdl.handle.net/20.500.12008/17995>
- Ministerio de Desarrollo Social. (2020). *Porcentaje de hogares sin acceso adecuado a saneamiento. Total país*. Recuperado de <https://catalogodatos.gub.uy/dataset/mides-indicador-7738>
- Ministerio de Ambiente. (2020). *Informe del estado del ambiente*. Recuperado de [https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/DCA\\_Informe\\_del\\_Estado\\_del\\_Ambiente\\_2020.pdf](https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/DCA_Informe_del_Estado_del_Ambiente_2020.pdf)
- Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medioambiente. (2017). *Plan Nacional de Aguas*. Recuperado de <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/planes/plan-nacional-aguas>
- OSE-Udelar. (2013). *Sistemas de saneamiento adecuado* [convenio OSE-Udelar].
- Soumastre, M. (2017). *Evaluación de la presencia de microorganismos indicadores de contaminación en agua subterránea del Parque Nacional Cabo Polonio*. (Tesis de maestría, Centro Universitario Regional Este-Udelar, Rocha). Repositorio institucional de la Udelar: <https://hdl.handle.net/20.500.12008/9085>
- Tilley, E., Ulrich, L., Lüthi, C., Reymond, P., Schertenleib, R. y Zurbrügg, C. (2018). *Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento*. Dübendorf: Instituto Federal Suizo para la Ciencia y la Tecnología Acuática. Recuperado de <https://sswm.info/es/node/11695>
- Uruguay. (1967). Constitución de la República. Recuperado de <https://www.impo.com.uy/bases/constitucion/1967-1967>
- Uruguay. (1979, 31 de mayo) Decreto n° 253/979: Aprobación de Normativa para Prevenir la

Contaminación Ambiental, a través del Control de las Aguas. Recuperado de <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/253-1979/19>

Uruguay. (2008, 30 de junio). Ley n° 18308: Ley de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible. Recuperado de <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/18308-2008>.

Uruguay. (2009a, 28 de octubre). Ley n° 18610: Ley de Política Nacional de Aguas. Principios Rectores. Recuperado de <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/18610-2009>

Uruguay. (2009b, 20 de mayo). Decreto n° 221/009: Reglamentación de la Ley de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible. Recuperado de <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/221-2009>.

Uruguay. (2010, 11 de marzo). Decreto n° 78/010: Reglamentación de la Ley n° 18610 sobre política nacional de aguas. Recuperado de <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/78-2010>

Uruguay. (2011, 8 de diciembre). Ley n° 18840: Declaración de Interés General. Conexión a las Redes Públicas de Saneamiento Existentes en el País o que se Construyan en el Futuro. Recuperado de <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/18840-2011>

Uruguay. (2017, 19 de setiembre). Ley n° 19525: Aprobación de las Directrices Nacionales de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible. Recuperado de <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/19525-2017>

Uruguay. (2020, 6 de febrero) Decreto n° 30/20: Reglamentación de las directrices nacionales de ordenamiento territorial y desarrollo sostenible. Recuperado de <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/30-2020>.

## Hacia una industria cementera más sustentable

### PALABRAS CLAVE

CEMENTOS BINARIOS; CEMENTOS TERNARIOS;  
CEMENTOS DE BAJO CARBONO; ECOEFICIENCIA

### Resumen

La elaboración de cemento basada en el empleo de clínker llevó a la industria cementera a ocupar el tercer lugar a nivel mundial en el consumo industrial de energía y el segundo en la emisión industrial de CO<sub>2</sub>. Por ello han surgido diferentes estrategias para mejorar la ecoeficiencia de la industria cementera. La más importante es la sustitución parcial del clínker por materiales alternativos: materiales cementicios suplementarios [MCS], obtenidos a partir de la transformación de residuos industriales, agroindustriales y otros. De allí que cementos pórtland con *filler* calcáreo [CPF], compuestos [CPC] y de bajo carbono [LC3] constituyen una importantísima herramienta para el desarrollo sostenible de la industria del cemento, pudiéndose sustituir hasta 25,35% y 50% de clínker por MCS —respectivamente—, lo cual implica disminuir tanto la cantidad de combustible requerida para elaborar cemento como las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Por su capacidad para preservar recursos naturales y mejorar características de los productos basados en su empleo, los CPC se fabrican y comercializan en todos los países del mundo en mayor medida que los CPF. La comercialización de LC3 es más incipiente, por ser un desarrollo relativamente reciente —del 2014—. En Uruguay, si bien tardíamente, hace pocos años se fabrican y comercializan CPF y CPC. No se cuenta con suficiente información sobre los cementos de bajo carbono —a excepción de los datos publicados en la bibliografía internacional— y no se los contempla en las normas de cemento que están siendo actualizadas.

### GEMMA RODRÍGUEZ

Arquitecta, doctora y magíster. Profesora titular (IT, FADU-Udelar). Directora de la Maestría en Arquitectura en el área tecnológica. Investigadora SNI (ANII) en Nivel II (2014-2026) y Nivel I (2009-2013). Ha escrito veinticuatro artículos completos para revistas especializadas, tres libros, seis capítulos y ochenta y tres trabajos para eventos. Posee una vasta trayectoria en el campo de la producción técnica (cuarenta y cinco productos de desarrollo tecnológico, procesos y otros).

## Introducción

Civilizaciones muy antiguas han construido con materiales aglomerantes, pero recién en 1824 fue registrada —por John Aspdin— una patente que designaba como *cemento pórtland* a un producto obtenido por la mezcla en proporciones adecuadas de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales, que contenía sílice, alúmina y se calentaba hasta la temperatura de clinkerización, moliéndose el clínker resultante (Mehta y Monteiro, 2014). Este material de construcción ha demostrado, durante dos siglos, ser confiable en una amplia gama de condiciones ambientales y de aplicaciones. En relación con ello, cabe observar que el hormigón —basado en el empleo de cemento pórtland— es el material de construcción más empleado en el mundo, siendo superado solo por el agua (Mehta y Monteiro, 2014; Brunauer y Copeland, 1964).

Inicialmente, la producción de cemento pórtland se basaba en la utilización de clínker, que requiere elevadas temperaturas para su obtención —cercas a 1400 °C— y emite gases altamente nocivos para la capa de ozono, como los de tipo NOx, CO<sub>2</sub>, fluorinados y dioxinas, entre otros. Dicho cemento se conoce como *cemento pórtland común* —en inglés: Ordinary Portland Cement, OPC— o cemento pórtland normal —CPN—, como indica la norma uruguaya UNIT 20:2022 (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas).

La fabricación de CPN llevó a la industria cementera a ocupar el tercer lugar en el consumo industrial de energía y el segundo en la emisión industrial de CO<sub>2</sub> a nivel mundial (International Energy Agency y Cement Sustainability Initiative, 2018), siendo responsable de un 7% de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el mundo. La producción de una tonelada de CPN requiere cerca de 80 kWh de energía y 1500 kg de materias primas, liberando al aire cerca de una tonelada de CO<sub>2</sub> (Mamatha et al., 2017).

En el proceso de fabricación del CPN, el CO<sub>2</sub> se produce a partir de tres fuentes principales (Osby et al., 2016):

- descarbonatación de piedra caliza en el horno: alrededor de 525 kg de CO<sub>2</sub>/t de clínker;
- quema de combustible en el horno: alrededor de 335 kg de CO<sub>2</sub>/t de cemento,
- utilización de energía eléctrica: alrededor de 50 kg CO<sub>2</sub>/t de cemento.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible [ODS] —enunciados por las Naciones Unidas (2015) para tomar medidas urgentes a los efectos de combatir el cambio climático y sus impactos para 2030— posibilitaron crear estrategias para minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero [GEI] de la fabricación de CPN. Las tres más importantes son:

- mejora de la eficiencia energética;
- uso de biocombustibles y otros combustibles alternativos,
- sustitución del clínker por materiales cementicios suplementarios [MCS].

## A nivel mundial

La preocupación por la sostenibilidad de la producción de cemento llevó al desarrollo de diversas tecnologías que se utilizan ampliamente en el mundo. El primer conjunto de desarrollos se centró en reducir la energía requerida para la producción de clínker, por lo que se pasó de una producción vía húmeda a una vía seca; es decir, de un consumo de energía —combustible fósil— de 1400 kcal/kg de clínker a 800 kcal/kg de clínker respectivamente (Mehta y Monteiro, 2014). Actualmente, la mayoría de los hornos de clínker están cerca de la máxima eficiencia que es termodinámicamente posible (Sharma et al., 2021).

Por otro lado, el empleo de combustibles alternativos en los hornos para elaborar el clínker está creciendo, pero en una proporción muy pequeña comparada con el total (IEA-CSI, 2018). De allí que la sustitución parcial del clínker por materiales cementicios suplementarios [MCS] surgió como una opción altamente atractiva para reducir sensiblemente el problema y, en consecuencia, propiciar un ahorro energético y una menor afectación al ambiente. Según Aitcin y Mindess (2011), por cada kilogramo menos de clínker que se emplea para fabricar una tonelada de cemento, se reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> en 1 kg.

De allí que, a nivel mundial, el cemento pasó a fabricarse mezclando clínker con materiales más finos que el cemento, como cenizas volantes, escorias, puzolanas y piedra caliza finamente molida (filler calizo o calcáreo). Dichos MCS permiten producir cementos que cumplen los requisitos normativos, reduciendo el impacto ambiental de la producción de cemento sin disminuir su facilidad de uso ni su versatilidad; pero cada uno de ellos cambia el comportamiento del cemento bajo determinadas condiciones.

A principios de la década de 2000, se observó que en mezclas binarias —de clínker y un MCS—, el contenido de clínker en el cemento —con los MCS disponibles— ya no podía disminuirse más. Por ejemplo: los *fillers* calcáreos y cenizas volantes, a pesar de su amplia disponibilidad como materiales, solo pueden reemplazar al clínker de forma limitada debido a su baja reactividad. Y las escorias y puzolanas, aunque ofrecen niveles de reemplazo más altos, están disponibles en cantidades limitadas. Por esto, surgieron cementos formados por mezclas ternarias y cuaternarias que ofrecieron el beneficio de niveles más altos de reemplazo de clínker, lo que redujo los efectos indeseables que un solo MCS en particular puede tener en el desempeño del cemento. De allí que la comercialización de CPN pasó a ser escasa en la mayoría de los países del mundo, e incluso nula en algunos.

Más recientemente, se desarrollaron cementos bajos en carbono [Limestone Calcined Clay Cement, LC3]: mezclas ternarias de clínker + *filler* calcáreo + arcilla calcinada, que posibilitan reducir hasta un 50% el contenido de clínker en el cemento y —consecuentemente— las emisiones de CO<sub>2</sub>, lo cual permitió que se llegara a elaborar en laboratorio hasta con un 40% de clínker (Antoni et al., 2012).

Suiza, Cuba e India lideraron las investigaciones, el desarrollo y la aplicación del LC3 con financiación —desde 2014— de la Agencia Suiza para el Desarrollo

y Cooperación [SDC]. Actualmente, más de 50 países están produciendo LC3 o bien realizando investigaciones o desarrollos al respecto.<sup>1</sup>

A partir de la disponibilidad de piedra calcárea y de arcilla en todo el mundo, recientes desarrollos indican el potencial significativo del empleo de arcillas calcinadas y piedra calcárea de diferentes orígenes y regiones para elaborar LC3 (Krishnan et al., 2018; Huang et al., 2020; Akindaunsi et al., 2020; Lin et al., 2021; Dixit et al., 2021), utilizando diferentes tecnologías y sin requerir equipamientos especiales para su fabricación (Bishnoi et al., 2014; Emmanuel et al., 2016). Además, el conocimiento sobre estos cementos ha crecido exponencialmente en el tiempo y son comercializados en diferentes países, presentándose como una opción muy prometedora para lograr menores emisiones de CO<sub>2</sub> y disminuir costos.

En los cementos LC3, la alúmina de la arcilla calcinada y el carbonato del *filler* reaccionan creando una sinergia entre los tres componentes que posibilita una mayor sustitución de clínker —hasta un 50%—, con lo cual su producción requiere menos energía que la elaboración de CPN, con grandes beneficios tanto medioambientales como técnicos y económicos (Ruiz Rosa et al., 2017; UN Environment et al., 2018; Abrao et al., 2022).

Aquí cabe observar que para la formación de clínker se necesitan temperaturas muy altas —cerca de 1400 °C—, mientras que las temperaturas de calcinación para el empleo de las arcillas en cemento son bastante inferiores —600-850 °C, según el tipo de arcilla—.

Conjuntamente con el desarrollo de los LC3, se comenzaron a realizar análisis de ecoeficiencia de la producción de dichos cementos, que posibilitaron la evaluación de alternativas relacionadas con la sustitución de clínker. Esos análisis señalan que diferentes indicadores permiten reducir el impacto ambiental sin afectar la competitividad económica de la empresa, logrando identificar áreas en las que se registran mayores desperdicios o pérdidas de recursos, así como posibles oportunidades de inversión (Ruiz Rosa et al., 2017).

## En Uruguay

La normativa vigente en nuestro país —la mencionada UNIT 20: 2022— indica cinco tipos de cemento para uso general: cemento pórtland normal [CPN], cemento pórtland con *filler* calcáreo [CPF], cemento pórtland puzolánico [CPP], cemento pórtland con escoria [CPE] y cemento pórtland compuesto [CPC].

Los CPF, CPP y CPE son cementos binarios compuestos principalmente por clínker pórtland y un material cementicio suplementario (*filler* calcáreo, puzolana o escoria, respectivamente). En el CPF, se puede sustituir entre el 6% y el 25% de clínker por *filler* calcáreo; y en el CPP, entre el 15% y el 50% de clínker por puzolana. En el caso del CPE, la sustitución de clínker por escoria puede ser de entre el 6% y el 35%.

1. Para profundizar en el tema, ver: <https://www.lc3.ch>

Los CPC son considerados cementos ternarios, ya que —además de clínker— pueden contener dos o tres componentes en porcentajes que van desde el 6% al 35%, no debiendo ser el contenido de *filler* calcáreo superior al 25%.

Hasta hace pocos años, en Uruguay, entre estas opciones, se fabricaba y comercializaba solo CPN. La fabricación de cementos binarios o ternarios constituye una importantísima herramienta para el desarrollo sostenible, ya que disminuye la cantidad de combustible requerida para elaborarlos y aumenta la ecoeficiencia —eficiencia ecológica-económica-social— de la empresa que los produce, si se compara con los cementos pórtland basados en el empleo de clínker [CPN].

En nuestro país, una de las plantas cementeras de la empresa estatal —ANCAP— fue la primera en desarrollar, fabricar y comercializar CPF, sustituyendo parte de clínker por *filler* calcáreo. Dicha empresa cuenta, en el departamento de Lavalleja, con grandes yacimientos de piedra calcárea que son insumo para elaborar este tipo de cemento. Instrumentó allí la molienda de piedra calcárea para elaborar el *filler* calcáreo y ahorrar energía en la producción de cemento. Pero el CPF obtenido era CPF 30 —con resistencias a compresión a los 28 días de edad entre 30 y 50 MPa—, mientras que el CPN comercializado era CPN 40 —con resistencias a compresión a los 28 días de edad entre 40 y 60 MPa—, por lo que la integración del CPF al mercado local, entre 2010 y 2011, no alcanzó niveles significativos y su fabricación fue discontinuada. De allí que, en Uruguay, hasta aproximadamente 2018, se continuó elaborando y empleando CPN, producto conocido con relación a su desempeño en hormigones y otros materiales cementicios.

En la Udelar, el equipo que investiga el desarrollo y la aplicación de nuevos materiales para construcción analizó el empleo de residuos agroindustriales uruguayos, activándolos de forma adecuada para ser MCS, con el objetivo de mejorar la ecoeficiencia y las características de los productos basados en su empleo.

Se comenzó primeramente con ceniza de cáscara de arroz [CCA], empleándola en hormigón (Rodríguez de Sensale, 2000 y 2006; Giaccio et al., 2007 y 2010; Rodríguez de Sensale et al., 2008; Rodríguez de Sensale, 2010); luego, en cementos para elaborar CPP, sustituyendo parte de clínker por CCA —en el proyecto INIA FPTA 285, 2009-2011— (Rodríguez de Sensale et al., 2013). Si bien los resultados eran excelentes —y la CCA, el residuo agroindustrial más abundante de nuestro país— no alcanzaba para tener una producción continua de CPP. Esto llevó al desarrollo de CPC mediante sustitución parcial de clínker por CCA residual uruguaya y *filler* calcáreo,<sup>2</sup> quedando demostrado que se puede elaborar CPC con dicho residuo —si se activa adecuadamente para ser empleado como MCS— y obtener beneficios medioambientales además de técnicos (Rodríguez de Sensale y Rodríguez Viacava, 2018).

La CCA es muy liviana, por lo que —para que desde el punto de vista económico resulte viable su empleo— la fábrica de cemento tiene que estar ubicada en las cercanías del lugar donde se genera.

También se estudió, para CPP, cemento ceniza de bagazo de caña de ALUR —integrante del grupo ANCAP—, concluyéndose que no es posible utilizarla tal como se obtiene y necesita una requema (Ruchansky et al., 2014), ya

2. Proyecto ANII FSE-1-2011-1-6476, 2012-2015.

que —desde el punto de vista económico— inviabiliza su empleo para el tipo de cemento considerado, que es binario. Las cenizas de residuos forestales de nuestro país son obtenidas en pequeñas cantidades (Godoy, 2011), lo cual —en tanto la industria cementera requiere grandes cantidades de materias primas— impide considerar cualquier posible estudio sobre la viabilidad de su empleo para elaborar cementos.

Los resultados de dichas investigaciones tuvieron difusión en nuestro país y se tomó conciencia de que no era sustentable elaborar CPC. De allí que una cementera privada comenzara a comercializar —en 2018— CPC con clínker + escoria + *filler* calcáreo. Cabe observar que las escorias empleadas para la elaboración de cementos son escorias granuladas de alto horno, que deben cumplir determinados requisitos normativos. Dado que Uruguay no cuenta con altos hornos para la elaboración del CPC, la escoria se importaba. En ese entonces, ANCAP retomó la producción de CPF, con ajustes en la formulación inicial, para que el cemento fuera CPF40. Desde 2020, aproximadamente, la integración del CPF al mercado uruguayo se ha vuelto significativa: varias empresas lo elaboran hoy, además de la estatal.

En el año 2020, en contexto de pandemia, la única empresa que en nuestro país elaboraba CPC empezó a tener problemas con el suministro de escoria —importada desde Brasil—, ya que se produjo un importante incremento en el costo, lo cual llevó a sustituirla por arcilla calcinada. De allí que el CPC que se está comercializando sea una mezcla de clínker + arcilla calcinada + *filler* calcáreo, siendo el porcentaje de sustitución de clínker por MCS muy inferior y diferente al que se emplea para cementos LC3 a nivel mundial. La sinergia entre los tres componentes establece una importante diferencia.

## Consideraciones finales

La industria cementera es esencial para satisfacer la demanda de construcción e infraestructura, pero también gran consumidora de materias primas y energía, así como emisora de CO<sub>2</sub>. Por tanto, su papel en la lucha contra el cambio climático es fundamental. En tal sentido, este artículo buscó brindar un breve pero completo panorama de los principales problemas que esa industria enfrenta en materia de sostenibilidad y las estrategias que ha ido adoptando para superarlos tanto a nivel global como nacional.

El empleo de MCS sustituyendo parte de clínker ha sido la estrategia más exitosa para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial. Los más empleados —cenizas volantes, escorias y puzolanas naturales— representan actualmente menos del 10% de la producción mundial de cemento, lo que ha impulsado el desarrollo de cementos bajos en carbono [LC3], usando arcillas calcinadas conjuntamente con *filler* calcáreo.

En Uruguay, aunque tardíamente, hace pocos años se fabrican y comercializan cementos con MCS. Se tiene poca información sobre los cementos bajos en

carbono y, aunque la norma sobre cementos de uso general se actualizó recientemente, no los contempla. Cabe observar que, por ejemplo, en 2021 la Unión Europea aprobó la norma EN 1975, que incluye al LC3, por lo que sería importante atender a que existe ese camino y seguirlo.

## Referencias bibliográficas

- Abrao, P. C., Cecel, R. T., Cardoso, F. A. y John, V. M. (2022). Comparing the ecoefficiency of cements containing calcined clay and limestone filler [Comparación de la ecoeficiencia de cementos conteniendo arcilla calcinada y *filler* calcáreo]. En S. Bishnoi (Ed.), *Calcined Clays for Sustainable Concrete* (pp. 245-255). Singapur: Springer. Recuperado de [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-2806-4\\_28](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-2806-4_28)
- Aitcin, P.C. y Mindess, S. (2011). *Sustainability of Concrete* [Sustentabilidad del hormigón]. Nueva York: Spon Press.
- Akindahunsi, A. A., Avet, F. y Scrivener, K. (2020). The influence of some calcined clays from Nigeria as clínker substitute in cementitious systems [Influencia de algunas arcillas calcinadas de Nigeria como sustituto de clínker en sistemas cementicios]. *Case Studies in Construction Materials*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00443>
- Antoni, M., Rossen, J., Martirena, F. y Scrivener, K. (2012). Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone [Sustitución de cemento por una combinación de metacaolín y piedra caliza]. *Cement and Concrete Research*, 42(12), 1579-1589. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006>
- Bishnoi, S., Mayti, S., Mallik, A., Joseph, S. y Krishnan, S. (2014). Pilot scale manufacture of limestone calcined clay cement: the Indian experience [Fabricación a escala piloto de cemento de arcilla calcinada con piedra caliza: la experiencia hindú]. *Indian Concrete Journal*, 88(6), 22-28.
- Brunauer, S. y Copeland, L.E. (1964). The chemistry of concrete [La química del hormigón]. *Scientific American*, 210(4), 80-93.
- Dixit, A., Du, H. y Pang, S. D. (2021). Performance of mortar incorporating calcined marine clays with varying kaolinite content [Prestación de cemento incorporando arcillas marinas calcinadas con contenido variable de caolinita]. *Journal of Cleaner Production*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124513>
- Emmanuel A. C., Haldar, P. K., Maity, S. y Bishnoi, S. (2016). Second pilot production of limestone calcined clay cement in India: the experience [Segunda producción piloto de cemento de arcilla calcinada con piedra caliza en India: la experiencia]. *Indian Concrete Journal*, 90, 57-64.
- Giaccio, G., Rodríguez de Sensale, G. y Zerbino, R. (2007). Failure mechanism of normal and high-strength concrete with rice-husk ash [Mecanismo de falla de hormigones normales y de alta resistencia con ceniza de cáscara de arroz]. *Cement and Concrete Composites*, 29(7), 566-574. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.04.005>
- Godoy, D. (2011). *Desarrollo de un sistema muro portante de albañilería basado en bloques de madera-cemento*. [Tesis de maestría inédita]. Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile.

- Huang, Z., Huang, Y., Liao, W., Han, N. y Zhou, Y. (2020). Development of limestone calcined clay cement concrete in South China and its bond behavior with steel reinforcement [Desarrollo de hormigón de cemento de arcilla calcinada en el sur de China y su comportamiento de adherencia con armadura de acero]. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 21(11), 892-907. <https://doi.org/10.1631/jzus.A2000163>
- International Energy Agency y Cement Sustainability Initiative. (2018). *Technology roadmap: Low carbon transition in the cement industry* [Hoja de ruta tecnológica: transición baja de carbono en la industria del cemento]. Recuperado de <https://www.slideshare.net/internationalenergyagency/low-carbon-transition-in-the-cement-industry>
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. (2018). *Cementos pórtland para uso general. Definiciones y requisitos*. (Norma UNIT 20:2022). Recuperado de <https://www.unit.org.uy/normalizacion/norma/100001384>
- Krishnan, S., Kanaujia, S. K., Mithia, S. y Bishnoi, S. (2018). Hydration kinetics and mechanisms of carbonates from stone wastes in ternary blends with calcined clay [Cinética y mecanismos de hidratación de carbonatos provenientes de desechos pétreos en mezclas ternarias con arcilla calcinada]. *Construction and Building Materials*, 164, 265-274. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.240>
- Lin, R., Lee, H., Han, Y. y Wang, X. (2021). Experimental studies on hydration–strength–durability of limestone–cement–calcined Hwangtoh clay ternary composite [Estudios experimentales sobre hidratación–resistencia–durabilidad del compuesto ternario de piedra caliza, cemento y arcilla calcinada de Hwangtoh]. *Construction and Building Materials*, 269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.12.1290>
- Mamatha, P., Narayana, S. M. V. y Naresh Kumar, T. (2017). To Evaluate the Mechanical & Durability Properties of Nano Sugarcane Bagasse Ash in Cement Concrete [Evaluar las propiedades mecánicas y durabilidad de nano ceniza de bagazo de caña de azúcar en hormigón de cemento]. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology IJSRSET*, 3(8), 425-430. Recuperado de <https://technoscienceacademy.academia.edu/IJSRSET>
- Mehta, P. K. y Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: microstructure, properties and materials* [Hormigón: microestructura, propiedades y materiales]. New York: McGraw-Hill Education. Recuperado de <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071797870>
- Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. A/RES/70/1. Recuperado de [https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1\\_es.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf)
- Özbay, E., Erdemir, M. y Durmuş, H. I. (2016). Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties. A review [Aprovechamiento y eficiencia de escoria de alto horno granulada molida en propiedades del hormigón. Una revisión]. *Construction and Building Materials*, 105, 423-434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153>
- Rodríguez de Sensale, G. (2000). *Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas dos concretos de alta resistencia e convencionais com cinza de casca de arroz* [Estudio comparativo entre las propiedades mecánicas de hormigones de alta resistencia y convencionales con ceniza de cáscara de arroz]. (Tesis de doctorado, Universidad Federal de Río Grande del Sur, Porto Alegre, Brasil). Repositorio institucional de FADU, Udelar: <http://www.fadu.edu.uy/sepep/tesis/estudo-comparativo-entre-as-propriedades-mecanicas-dos-concretos-de-alta-resistencia-e-convencionais-com-cinza-de-casca-de-arroz/>
- Rodríguez de Sensale, G. (2006). Strength development of concrete with rice-husk ash [Desarrollo de resistencia de hormigón con ceniza de cáscara de arroz]. *Cement and Concrete Composites*, 28(2), 158-160. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.09.005>
- Rodríguez de Sensale, G. (2010). Effect of Rice-Husk Ash on Durability of Cementitious Materials [Efectos de la ceniza de cáscara de arroz en la durabilidad de materiales cementicios]. *Cement and Concrete Composites*, 32(9), 718-725. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.008>
- Rodríguez de Sensale, G., Ribeiro, A. B. y Goncalvez, A. (2008). Effect of RHA on autogenous shrinkage of portland cement pastes [Efecto de RHA en retracción autógena de pastas de cemento pórtland]. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 892-897. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.06.014>
- Rodríguez de Sensale, G. y Rodríguez Viacava, I. (2018). A study on blended cements containing residual rice husk ash and limestone filler [Un estudio de cementos mezclados conteniendo ceniza de cáscara de arroz residual y filler calcáreo]. *Construction and Building Materials*, 166, 873-888. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.113>
- Rodríguez de Sensale, G., Romay, C., Sabalsagaray, S., Gutiérrez, S., Benitez, A. y Dalchiale, E. (2013). Valorización del residuo obtenido de la quema de la cáscara de arroz. *FPTA-INIA*, (45).
- Ruchansky, A., Borges Masuero, A. y Rodríguez de Sensale, G. (2014). Posibilidades del uso de la ceniza de bagazo de caña como adición mineral al cemento pórtland en Uruguay. En L. Villegas, I. Lombillo, C. Liaño y H. Blanco (Eds.), *Congreso latinoamericano sobre patología de la construcción, tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio: REHABEND 2014* [CD-Rom] (Santander, España, 1-4 de abril de 2014), 1137- 1144.
- Ruiz Rosa, Y., Rosa Domínguez, E. R., Sánchez Berriel, S., Castillo Hernández, L., Martirena, J.F. y Suppen, N. (2017). Análisis de la ecoeficiencia de la producción de cementos de bajo carbono mediante la sustitución de clínker. *Centro Azúcar*, 44(2), 77-88.
- Sharma, M., Bishnoi, S., Martirena, F. y Scrivener, K. (2021). Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review [Cemento y hormigón de arcilla calcinada y piedra calcárea: Una revisión del estado del arte]. *Cement and Concrete Research*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564>
- UN Environment, Scrivener, K., John, V. M. y Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potencial economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry [Cementos ecoeficientes: posibles soluciones económicamente viables para una industria de materiales a base de cemento con bajas emisiones de CO<sub>2</sub>]. *Cement and Concrete Research*, 114, 2-26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>

## *Wood plastic composite:* una alternativa de economía circular

CAMILA RAIMONDA, DANIEL MOSCA,  
PABLO RAIMONDA Y MARCELA IBÁÑEZ<sup>1</sup>

### PALABRAS CLAVE

WPC; MADERA PLÁSTICA; ECONOMÍA CIRCULAR; RECICLADO

### Resumen

El presente trabajo expone las ventajas ambientales del *Wood Plastic Composite* [WPC], una mezcla de madera y un plástico con la que se pueden fabricar variados productos de aplicación arquitectónica. En comparación con la madera tradicional «tratada» a utilizarse con igual destino, no solo representa una superación por lo que respecta al uso de productos químicos, sino también por el hecho de que, al formularse a partir de plásticos reciclados posconsumo y de desechos de aserraderos, evita el enterramiento o quema de dichas materias primas, colaborando así en el cumplimiento de las metas ambientales establecidas por el país.

### Introducción

El cambio climático, la degradación de la tierra, la escasez de agua y el uso de energía intensiva en carbono son solo algunos de los desafíos socioambientales que enfrenta el mundo en la actualidad. Hoy en día, lograr políticas amigables desde el punto de vista climático, energético, social y ambiental es una prioridad a nivel mundial.

La investigación actual en biomasa de residuos de madera se enfoca en minimizar la quema y maximizar su transformación en productos de valor agregado. Estos residuos, que incluyen aserrín, corteza, astillas, virutas y polvo de lijado de madera, son descartes en la silvicultura y el procesamiento de la madera, pero

**Pablo Raimonda:** Ingeniero químico. Profesor Adjunto del Instituto de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería (Udelar) y responsable del Laboratorio de Polímeros de dicho instituto. Cuenta con más de veinticinco años de experiencia en la enseñanza del tema polímeros, tanto en cursos de grado como de posgrado, además de experiencia industrial. Es integrante del Comité Internacional de la Polymer Proceedings Society, de los consejos directivos del Centro Tecnológico del Plástico y del Organismo Uruguayo de Acreditación, participando también en comités de Normalización, su especialidad, y en comités de evaluación de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación.

<sup>1</sup> Los tres primeros autores forman parte del equipo del Laboratorio de Polímeros (Instituto de Ensayo de Materiales [IEM] de la Facultad de Ingeniería de la Udelar) que viene desarrollando, desde hace veinte años, una línea de trabajo sobre un tipo particular de mezcla de productos naturales —considerados desechos— y polímeros, conocido como *compounding*, con el objetivo...

también resultan una valiosa materia prima en nuestro país. Es importante recordar que, en el mejor de los casos, solo se aprovecha el 40% del árbol (Quirós et al., 2005; Pérez Flores, 2018).

Por otra parte, el Ministerio de Ambiente uruguayo publicó, en el año 2021, el Plan Nacional de Gestión de Residuos 2022-2032, en el que fueron establecidas metas de recuperación de distintos materiales —entre ellos, los plásticos— que las empresas productoras o importadoras deben cumplir.

Los compuestos de madera y plástico WPC, que pertenecen a una generación joven de —semi— biocompuestos, han concitado un creciente interés investigativo tanto en áreas científicas como industriales a lo largo de las últimas décadas (Spear et al., 2015; Pickering et al., 2016). El uso de WPC está creciendo rápidamente en todo el mundo. En particular, en la industria del automóvil y en la industria y la ingeniería de la construcción, para la producción de bienes de consumo, domésticos, y de materiales técnicos, entre otros. Este tipo de material compuesto combina las ventajas de los polímeros sintéticos y los rellenos lignocelulósicos en un todo. El bajo costo de procesamiento de los polímeros y su flexibilidad y facilidad de moldeo permiten su aplicación como una matriz polimérica en WPC. Las poliolefinas —como el polietileno o el polipropileno, por ejemplo—, el ácido poliláctico o el PVC, con altos índices de fluidez —es decir, bajos puntos de fusión y bajas temperaturas de ablandamiento—, son los polímeros de referencia para mezclar con materiales lignocelulósicos en la producción de WPC (Jian et al., 2022; Martins et al., 2017).

La producción de WPC es bastante sencilla. El aserrín o biomasa leñosa es mezclada con un polímero, generalmente polietileno o polipropileno, en una extrusora. Luego, el producto se extrude en gránulos —*pellets*—, para su almacenamiento y reprocesamiento, o se extruye directamente en formas complejas de productos de WPC, para aplicaciones finales.

## Un poco de historia

Los primeros desarrollos del WPC se remontan a los años setenta, con el Gruppo Ovattifici Riuniti, que fabricó un producto denominado «Woodstock» para Fiat en 1972. En 1973, Sonesson AB produjo un compuesto de PVC-aserrín para ser usado en baldosas para pisos (Schwarzkopf y Burnard, 2016). Si bien el concepto de WPC es bastante sencillo, la investigación ha continuado desde la década de 1970 hasta la actualidad, centrándose en mejorar la compatibilidad de sus dos componentes: madera y plástico.

El desarrollo de los WPC también ha coincidido con el desarrollo de los biopolímeros, lo que ha dado lugar a un considerable cruce entre dos disciplinas: teoría del mezclado y síntesis de biopolímeros, y ha llevado al desarrollo de productos 100% bioderivados y biodegradables. Sin embargo, dichos productos de WPC de base biológica tendrían un costo elevado, y normalmente solo ocupan nichos de mercado muy específicos (Spear et al., 2015; Zierdt et al., 2015).

## Los componentes

La matriz, como se mencionó anteriormente, generalmente se fabrica a partir de termoplásticos. Los termoplásticos son polímeros que tienen la particularidad de poder ser calentados, moldeados, enfriados y endurecidos para luego ser recalentados y reformados sin perder sus propiedades. Esto permite que el WPC sea moldeable para aplicaciones de formas complejas. El uso de termoplásticos también permite que el reciclaje de los materiales compuestos se realice con relativa facilidad. Cuando se procesan termoplásticos, no se depende de la reticulación para desarrollar la matriz sólida, sino más bien de las propiedades intrínsecas de los monómeros, los grandes pesos moleculares y el entrelazamiento de polímeros (Hull y Clyne, 1996). Cuando se calientan, las cadenas de los polímeros se desenredan y permiten el reprocesamiento del compuesto.

En la fabricación de WPC se utilizan muchos termoplásticos; sin embargo, el mayor porcentaje del mercado corresponde a tres polímeros principales: el polietileno [PE], polipropileno [PP] y cloruro de polivinilo [PVC]. Los polietilenos —ambos de baja y alta densidad— se utilizan en todo el mercado europeo, mientras que los compuestos de madera de PVC han encontrado en EEUU un mercado para marcos de ventanas. Otros polímeros están empezando a llegar al mercado; por ejemplo, Evonik ha lanzado recientemente un compuesto a base de polietilmetacrilato [PMMA]. El compuesto «Mydeck» requiere un proceso de extrusión único y crea un producto que —según se dice— parece madera barnizada (Spear et al., 2015).

También se usan resinas termoestables para la fabricación de *composites* madera-polímero. Se trata de resinas que curan de estado líquido a sólido mediante un proceso no reversible denominado «reacción de reticulación». Las resinas a base de formaldehído son muy comunes en toda la industria de paneles de madera, y se han utilizado junto con poliamidas y epoxis para la fabricación de WPC duraderos. Curiosamente, el primer WPC fue hecho a base de baquelita y madera, producido por la empresa Rolls Royce en 1916 (Clemons, 2002).

Para aumentar la resistencia mecánica del WPC, sobre todo en el caso de los confeccionados con termofijos, se emplean refuerzos continuos de fibra de vidrio impregnados mediante el uso de resinas epoxi como agentes adhesivos en las superficies externas o como mantas incrustadas e impregnadas en el interior de la sección transversal del perfil de WPC (Zolfaghari et al., 2013).

Se han utilizado experimentalmente varios biopolímeros en la producción de WPC; sin embargo, los polímeros más adecuados para la industria son el ácido poliláctico [PLA] y polihidroxialcanoatos [PHA] y sus derivados. Estos biopolímeros se consideran adecuados debido a su disponibilidad y sus puntos de fusión. Por otra parte, aunque los WPC biodegradables se han investigado y producido para períodos de vida cortos y aplicaciones a mediano plazo, no son aplicables a la industria de la construcción y, por tanto, no han sido considerados en este artículo.

...de darle valor y mejorar las propiedades del producto obtenido. Marcela Ibañez pertenece al Cenur Noreste de la Udelar. Ha sido invitada a participar de esta investigación por su experticia en temas referidos a la madera.

## Fibras de madera y cargas

El uso de cargas en la industria de los polímeros no es nada nuevo. Minerales, como talco o carbonato de calcio, y materiales sintéticos, como vidrio o compuestos de residuos plásticos mixtos reciclados y reforzados con fibra de vidrio, pueden reemplazar la madera tratada químicamente en aplicaciones exteriores a gran escala con grandes ventajas desde el punto de vista ambiental. Se las puede emplear como travasas en puentes de ferrocarril, o para la fabricación de escaleras, *decks*, entre otros productos. Sin embargo, su comportamiento mecánico a altas temperaturas y su resistencia a los rayos UV requieren un estudio más detenido (Bajracharya et al., 2014).

El aserrín, madera obtenida mediante la tecnología de molienda, se clasifica (Klyosov, 2007) en cuatro fracciones por tamaño (50–150  $\mu\text{m}$ , 100–200  $\mu\text{m}$ , 200–450  $\mu\text{m}$  y 250–700  $\mu\text{m}$ ), aunque en la práctica se lo obtiene en una distribución muy amplia por tamaño de partícula, de 20  $\mu\text{m}$  a 5000  $\mu\text{m}$ , como subproducto del corte de madera con sierra (Dieste, 2014).

El tamaño de las partículas y la geometría de estas pueden tener una gran influencia en las propiedades del compuesto. Generalmente, cuando la madera se tritura en una industria, la distribución del tamaño de partículas es amplia. Stark y Rowlands (2003), Hernández-Jiménez et al. (2015), entre otros, evaluaron los efectos del tamaño de partícula en las propiedades finales del compuesto. La conclusión general a la que llegaron estos estudios es que, cuanto más fino es el polvo usado, los compuestos sometidos a carga de impacto exhiben menores concentraciones de tensión. Sin embargo, también debe tenerse en cuenta que la relación de forma de la partícula —o fibra— tendrá un efecto sobre las propiedades del compuesto. Así, una relación de forma más grande conduce a una mejor transferencia de tensión entre la matriz y la fibra (Schwarzkopf y Muszynski, 2015).

La elección del tipo de madera utilizada en la fabricación de WPC generalmente se basa en factores como la ubicación geográfica, su disponibilidad y su costo. Sin embargo, esta elección tiene un impacto significativo en el producto final, ya que influye en la composición química, la compatibilidad de las fibras con el polímero y las propiedades mecánicas del producto terminado.

Berger y Stark (1997) evaluaron varias especies por su compatibilidad con los polímeros y descubrieron que la fibra de las maderas duras daba compuestos con mejores propiedades de flexión y deflexión térmica.

Si bien se han realizado algunas investigaciones sobre el uso de residuos de madera posindustriales y posconsumo en la fabricación de WPC (Chaharmahali et al., 2010; Nourbakhsh et al., 2010), muchas se han centrado en el uso de residuos de madera limpios —aserrín y residuos planos— como fuente de fibra. Spear et al. (2015) señalaron que los datos mecánicos encontrados para el aserrín WPC posconsumo por Chaharmahali et al. (2010) son comparables con las cifras. Sin embargo, se ha observado que la investigación sobre el uso de residuos de madera ha sido eclipsada por la investigación sobre el uso de

plásticos posconsumo y reciclados, lo que abre un gran campo de aplicación en nuestra región, teniendo en cuenta que disponemos de ambos materiales en abundancia.

En nuestro país, desde el Laboratorio de Polímeros del Instituto de Ensayo de Materiales venimos investigando la aplicación de maderas nacionales —pino y eucalipto— sobre polímeros vírgenes y reciclados, con el objetivo de saber el potencial de estos materiales en el ámbito local.

## Breve introducción a los métodos de procesamiento

### COMPOUNDING

La combinación del polímero y la fibra de madera es un paso crítico en la fabricación de WPC. Es fundamental que las partículas se distribuyan uniformemente por toda la matriz polimérica para dar al producto final propiedades uniformes. La dispersión de las fibras se vuelve cada vez más importante con el aumento del contenido que está en el compuesto. Si los componentes del WPC se combinan correctamente, permitirán que la fibra se «humedezca» en el polímero, lo que conducirá a una mejor transferencia de carga en el producto final.

La extrusión es el proceso de formación más común en la fabricación de WPC. El polímero compuesto se vuelve a fundir y luego se alimenta a través de una matriz en la extrusora, para formar el perfil que se necesita para obtener el producto deseado. El material extruido luego se introduce en un baño de enfriamiento antes de cortarlo a la longitud deseada. Se puede utilizar una extrusora de doble tornillo, y agregar aditivos a los *pellets* antes de la extrusión, como compatibilizantes o protectores UV, mejorando con ello las propiedades del material compuesto.



FIGURA 1. WPC FABRICADO EN URUGUAY. FUENTE: FOTOGRAFÍA DE CLAUDIA BORDÓN

### EL PROCESO DE EXTRUSIÓN

Se produce un producto lineal con un perfil 2D. Hay dos tipos principales de perfiles extruidos de WPC: perfiles huecos y perfiles macizos [ver Fig 1.].

Esto hace que los productos extruidos sean fácilmente intercambiables con productos de madera moldeada, como tarimas para terrazas, revestimientos, fachadas, cercas, tablonos y aplicaciones de embalaje. La ventaja de la extrusión, con respecto a otras técnicas de moldeo, es que es un proceso continuo, además de que la fabricación del producto es económica tanto en lo que refiere a tiempo como a mano de obra. Schut (2007) realizó hace dieciséis años, por primera vez, la extrusión directa de un perfil de ventana hueco de WPC de pared delgada, y desarrollos recientes —año 2015— de la empresa austríaca Zitta utilizan una matriz plástica de PVC con aditivos del 50% en peso y una fracción fina de harina de madera (< 50  $\mu\text{m}$  aproximadamente 50% en peso).

### MOLDEO POR INYECCIÓN

Aunque la extrusión suele ser la técnica de moldeo más común para WPC, el moldeo por inyección se puede utilizar para modelar estructuras tridimensionales de formas complejas. Como en la extrusión, en el moldeo por inyección los *pellets* de polímero-madera también se vuelven a fundir, solo que después son introducidos en un molde y no a través de una matriz. Este molde entonces se enfría y el componente se expulsa. Por la propia naturaleza de la producción, el ciclo de fabricación de componentes moldeados por inyección es un proceso por lotes, por lo tanto, es necesario hacer una gran inversión en herramientas para la fabricación, lo que encarece el proceso. El moldeo por inyección se utiliza para artículos como macetas, caja de altavoces y rejillas de radiador.

### WPC en la industria de la construcción

En la industria de la construcción de otros países, los WPC son ampliamente utilizados. De acuerdo con un estudio de Osburg et al. (2016), por su linealidad y belleza, los productos de WPC se presentan como buenos sustitutos de aquellos que se fabrican a partir de madera maciza y polímeros puros. Por otra parte, tanto la preocupación medioambiental como la innovación de los consumidores hacia los nuevos materiales hacen que el WPC sea muy aceptado.

El aumento de la credibilidad sobre las posibles áreas de aplicación del WPC en el sector de la construcción —es decir, para su uso en materiales de revestimiento y fachada— lleva necesariamente al desarrollo de nuevas investigaciones para mejorar su resistencia a la flexión y al fuego, a la descomposición frente a hongos y a la degradación por rayos UV (Naumann et al., 2012; Friedrich et al., 2016).

El producto de WPC más común en el entorno construido es la tarima para terrazas o *deck*. Como sustituto de los que se fabrican en madera maciza, presenta dos ventajas: un menor costo de mantenimiento, pues no requiere ser retirado, y

un menor impacto ambiental, ya que con su uso se evitan los químicos potencialmente peligrosos involucrados en el proceso de «curado» de la madera. Pero este no es el único elemento de WPC pensado para la industria de la construcción, en el mercado ya se ven otros, como barandillas, escaleras, ventanas, puertas, pisos, revestimientos de cercas y molduras interiores (Clemons, 2002; Klyosov, 2007; Schwarzkopf y Burnard, 2016). Por último, es preciso recordar que las propiedades de inflamabilidad de los WPC deben mejorarse con retardantes de llama para ampliar su uso en el sector de la construcción (Kim y Pal, 2011).

### Performance de los WPC

A nivel microestructural, las propiedades de resistencia de los productos de WPC están determinadas por la unión interfacial entre la fibra de madera y el polímero. Habitualmente se utilizan compatibilizadores para mejorar dicha adhesión entre las fibras de madera hidrofílicas y la matriz de polímero hidrofóbico (Olakanmi y Strydom, 2016). Las propiedades intrínsecas del WPC se pueden mejorar mediante el uso de fibras de madera, debido a que estas tienen una mayor relación de aspecto del refuerzo en comparación con la presentada por las partículas de aserrín de madera (Stark y Rowlands, 2003). Sin embargo, existe un problema tecnológico con la alimentación de fibras de madera discretas en el proceso de extrusión o moldeo por inyección para mantener la longitud de la fibra y evitar la degradación por calor y, a su vez, asegurar la orientación y dispersión del aserrín en el acabado final del producto. A nivel macroscópico, el diseño de la sección transversal del perfil es lo más importante para la obtención de buenas propiedades de resistencia (Ballerini et al., 2008; Schut, 2007).

El rendimiento del WPC en condiciones exteriores hace referencia a la resistencia a los hongos y a la decoloración. También a las propiedades de inflamabilidad, que pueden ser mejoradas por medio de aditivos retardantes de llama (Kim y Pal, 2011), como el polifosfato de amonio y el pentaeritrol. Sin embargo, es preciso advertir que estos agregados, si bien disminuyen el efecto inicial —temperatura de degradación térmica y promoción de la formación de carbón—, reducen también la resistencia al impacto Izod o la resistencia a la tracción del WPC (Li y He, 2004). El límite del reciclaje mecánico del WPC se reconoce debido a la degradación de la matriz de polímero en los repetidos ciclos de calentamiento (Najafi, 2013) y la reducción de propiedades mecánicas del compuesto debido a la reducción del tamaño de las fibras de madera (Olakanmi y Strydom, 2016).

Las soluciones de compuestos 100% biodegradables reforzados con fibras naturales y biopolímeros de biomasa —proteínas, lípidos y polisacáridos—, ácido poliláctido y mezclas de PLA y PHA son un punto de gran interés en el futuro cercano, pero su mezcla y procesamiento necesitan mejoras, y el costo debe reducirse para hacerlos compatibles con la poliolefina, compuestos basados en matrices de derivados del petróleo (Bugnicourt et al., 2014; Sherman, 2008).



FIGURA 2. FOTO DEL WPC OBTENIDO EN EL LABORATORIO DE POLÍMEROS. A LA IZQUIERDA, EUCALIPTO, Y A LA DERECHA, PINO. FUENTE: FOTOGRAFÍA DE CLAUDIA BORDÓN

## Consideraciones finales y conclusiones

Como se destacó en este artículo, el WPC es un material con un gran potencial de mercado para usos arquitectónicos, que además compite en duración y costos con la madera natural, con ventajas desde el punto de vista ambiental, ya que permite reciclar dos residuos que se están generando en nuestro país en grandes volúmenes: el aserrín, que se genera en grandes volúmenes durante el procesamiento de la madera para uso estructural, y los termoplásticos, que con los objetivos del plan de residuos sólidos van a comenzar a acumularse.

Por otra parte, es de destacar que en Uruguay ya hay una industria instalada que produce *decks* inyectados a partir de insumos nacionales —aserrín y polietileno reciclado—.

A su vez, en el Instituto de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería estamos realizando una serie de experimentos para evaluar las propiedades mecánicas de los WPC obtenidos a partir de aserrín de eucalipto y pino, las dos especies maderables más comunes en nuestro país.

## Referencias bibliográficas

Bajracharya, R.M., Manalo, A.C., Karunasena, W. y Lau, K. (2014). An overview of mechanical properties and durability of glass-fibre reinforced recycled mixed plastic waste composites [Una descripción general de las propiedades mecánicas y la durabilidad de los compuestos de residuos plásticos mixtos reciclados reforzados con fibra de vidrio]. *Materials & Design*, 62, 98-112.

- Ballerini, A.A., Bustos, X.A., Nunez, M.A. y Wechsler, A. (2008, noviembre). Innovation in window and door profile designs using a wood-plastic composite [Innovación en el diseño de perfiles de puertas y ventanas mediante un compuesto de madera y plástico]. [Presentación de artículo]. 51ª Convención Internacional de la Sociedad de Ciencia y Tecnología de la Madera, 10 al 12 de noviembre de 2008, Concepción, Chile. Recuperado de [https://www.academia.edu/3192946/Innovation\\_in\\_window\\_and\\_door\\_profile\\_designs\\_using\\_a\\_wood\\_plastic\\_composite](https://www.academia.edu/3192946/Innovation_in_window_and_door_profile_designs_using_a_wood_plastic_composite)
- Berger, M.J. y Stark, N.M. (1997, diciembre). Effect of species and particle size on properties of woodflourreinforced polypropylene composites [Efecto de las especies y el tamaño de las partículas sobre las propiedades de los compuestos de polipropileno reforzados con harina de madera.]. [Presentación del artículo]. IV Congreso Internacional sobre Compuestos de Fibra de Madera y Plástico, 8 al 10 de diciembre de 1997, Le Meridien en Coronado, San Diego, California, EEUU.
- Bugnicourt, E., Cinelli, P., Lazzeri, A. y Alvarez, V. (2014). Polyhydroxyalkanoate (PHA): review of synthesis, characteristics, processing and potential applications in packaging [Polihidroxicanoato (PHA): revisión de síntesis, características, procesamiento y potenciales aplicaciones en *packaging*]. *Express Polymer Letters*, 8(11), 791-808. DOI <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2014.82>
- Chaharmahali, M., Mirbagheri, J., Tajvidi, M., Najafi, S.K. y Mirbagheri, Y. (2010). Mechanical and physical properties of wood plastic composite panels [Propiedades mecánicas y físicas de los paneles compuestos de madera y plástico.]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(2), 310-319. DOI:10.1177/0731684408093877
- Clemons, C. (2002). Wood-plastic composites in the United States: the interfacing of two industries [Compuestos de madera y plástico en los Estados Unidos: la interfaz de dos industrias]. *Forest Products Journal*, 52(6), 10-18.
- Dieste, A. (2014). Plan de inversiones en maquinaria y equipos (Informe de asesoramiento n° 3). <https://silo.tips/download/plan-de-inversiones-en-maquinaria-y>
- Friedrich, D. y Luible, A. (2016). Investigations on ageing of wood-plastic composites for outdoor applications: A meta-analysis using empiric data derived from diverse weathering trials [Investigaciones sobre el envejecimiento de compuestos de madera y plástico para aplicaciones en exteriores: un metanálisis que utiliza datos empíricos derivados de diversos ensayos de intemperismo]. *Construction and Building Materials*, 124, 1142-1152.
- Hughes, M. (2015). Plywood and other veneer-based products [Madera contrachapada y otros productos a base de chapas]. En M. P. Ansell (Ed.), *Wood Composites* (pp. 69-89). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Hull, D. y Clyne, T.W. (1996). *An Introduction to Composite Materials [Introducción a los materiales compuestos]*. (2ª ed.). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139170130>
- Jian, B., Mohrmann, S., Li, H., Li, Y., Ashraf, M., Zhou, J. y Zheng, X. (2022). A review on flexural Properties of Wood-Plastic Composites [Una revisión sobre las propiedades de flexión de los compuestos de madera y plástico.]. *Polymers*, 14(19), 3942. <https://doi.org/10.3390/polym14193942>

- Kim, J.K. y Pal, K. (2011). *Recent Advances in the Processing of Wood-Plastic Composites* [Avances recientes en el procesamiento de compuestos de madera y plástico]. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14877-4>
- Klyosov, A. A. (2007). *Wood-plastic composites* [Compuestos de madera plástica]. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Naumann, A., Seefeldt, H., Stephan, I., Braun, U. y Noll, M. (2012). Material resistance of flame retarded wood-plastic composites against fire and fungal decay [Resistencia del material de compuestos de madera y plástico retardantes de llama contra el fuego y la descomposición por hongos]. *Polymer Degradation*
- Nourbakhsh, A., Ashori, A., Tabari, Z. y Rezaei, H. (2010). Mechanical and thermo-chemical properties of wood-flour/polypropylene blends [Propiedades mecánicas y termoquímicas de mezclas de madera, harina y polipropileno.]. *Polymer Bulletin*, 65(7), 691-700.
- Martins G., Antunes F., Mateus A. y Malça, C. (2017). Optimization of a wood plastic composite for architectural applications [Optimización de un compuesto de madera y plástico para aplicaciones arquitectónicas]. *Procedia Manufacturing*, 12, 203-220. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.08.025>
- Ministerio de Ambiente. (2021). *Uruguay + Circular: Plan Nacional de Gestión de Residuos*. Recuperado de <https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/PNGR-general.pdf>
- Olakanmi, E.O. y Strydom, M.J. (2016). Critical materials and processing challenges affecting the interface and functional performance of wood polymer composites (WPCs) [Materiales críticos y desafíos de procesamiento que afectan la interfaz y el rendimiento funcional de los compuestos de polímeros de madera (WPC)]. *Materials Chemistry and Physics*, 171(2), 290-302. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.01.020>
- Osburg, V., Starck, M. y Toporowski, W. (2016). Consumer acceptance of wood-polymer composites: a conjoint analytical approach with a focus on innovative and environmentally concerned consumers [Aceptación por parte de los consumidores de los compuestos de madera y polímero: un enfoque analítico conjunto centrado en los consumidores innovadores y preocupados por el medio ambiente]. *Journal of Cleaner Production*, 110, 180-190.
- Pérez Flores, D. A. (2018). *Caracterización y rendimiento en la transformación de madera en rollo a madera aserrada de la especie de pino (Pinus oocarpa Schiede) en seis aserraderos en Nueva Segovia y Estelí*. (Tesis de maestría, Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua). Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria: <https://repositorio.una.edu.ni/3720/>
- Pickering, K.L., Aruan Efendy, M.G. y Le, T.M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance [Una revisión de los desarrollos recientes en compuestos de fibras naturales y su desempeño mecánico.]. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83, 98-112. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>
- Quirós, R., Chinchilla, O. y Gómez, M. (2005). Rendimiento en aserrío y procesamiento primario de madera proveniente de plantaciones forestales. *Agronomía Costarricense*, 29(2), 7-15.
- Schut, J.H. (2007). First extrusion of complex WPC window profiles [Primera extrusión directa de perfiles complejos de ventanas de WPC]. *Plast. Technol.* <https://www.ptonline.com/articles/first-direct-extrusion-of-complex-wpc-window-profiles>
- Schwarzkopf, M.J. y Muszynski, L. (2015). Strain distribution and load transfer in the polymer wood particle bond in wood plastic composites [Distribución de deformaciones y transferencia de carga en la unión de partículas de madera polimérica en compuestos plásticos de madera]. *Holzforshung*, 69(1), 53-60. <https://doi.org/10.1515/hf-2013-0243>
- Schwarzkopf, M.J. y Burnard, M.D. (2016). Wood-plastic composites—performance and environmental impacts [Compuestos de madera y plástico: rendimiento e impactos ambientales]. En A. Kutnar y S.S. Muthu (Eds.), *Environmental Impacts of Traditional and Innovative Forest-Based Bioproducts* (pp. 19-43). Singapur: Springer. DOI:10.1007/978-981-10-0655-5\_2
- Sherman, L.M. (2008, 7 de enero). Enhancing biopolymers: additives are needed for toughness, heat resistance & processability [Polímeros mejorados: se necesitan aditivos para aumentar la dureza, la resistencia al calor y la procesabilidad]. *Plastics Technology*. <http://www.ptonline.com/articles/enhancing-biopolymers-additives-are-needed-for-toughness-heat-resistance-processability>
- Spear, M.J.; Eder, A. y Carus, M. (2015). Wood polymer composites [Compuestos de madera y polímero]. En M.P. Ansell (Ed.), *Wood Composites* (pp. 195–249). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Stark, N.M. y Rowlands, R.E. (2003). Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites [Efectos de las características de la fibra de madera sobre las propiedades mecánicas de los compuestos de madera/polipropileno]. *Wood and Fiber Science*, 35(2), 167-174.
- Zierdt, P., Theumer, T., Kulkarni, G., Däumlich, V., Klehna, J., Hirsch, U. y Weber, A. (2015). Sustainable wood-plastic composites from bio-based polyamide 11 and chemically modified beech fibers composites [Compuestos sostenibles de madera y plástico a partir de poliamida 11 de origen biológico y compuestos de fibras de haya modificadas químicamente]. *Sustainable Materials and Technologies*, 6, 6-14. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.10.001>
- Zolfaghari, A., Behraves, A.H. y Adli, A. (2013). Continuous glass fiber reinforced wood plastic composite in extrusion process: mechanical properties [Compuesto plástico de madera reforzado con fibra de vidrio continua en proceso de extrusión: propiedades mecánicas]. *Materials & Design*, 51, 701-708. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.082>

E

experimentación

## Aislante a partir de fibras naturales de lana de oveja

### PALABRAS CLAVE

EFICIENCIA ENERGÉTICA; AISLACIÓN TÉRMICA Y ACÚSTICA; NUEVOS MATERIALES; CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE; MATERIALES NATURALES

### Resumen

La lana de oveja presenta excelentes propiedades aislantes, a lo que se le suma su capacidad de absorber humedad y luego liberarla según las condiciones ambientales en las que se encuentre, manteniendo sus cualidades intactas. En nuestro país actualmente se estima que hay una acumulación de lana que supera los 30 millones de kg y no se ha podido comercializar. La mayoría corresponde a lanas gruesas —con un diámetro de fibra superior a 28  $\mu\text{m}$ — que han tenido menos demanda y una baja en su cotización. Por estos motivos, las empresas del sector están buscando alternativas de valorización. Es en este contexto que surge por parte de Tops Fray Marcos S.A. la idea de evaluar el uso y la sostenibilidad de la lana como material aislante térmico y acústico para su uso en el sector de la construcción. El objetivo general del proyecto es desarrollar un prototipo de manta para ser utilizado como aislante térmico y acústico, fabricado a partir de esta lana, que sea una alternativa sostenible a los aislantes más comúnmente utilizados: los fabricados con fibras minerales como la lana de vidrio y la lana de roca.

### STEPHANY ARREJURIA

Arquitecta especializada en diseño, cálculo y construcción de estructuras de madera. Se desempeña como investigadora en Latitud, Fundación LATU en el Área de Tecnología de la Madera. Su trabajo abarca el desarrollo de productos de ingeniería y sistemas constructivos de madera, la generación de documentos técnicos para apoyar el desarrollo de la construcción con maderas nacionales y el desarrollo de materiales sostenibles para su uso en construcción. Ejerce además como arquitecta independiente.

## La lana gruesa como una alternativa sustentable de aislante termoacústico

En la actualidad, las certificaciones ambientales ganan peso en la demanda de los materiales en general, debido a que la concientización del consumidor impulsa la tendencia hacia el uso de materiales sostenibles, desplazando paulatinamente a los que son producidos a partir de materias primas sintéticas de origen no renovable.

El uso de energías y materiales biológicos renovables garantiza una producción natural y sostenible que, en la medida en que se gestionen adecuadamente los residuos biodegradables, contribuye a la captura de carbono del medioambiente.

La cadena ovina —en particular, el sector lanero uruguayo— contribuye en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible [ODS] promovidos por las Naciones Unidas. Las fibras de la lana son un material completamente natural, biodegradable, renovable, reciclable, siendo además productos de larga vida útil. La producción natural y sostenible en esta cadena contribuye a la captura de carbono del medioambiente. De acuerdo con estimaciones de Uruguay XXI (2022), la mitad del peso de la lana es carbono capturado.

Uruguay, junto con Argentina, República Checa y China, es uno de los cuatro polos industriales exportadores de lana a nivel internacional. A la hora de considerar la sostenibilidad de un producto, no solo es importante la sostenibilidad de los materiales que lo integran, sino también la de las diferentes etapas del proceso de obtención. En el caso de productos obtenidos a partir de lana, esto abarcaría el trabajo con los animales en campo, donde Uruguay es uno de los pocos países que cuenta con la certificación RWS [Responsible Wool Standard]. Esta certificación tiene el fin de demostrar que el producto fue obtenido bajo criterios regulados tales como procesos de esquila, adecuado bienestar animal, cuidado del ambiente de producción, entre otros.

El principal uso de la lana actualmente es la industria textil, dependiendo su destino final de las características de las fibras tales como diámetro, largo, resistencia y color. De estas características, la principal, es el diámetro, pues determina el tipo de hilado y tejido en el que es factible de ser utilizada la fibra y, por ende, fija el precio de la lana. De acuerdo con los datos reportados por Uruguay XXI (2022), estos diámetros generalmente varían en un rango que va desde los 12-14  $\mu\text{m}$  hasta los 40-50  $\mu\text{m}$ , dependiendo de la raza y las condiciones ambientales de crianza de los animales, encontrándose en Uruguay fibras de entre 15-34  $\mu\text{m}$ . La lana más fina se usa para confeccionar prendas de vestir, la lana media para prendas de abrigo y la más gruesa para tapicería y alfombras.

La lana de oveja como material tiene una gran cualidad aislante, siendo además capaz de absorber humedad en un orden del 30% de su peso y luego liberarla manteniendo sus cualidades intactas.

Desde el punto de vista del mercado, la venta de lanas medias y gruesas marcó un fuerte descenso desde la paralización del mercado internacional en 2019, debido a la guerra comercial entre China y Estados Unidos, y en 2020, debido a la

pandemia. Esto provocó la acumulación de *stock* en los países productores, que de acuerdo con estimaciones realizadas en conversaciones con el Secretariado Uruguayo de la Lana [SUL], tomando como base los datos de las exportaciones de los últimos años, en nuestro país supera los 30 millones de kg de lana. Este acumulado se encuentra almacenado, debido a que mayoritariamente corresponde a lanas gruesas —con un tamaño de fibra superior a las 28  $\mu\text{m}$ —, que han tenido menos demanda, descendiendo su cotización entre un 20% y 30%.

Por este motivo, en búsqueda de una opción para la utilización de la lana gruesa en *stock*, y acompañando el desarrollo de productos más amigables con el medioambiente, surge la idea de utilizar dicha lana para la fabricación de mantas aislantes, para su uso principalmente en la industria de la construcción. Esto brinda una alternativa aislante frente a las otras utilizadas hoy en día en las construcciones livianas de tipo *steel framing* y *wood framing*, fabricadas con materiales minerales con un alto consumo energético en su producción, como son los casos de la lana de vidrio y la lana de roca.

A su vez, el uso de la lana como material aislante en viviendas con sistema de construcción liviano parece interesante para su aplicación en la construcción de la vivienda de interés social que está siendo promovida a través del Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial y de la Comisión Honoraria de la Madera. Además, varias empresas del sector han manifestado su interés en el desarrollo de este producto.

El estudio de prefactibilidad de fabricación de las mantas se enmarca en el proyecto «Desarrollo de nuevos productos a partir de lana»,<sup>1</sup> que es llevado adelante por la empresa lanera Tops Fray Marcos S.A., el equipo técnico del Laboratorio Tecnológico del Uruguay [LATU] y Latitud, y cuenta además con el apoyo de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación [ANII].

En el marco del proyecto se elaboraron diferentes mantas de lana, tomando como punto de partida las presentaciones comerciales más frecuentemente utilizadas para la lana de vidrio y la lana de roca.

El proceso de fabricación de las mantas se agrega como un complemento al proceso tradicional que la empresa realiza con la lana para fabricar los tops destinados a la industria textil, que son el producto principal de su proceso.

Primero, la lana sucia pasa por un proceso de clasificación, luego, se procede a su lavado y enjuague en bateas sucesivas con agua a distintas temperaturas para extraer la grasa y el polvo que contiene. Posteriormente, se realiza un proceso de secado, para más tarde pasar a la etapa de cardado y preparación para el peinado.

La lana gruesa destinada a la producción de mantas aislantes, una vez limpia y seca, es derivada a un segundo proceso en el que se fabrican y pliegan las mantas. Con una carda diseñada para generar un manto homogéneo, se pasa a la calandra. Este equipo aporta temperatura, presión y humedad al manto para generar cohesión entre las fibras.

Una vez fabricadas las mantas se procedió a la evaluación y análisis de sus características: composición, inflamabilidad y desempeño térmico y acústico. Las conclusiones de cada uno de estos ensayos, sumadas a las evaluaciones

1. Proyecto CF\_1\_2022\_1\_174104.

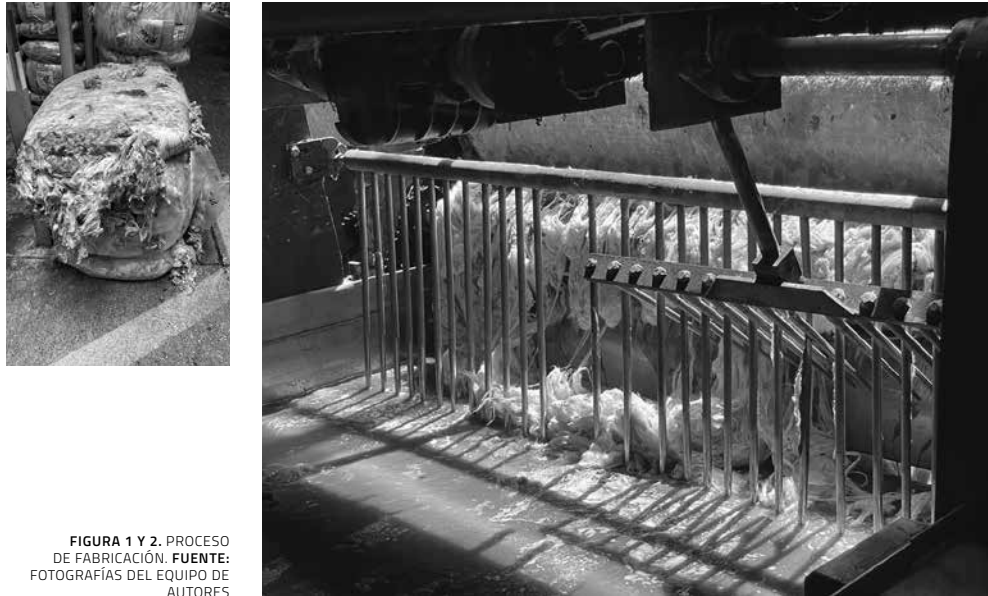


FIGURA 1 Y 2. PROCESO DE FABRICACIÓN. FUENTE: FOTOGRAFÍAS DEL EQUIPO DE AUTORES

realizadas por potenciales usuarios del producto, se utilizaron para adaptar el sistema de fabricación de las sucesivas tandas de mantas, como forma de acercarse a un producto apto para ser lanzado en el mercado.

Para evaluar la composición de las mantas, una muestra se colocó en el microscopio de luz polarizada. Se identificaron las fibras y —si correspondía—, mediante una ruta química de solubilidad en distintos solventes, se determinó su composición de acuerdo con la Norma AATCC 20 y 20A (American Association of Textile Chemists and Colorists [AATCC], 2021).

También se realizó el ensayo para determinar el diámetro medio de las fibras y los parámetros de distribución según la Norma IWTO-12-2012 (International Wool Textile Organisation, 2012), utilizando el equipo Sirolan-Laserscan. Por otra parte, se evaluó el peso por metro cuadrado —es decir, la relación entre el peso de la manta y su superficie— con un método basado en la Norma ASTM D3776/ D3776M-20 opción C (ASTM International, 2020).

Para evaluar el desempeño de las mantas de lana de oveja como aislante, se realizaron ensayos de conductividad térmica, desempeño acústico e inflamabilidad, utilizando métodos basados en normas técnicas.

Para evaluar la conductividad térmica del material, se utilizó un método basado en la norma ISO 8301 (International Organization for Standardization, 1999), utilizando un equipo de platos calientes, que mediante sensores internos determina la transmitancia térmica del material.

Para estudiar el desempeño acústico de las mantas de lana, se realizó un ensayo comparativo simplificado, tomando como base los conceptos acústicos descritos en las normas UNE-EN ISO 354:2004 (Asociación Española de Norma-



FIGURA 3. MANTAS DE PRUEBA. FUENTE: FOTOGRAFÍA DEL EQUIPO DE AUTORES

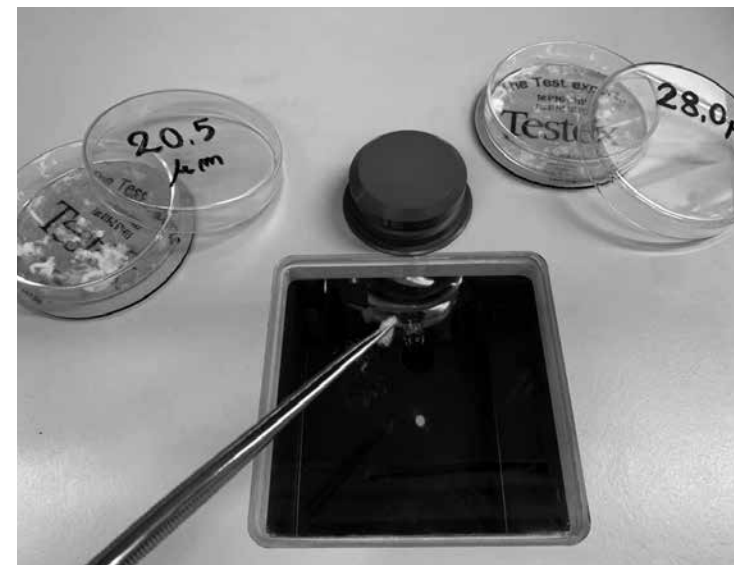


FIGURA 4 Y 5. ENSAYO DE DIÁMETRO MEDIO DE FIBRA. FUENTE: FOTOGRAFÍAS DEL EQUIPO DE AUTORES

lización, 2004) y UNE-EN ISO 10534-2:2002 (Asociación Española de Normalización, 2022). Dichas normas permiten evaluar el comportamiento acústico del material aislante y determinar un rango de capacidad de amortiguar el sonido en comparación con otros aislantes utilizados en el mercado.



FIGURA 6. ENSAYO DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA. FUENTE: FOTOGRAFÍA DEL EQUIPO DE AUTORES

Para ello, se confeccionó un dispositivo aislado con cada uno de los diferentes aislantes utilizados en la comparación y, mediante una fuente generadora de sonido colocada dentro de la cámara aislada —que emite señales de acuerdo con el tipo de onda y de frecuencia deseados—, se captó la señal con un sonómetro que toma las ondas de sonido y las transforma en pulsos eléctricos, que son interpretados por el propio equipo que muestra en la pantalla su equivalente a esta energía en decibeles [dB]. El ensayo se llevó a cabo en una cámara de atenuación para reducir lo máximo posible la influencia del ruido ambiente en el registro de las medidas.

La evaluación de inflamabilidad vertical y horizontal se realizó con método basado en la norma FMVSS 302 (Federal Motor Vehicle Safety Standards, s.f.), en el que la muestra del material se expone de forma vertical u horizontal a una llama durante 15 s en una cámara de combustión, para evaluar si la llama se extingue y en cuanto tiempo lo hace, o el tiempo que tarda la llama en avanzar una determinada distancia. De este modo, se logra calcular la velocidad de combustión por minuto.

Además de la evaluación del material en sí, se está llevando a cabo la evaluación de la sostenibilidad del producto. Esto se realiza mediante el Análisis de Ciclo de Vida [LCA, por sus siglas en inglés], que a su vez permitirá encontrar los puntos críticos del proceso productivo y tomar las acciones correctivas necesarias.

El LCA es una de las metodologías más integrales entre las utilizadas para evaluar los potenciales impactos ambientales de un producto, ya que contem-

pla los asociados a todas las etapas del ciclo de vida del producto, desde la extracción de las materias primas hasta su disposición final, pasando por su fabricación, distribución y uso.

En 1997, la International Organization for Standardization expide la primera versión del estándar internacional ISO 14040, que estableció los principios y bases metodológicas para el LCA. La versión vigente integra una serie de estándares que abordan distintos aspectos vinculados al concepto de ciclo de vida. En particular, la norma ISO 14020 (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2000) establece las directrices para el desarrollo y uso de etiquetas y declaraciones ambientales de tres tipos, de las cuales dos se basan en el empleo de LCA.

Las Declaraciones Ambientales de Productos [EPD, por sus siglas en inglés] son herramientas esenciales en la industria de la construcción y otros sectores, que proporcionan información detallada y verificada sobre el impacto ambiental de un producto a lo largo de su ciclo de vida. Estas declaraciones son valiosas tanto para los fabricantes como para los consumidores, arquitectos, ingenieros y otros profesionales involucrados en la toma de decisiones de construcción sostenible. La conveniencia de contar con EPD para productos de construcción radica en varios aspectos:

1. **Transparencia y toma de decisiones informadas:** las EPD permiten a los interesados comprender el impacto ambiental de un producto, lo que les ayuda a tomar decisiones informadas en el proceso de diseño y construcción. Al contar con información precisa y confiable, los profesionales pueden seleccionar materiales y productos que reduzcan el impacto ambiental general de un proyecto.
2. **Comparabilidad:** las EPD permiten comparar productos similares en función de su impacto ambiental, lo que fomenta la competencia en el mercado y motiva a los fabricantes a mejorar la sostenibilidad de sus productos.
3. **Cumplimiento normativo y certificación:** en muchos casos, las EPD son un requisito para obtener certificaciones de construcción sostenible, como LEED o BREEAM. También pueden ayudar a los fabricantes a cumplir con regulaciones ambientales y normativas gubernamentales.
4. **Reducción de la huella ambiental:** al proporcionar información sobre el ciclo de vida completo de un producto, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final, las EPD permiten identificar áreas clave de mejora y reducir la huella ambiental en todas las etapas.
5. **Mejora en la imagen de marca:** los fabricantes que demuestran un compromiso genuino con la sostenibilidad a través de EPD pueden mejorar su imagen de marca y atraer a consumidores y clientes preocupados por el medioambiente.

En el contexto de los materiales aislantes utilizados en la construcción, la lana de oveja se destaca como una opción sostenible y con beneficios ambientales notables. Al considerar la conveniencia de contar con EPD específicas para productos aislantes de lana de oveja, se pueden destacar las siguientes ventajas:

1. **Renovabilidad y baja huella de carbono:** es un material renovable, ya que se obtiene de fuentes naturales y renovables. Además, tiene una baja huella de carbono en comparación con muchos materiales aislantes sintéticos, lo que contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
2. **Eficiencia energética:** es un excelente aislante térmico y acústico, lo que ayuda a reducir la pérdida de calor y mantener una temperatura interior constante. Esto contribuye a la eficiencia energética de los edificios, ya que reduce la necesidad de calefacción y refrigeración.
3. **Biodegradabilidad y gestión de residuos:** a diferencia de muchos materiales aislantes sintéticos, es biodegradable y no genera residuos perjudiciales a largo plazo. Al final de su vida útil, puede ser reciclada o compostada, lo que disminuye su impacto ambiental en la etapa de disposición.
4. **Salud y confort interior:** es un material natural y no tóxico, lo que mejora la calidad del aire interior en los edificios. Además, regula la humedad de manera efectiva, creando un ambiente interior más saludable y confortable.
5. **Apoyo a la agricultura sostenible:** su producción puede fomentar prácticas agrícolas sostenibles, en tanto que el aprovechamiento de productos tales como la lana de fibra gruesa, que actualmente no tienen una salida fácil en el mercado, evita la generación de residuos y promueve una economía circular.

La norma ISO 14025 (Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2006) establece como requisito de las EPD emplear Reglas de Categoría de Productos [PCR, por sus siglas en inglés] para garantizar la coherencia, comparabilidad y credibilidad de la información ambiental proporcionada en las EPD. Las PCR son documentos que establecen las reglas y directrices específicas para la realización de EPD de productos pertenecientes a una categoría particular, para asegurar que las evaluaciones de ciclo de vida y los datos presentados en las EPD sean consistentes y comparables entre diferentes productos dentro de una misma categoría.

Para poder habilitar la opción de incorporar una declaración ambiental al aislante de lana, el LCA se realizará siguiendo las reglas de categoría de producto que le corresponden. En particular, las establecidas para los productos de construcción en forma genérica, ISO 15804:2012 (Asociación Española de Normalización, 2021) e ISO 21930:2017 (Asociación Española de Normalización, 2010); para productos de aislamiento térmico, UNE-EN 16783 (Asociación Española de Normalización, 2017); para productos de lana, guías de IWTO (International Wool Textile Organisation, 2016), y de FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2016).

Las pruebas realizadas hasta el momento indican que es factible lograr un producto con un desempeño similar al de los disponibles en plaza y comúnmente utilizados como aislantes en paredes, cielorrasos y entrepisos en construcciones livianas, si bien el prototipo en estudio aún se encuentra en etapa de ajustes. De este modo, se apunta a obtener un nuevo producto apto para ser usado en la construcción, que ofrezca prestaciones similares a las de los utilizados en la actualidad, pero con el beneficio de ser más amigable con el medioambiente. Además,

esta alternativa permitirá valorizar una materia prima que hoy en día se encuentra sin salida comercial y que, en algunos casos, es percibida como una problemática.

## Referencias institucionales

El LATU es referente en innovación, transferencia tecnológica y soluciones de valor en servicios analíticos, de evaluación de la conformidad, metrológicos y tecnológicos. Es la única entidad del Uruguay, y una de las pocas a nivel mundial, licenciada por la International Wool Textile Organisation [IWTO], lo que le permite brindar a la cadena textil lanera la posibilidad de realizar certificados IWTO de sus productos, agregándoles valor y facilitando su ingreso a los principales mercados laneros internacionales.

Latitud es la Fundación del LATU orientada a la planificación y ejecución de proyectos de Investigación, Desarrollo e Innovación [I+D+i], creada con el objetivo de ser una organización flexible enfocada en adaptarse a las necesidades tanto de la industria como del país.

## Referencias bibliográficas

- American Association of Textile Chemists and Colorists [AATCC]. (2021, enero). *Test Method for Fiber Analysis: Quantitative* [Método de testeo para análisis de fibra: cuantitativo] (AATCC 20 y 20A). Estados Unidos: AATCC.
- Asociación Española de Normalización. (2004). *Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante* (UNE-EN ISO 354:2004). Madrid: Aenor.
- (2010). *Sostenibilidad en la construcción de edificios. Declaración ambiental de productos de construcción* (UNE-ISO 21930:2010). Madrid: Aenor.
- (2017). *Productos de aislamiento térmico. Reglas de categoría de producto (RCP) para productos manufacturados y formados in-situ, destinadas a la elaboración de declaraciones ambientales de producto* (UNE-EN 16783:2017). Madrid: Aenor.
- (2021). *Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción* (UNE-EN 15804:2012+A2:2020/AC:2021). Madrid: Aenor.
- (2022). *Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia* (UNE-EN ISO 10534-2:2002). Madrid: Aenor.
- ASTM International. (2020, julio). *Standard Test Method for Mass Per Unit Area (Weight) of Fabric* [Método de prueba estándar para la masa por unidad de área (peso) de tejido] (ASTM D3776/ D3776M-20 option C). ASTM: Estados Unidos.
- Federal Motor Vehicle Safety Standards. (s.f.). *Flammability test* [Prueba de inflamabilidad] (FMVSS 302).
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. (2000). *Etiquetas y declaraciones ambientales - Principios generales* (UNIT-ISO 14020:2000). Uruguay: UNIT.

- (2006). *Etiquetas y declaraciones ambientales. Declaraciones ambientales tipo III. Principios y procedimientos* (UNIT-ISO 14025:2006). Uruguay: UNIT.
- International Organization for Standardization. (1999). *Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter apparatus* [Aislamiento térmico - Determinación de la resistencia térmica en estado estable y propiedades relacionadas - Aparato medidor de flujo de calor] (ISO 8301:1991). Estados Unidos: ISO.
- International Wool Textile Organisation [IWTO]. (2012, diciembre). *Measurement of the Mean and Distribution of Fibre Diameter Using the Sirolan-Laserscan Fibre Diameter Analyzer* [Medición de la media y distribución del diámetro de la fibra utilizando el analizador de diámetro de fibra Sirolan-Laserscan] (IWTO-12-2012). Estados Unidos: IWTO.
- (2016). *Guidelines For Conducting A Life Cycle Assessment Of The Environmental Performance Of Wool Textiles* [Directrices para llevar a cabo una evaluación del ciclo de vida del rendimiento ambiental de textiles de lana]. Estados Unidos: IWTO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]. (2016). *Greenhouse gas emissions and fossil energy use from small ruminant supply chains: Guidelines for assessment. Livestock Environmental Assessment and Performance Partnership* [Emisiones de gases de efecto invernadero y uso de energía fósil en cadenas de suministro de pequeños rumiantes: Directrices para la evaluación. Asociación de Evaluación Ambiental y Rendimiento Ganadero]. Italia: FAO.
- Uruguay XXI. (2022, junio). *Sector Lanero en Uruguay*. Disponible en <https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/centro-informacion/articulo/sector-lanero/>

## Restauración arquitectónica

Un paradigma de construcción sostenible a través de la reducción de la huella de carbono

ÁLVARO RIQUELME BRAVO

Arquitecto (Universidad Tecnológica Metropolitana, 2006). Especialista en restauración arquitectónica. Ingresó a Proterra en el año 2013, en forma posterior a la realización del 13° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra en Valparaíso, donde fue coordinador local. Ha intervenido —en diferentes niveles— en más de quince monumentos nacionales en Chile, proyectando y ejecutando diversas acciones sobre edificaciones históricas. Actualmente dirige Xiloscopio, empresa especialista en restauración.

### PALABRAS CLAVE

IDENTIDAD URBANA; RECICLAJE DE MATERIALES;  
RECUPERACIÓN DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

### Resumen

En el contexto actual, caracterizado por una creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de adoptar prácticas constructivas más sostenibles, la restauración arquitectónica emerge como un ejemplo destacado de cómo la preservación de edificios históricos puede contribuir significativamente a la reducción de la contaminación del sector construcción. Este artículo profundiza en los aspectos clave de la restauración arquitectónica en el marco de la sostenibilidad, destacando la reutilización, el reciclaje de materias primas y la recuperación de elementos constructivos —como pilares fundamentales de esta estrategia— en el proceso de restauración y puesta en valor de la Iglesia San Francisco de Barón, ubicada en Valparaíso, Chile. Este edificio emblemático sirve como ejemplo elocuente de cómo la intersección entre la restauración y la sostenibilidad se manifiesta de manera tangible.

El artículo argumenta tres aspectos fundamentales que posibilitan la relación de sostenibilidad con restauración arquitectónica: a) se enfatiza que, además de la conservación cultural y arquitectónica, las acciones de restauración y conservación promueven la reducción de la demanda de recursos naturales, al reutilizar estructuras y elementos existentes; b) se subraya el papel fundamental del reciclaje de materias primas en la restauración arquitectónica sostenible; c) se resalta la importancia de la recuperación de elementos constructivos originales, como parte esencial de la restauración.

## Introducción

En concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible [ODS] de la Organización de Naciones Unidas [ONU] para el año 2030 y su aplicación en el ámbito de la construcción a través de la adopción de prácticas sostenibles en la planificación, diseño, construcción y operación de edificios e infraestructuras, surge una necesidad imperante de redefinir los paradigmas tradicionales de la edificación (UN-Habitat, 2019). En el contexto actual de la crisis climática, el sector de la construcción debe comprometerse con la reducción de la huella de carbono en sus procesos constructivos y la restauración arquitectónica se presenta como un modelo excepcional que abraza estos desafíos.

Dicha restauración no solo abarca la preservación del patrimonio cultural y arquitectónico, sino que también se enlaza de manera directa con la urgente necesidad de adoptar prácticas que reduzcan la emisión de gases de efecto invernadero y promuevan la sostenibilidad a largo plazo. Esta práctica implica la revitalización de edificios antiguos y proporciona, al mismo tiempo, una perspectiva valiosa para que los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles (UN-Habitat, 2019).

A lo largo de este artículo, se explorarán los pilares fundamentales de la restauración arquitectónica. En especial, de la iglesia San Francisco de Barón como un ejemplo paradigmático de una construcción restauración sostenible: la reutilización de materiales y técnicas antiguas, el reciclaje de materias primas y el rescate de elementos constructivos (Feilden, 2003). Estos componentes son esenciales para comprender cómo la restauración, además de respetar la historia y la estética, ejemplifica un camino hacia un futuro más sostenible y resiliente en el sector de la construcción.

## Materiales actuales utilizados en la construcción contemporánea y su impacto en las emisiones de carbono

El panorama de la construcción contemporánea está caracterizado por una amplia gama de materiales utilizados en la edificación de infraestructuras y viviendas. Sin embargo, a pesar de la diversidad de opciones disponibles, persiste la necesidad de evaluar de manera integral el impacto ambiental de estos materiales y su contribución a las emisiones de carbono en el sector. En el contexto chileno, la cuantificación precisa de las emisiones de carbono provenientes del sector de la construcción aún representa un desafío. Según la Cámara Chilena de la Construcción (2019), estas emisiones rondan el 28% de forma directa, pero existen claros indicios de que diversos procesos contribuyen de manera directa e indirecta a estas emisiones, por lo cual las estadísticas pueden quedar cortas.

Entre los procesos más significativos que influyen en las emisiones de carbono en la construcción, se encuentran la extracción de áridos y la elaboración de materiales como el hormigón, el hierro y los elementos plásticos. La obtención

de áridos, un componente esencial en la fabricación de hormigón, implica el uso intensivo de energía y maquinaria, generando emisiones de gases de efecto invernadero en su proceso. De manera similar, la producción de hormigón y acero conlleva la emisión de dióxido de carbono, debido a la liberación de CO<sub>2</sub> durante la calcinación de caliza y la transformación del mineral de hierro en acero (Hammond y Jones, 2008).

El transporte de materiales y productos manufacturados también es un factor crucial en las emisiones de carbono del sector de la construcción. La importación de materiales desde diversas partes del mundo, al igual que el intercambio de materias primas de ida y productos manufacturados de vuelta, implica largos viajes en barco, que requieren una significativa cantidad de combustible fósil. Estos viajes —al añadir a la cadena de suministro de la industria emisiones relacionadas con el transporte marítimo— contribuyen a la huella de carbono global de la construcción (UN-Habitat, 2019).

La construcción contemporánea también se enfrenta al desafío de gestionar una gran cantidad de residuos. La demolición y el desecho de edificaciones antiguas generan desperdicios que, si no se manejan adecuadamente, pueden contribuir al problema de los vertederos y a la emisión de gases de efecto invernadero provenientes de la descomposición de materia orgánica en condiciones anaeróbicas.

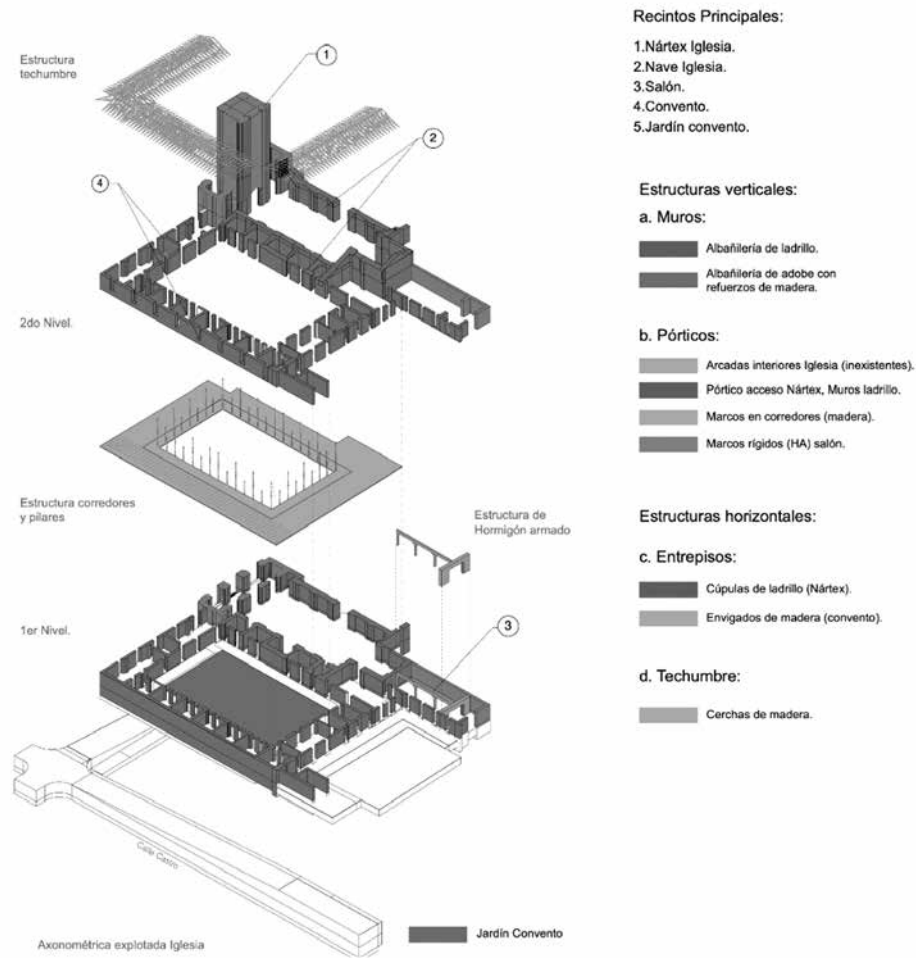
La incorporación de materiales importados desde distintas partes del mundo no solo aumenta las emisiones asociadas al transporte, sino que cuestiona la sostenibilidad desde una perspectiva global. La producción y el transporte de estos materiales pueden desencadenar un ciclo de emisiones significativo, lo que resalta la importancia de considerar alternativas locales y sostenibles en la elección de materiales de construcción.

## Sistemas constructivos históricos

Existen una gran cantidad de edificaciones que se demuelen año a año, muchas veces por la obsolescencia de sus programas, estructuras, etc. Este proceso ha sido frecuente en la evolución de las ciudades, pero el último siglo ha traído consigo una proliferación de rescates de edificaciones y centros históricos alrededor de todo el mundo, buscando conservar la identidad de los lugares y realzar los aspectos culturales que albergaron la construcción de estos centros.

Por un lado, están las estructuras arquitectónicas que se recuperan y rehabilitan; por otro, los materiales que se pueden proveer para su reutilización o procesamiento como parte de un sistema constructivo. En el primer caso, están los elementos construidos, como fundaciones, muros, entresijos y estructuras de techumbre, que —con las estrategias adecuadas— pueden volver a su funcionalidad estructural, funcional y/u ornamental. Este fenómeno ahorra procesos de ejecución y, por tanto, una gran cantidad de recursos.

**Sistemas estructurales/constructivos**  
Iglesia San Francisco de Barón, Valparaíso



**FIGURA 1.** IMAGEN GENERAL DE LA IGLESIA SAN FRANCISCO DE BARÓN, EN LA QUE SE APRECIAN DIVERSOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS SUSCEPTIBLES DE RESCATE O REUTILIZACIÓN.  
**FUENTE:** ELABORACIÓN PROPIA

Por otro lado, los sistemas constructivos históricos —en la mayoría de los casos— presentan materiales naturales con bajo procesamiento y, por ende, producidos con una baja huella de carbono en su origen [Fig. 1]. Esos materiales pueden ser rescatados, en muchas ocasiones, para utilizarlos nuevamente en el proceso constructivo, ya sea como elementos construidos —vigas, pilares, puertas, ventanas, pilastras— o directamente como materiales de construcción: tierra, madera, piedras y otros componentes que están presentes en la edificación.

En este marco, la restauración arquitectónica emerge como una estrategia compatible que no solo resuelve aspectos de conservación del patrimonio,

sino que también ofrece una vía efectiva para reducir la huella de carbono en la construcción. La reutilización de materiales, el reciclaje y el rescate de elementos constructivos son prácticas que pueden disminuir la necesidad de extraer y producir nuevos materiales, minimizando así las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuyendo al cumplimiento de metas de reducción de emisiones al 2030, en el sector de la construcción.

**Reutilización de elementos constructivos**

El rescate de elementos constructivos originales es una faceta esencial de la restauración arquitectónica que encarna directamente los valores de la sostenibilidad. Esta práctica no solo trata de conservar la apariencia visual de un edificio histórico, sino que encapsula una estrategia de reducción de la contaminación, intrínseca y valiosa en el ámbito de la construcción sostenible.

La restauración arquitectónica valora la autenticidad y la integridad de los componentes originales de una estructura. La preservación y restauración de elementos como vigas de madera —que en muchas ocasiones son elaboradas a mano—, elementos ornamentales únicos o pavimentos decorativos no solo capturan la esencia histórica y artística de la edificación, sino que evitan la necesidad de crear réplicas modernas (Feilden, 2003). La fabricación de elementos modernos implicaría el consumo de recursos adicionales, la emisión de procesos contaminantes durante la producción y el aumento de residuos en el ciclo de vida de la edificación.

Este enfoque de rescate de elementos constructivos no solo ofrece ventajas desde una perspectiva ambiental, sino que añade valor cultural, estético e incluso económico al proyecto. Los elementos históricos auténticos pueden contar historias, transmitir conocimiento y generar un sentido de conexión con el pasado. La integración de estos elementos en un contexto contemporáneo crea una dialéctica entre lo antiguo y lo nuevo, que a menudo se convierte en una expresión única de la identidad de un lugar y de su evolución a lo largo del tiempo (National Park Service, 2016).

La filosofía detrás del rescate de elementos constructivos se relaciona con la conservación material, pero también con la preservación de saberes y técnicas ancestrales. Al rescatar y restaurar elementos que poseen características y técnicas constructivas antiguas, se retienen y difunden conocimientos que, de lo contrario, podrían perderse en la vorágine de la modernidad (Ashurst y Dimes, 2008).

**Reciclaje de materias primas**

En el contexto de la restauración arquitectónica, el reciclaje de materias primas emerge como una estrategia esencial que trasciende la mera revitalización de edificaciones históricas. Esta práctica se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible y constituye, además, un paso crucial hacia la construcción responsable y



**FIGURA 2.** MURO EJE N° 9 CON COLAPSO PARCIAL. LA TIERRA PRESENTE EN EL SISTEMA CONSTRUCTIVO DE ADOBE SE UTILIZÓ PARA LAS INTERVENCIONES EN EL MISMO EDIFICIO. **FUENTE:** FOTOGRAFÍA DEL AUTOR DEL ARTÍCULO

la reducción de la huella de carbono en el sector. En este contexto, el reciclaje no se limita únicamente a la gestión de residuos, sino que implica la recuperación de materiales y su reintegración en el ciclo constructivo, lo que presenta beneficios tanto ambientales como económicos [Fig. 2].

El reciclaje en la restauración arquitectónica es un proceso que comienza con la identificación, el desmontaje y la clasificación de los materiales retirados de la estructura original. Esos materiales —que incluyen madera, piedra, metal y otros componentes— pueden ser sometidos a procesos de limpieza y preparación para su reutilización. Una vez reciclados, pueden encontrar nuevos propósitos dentro de la misma edificación o en otros proyectos de construcción, lo que reduce la demanda de recursos naturales vírgenes.

La importancia del reciclaje en la restauración arquitectónica se extiende más allá de la simple conservación de materias primas. Al reducir la necesidad de extraer y producir nuevos materiales, se disminuye la contaminación y se evita el agotamiento de recursos naturales finitos (Hammond y Jones, 2008). Además, este enfoque contribuye a la disminución de los residuos de construcción y demolición —que normalmente terminarían en vertederos—, mitigando así el impacto ambiental asociado con la disposición de desechos de construcción (English Heritage, 2017).

El reciclaje en la restauración arquitectónica no solo optimiza la utilización de recursos: también brinda una oportunidad para el aprendizaje y la preservación



**FIGURA 3.** INTEGRACIÓN DE MADERA RECICLADA PARA CONSOLIDACIÓN DE DINTEL EN EJE N° 9. **FUENTE:** FOTOGRAFÍA DEL AUTOR DEL ARTÍCULO

de técnicas y tradiciones constructivas del pasado [Fig. 3]. La integración de materiales reciclados puede ser un proceso desafiante debido a las diferencias en las dimensiones y las propiedades de los componentes, pero esto —a su vez— fomenta la innovación y la adaptación creativa en el diseño y la construcción (Ashurst y Dimes, 2008).

En conclusión, el reciclaje de materias primas en la restauración arquitectónica no solamente ejemplifica la sostenibilidad en la práctica: también constituye un paso hacia un futuro construido de manera más responsable y consciente. La reutilización de materiales retirados, su reintegración en la edificación y la reducción de los residuos de construcción contribuyen a la preservación del medio ambiente y a la mitigación del cambio climático, al tiempo que rescatan y honran las técnicas constructivas tradicionales.

### **Restauración de la Iglesia San Francisco de Barón en Valparaíso: conservación histórica y sostenibilidad**

La restauración de edificios históricos cumple un papel crucial al salvaguardar la memoria de las ciudades. Cada vez con mayor fuerza, las iniciativas valoran estos monumentos como testimonios vivos de los contextos que se han ido



FIGURA 4. IMAGEN GENERAL DESDE LA PARTE ALTA DE LA IGLESIA SAN FRANCISCO DE BARÓN.  
FUENTE: FOTOGRAFÍA DEL AUTOR DEL ARTÍCULO

configurando a lo largo del tiempo. En este contexto, la iglesia San Francisco de Barón, construida en 1846 en la icónica ciudad de Valparaíso, emerge como un vívido testimonio. Valparaíso, alguna vez conocida como la «joya del Pacífico» [Fig. 4], representa un hito temprano en la globalización debido a la migración de individuos provenientes de diversas partes del mundo hacia las costas chilenas.

La ciudad fue el crisol de una efervescencia cultural y tecnológica que dejó su huella en varios ámbitos, incluido el de la arquitectura. A lo largo de su historia, se experimentó con distintos materiales, como tierra, madera, metal y ladrillo cocido. La iglesia San Francisco de Barón —que abarca alrededor de 4500 m<sup>2</sup> de superficie— cuenta con una nave principal destinada al culto y un convento adyacente que rodea un patio central flanqueado por edificios de dos pisos. Este edificio ha sido testigo de la evolución urbana de Valparaíso, con su torre de albañilería de ladrillo —apodada «Pancho» en honor a Francisco—, que servía como punto de referencia marítima para guiar a las embarcaciones hacia las costas de la ciudad.

A pesar de su rica historia, esta iglesia ha enfrentado tres incendios recientes —1983, 2010 y 2013—, lo que ha resultado en la pérdida gradual de sus elementos estructurales [Fig. 5]. No obstante, gracias a diversas iniciativas, esta edificación ha sido sometida a un proceso de restauración. Su significado trasciende lo religioso, para convertirse en un símbolo distintivo de la ciudad.

El sistema constructivo primordial de esta iglesia es el adobe, complementado por estructuras de madera que se extienden a través de entrepisos, techumbres y pilares, entre otros elementos. La premisa de la restauración radica en la conservación de la autenticidad del edificio. Por lo tanto, la restauración se

enfoca en rescatar y reincorporar los componentes originales en las estrategias de consolidación y renovación. Todos los elementos que pueden ser rescatados dentro de la edificación se someten a este principio de preservación.

Los sistemas constructivos —incluyendo muros, entrepisos y techumbres— son susceptibles al rescate y, por ende, a la conservación, evitando la producción de nuevos componentes. Esto se alinea con la estrategia de reducción de la huella de carbono, ya que el no uso de nuevos materiales también está entrelazado con la sostenibilidad [Fig. 6].

La materia que aún puede ser utilizada pero no está incorporada como sistema constructivo se recopila para su transformación en material reutilizable. Un ejemplo es la tierra recuperada de los muros con daños parciales, que se recolecta, tritura, humecta y transforma en estuco —utilizado nuevamente en la iglesia—. De esta manera, varios metros cúbicos de tierra que formaban parte de los antiguos muros se rescatan y procesan para adquirir una nueva función dentro del mismo contexto [Fig. 7]. Esto cumple con uno de los principales principios de



FIGURA 5. NOTICIA DEL INCENDIO DE LA IGLESIA SAN FRANCISCO DE BARÓN, OCURRIDO EL DÍA 2 DE SETIEMBRE DE 2010. FUENTE: TOMADA DE LA PORTADA DEL DIARIO LA TERCERA, EDICIÓN DEL 3 DE SETIEMBRE DE 2010



FIGURA 6. IMAGEN QUE MUESTRA LAS RECONSTRUCCIONES PARCIALES Y EL RESCATE DE ESTRUCTURAS DE MUROS, ENTREPISOS Y TECHUMBRES. FUENTE: FOTOGRAFÍA DEL AUTOR DEL ARTÍCULO



FIGURA 7. IMAGEN QUE MUESTRA LAS RECONSTRUCCIONES PARCIALES Y EL RESCATE DE ESTRUCTURAS DE MÚROS, ENTREPISOS Y TECHUMBRES. FUENTE: FOTOGRAFÍA DEL AUTOR DEL ARTÍCULO

la sostenibilidad: maximizar la utilización de elementos reciclables para contribuir a la construcción sostenible.

Este enfoque también entrelaza conceptos de sustentabilidad y eficiencia energética en los materiales y sistemas empleados en la intervención. Por lo tanto, la restauración no solamente respeta la historia, sino que es energéticamente eficiente.

### Hacia una construcción sostenible y resiliente al carbono

En un momento en que la crisis climática exige un replanteamiento fundamental de nuestras prácticas y enfoques en todos los ámbitos de la vida, el sector de la construcción se encuentra en una encrucijada para adoptar soluciones más sostenibles y reducir su huella de carbono. La restauración arquitectónica, destacando el reciclaje de materias primas y el rescate de elementos constructivos, emerge como un paradigma ejemplar de cómo las estrategias cuidadosamente diseñadas pueden converger para impulsar un cambio significativo en la industria de la construcción, hacia la sostenibilidad.

El reciclaje de materias primas en la restauración arquitectónica —al reducir la demanda de recursos naturales vírgenes y disminuir la producción de desechos de construcción— no solamente minimiza el impacto ambiental; también contribuye de manera directa a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Al reintegrar materiales previamente extraídos y procesados, se elude la necesidad de nuevas extracciones, lo cual conduce, en última instancia, a una disminución de la liberación de carbono en la atmósfera.



FIGURA 8. IMAGEN QUE MUESTRA LA TORRE DE LA IGLESIA SAN FRANCISCO DE BARÓN EN PROCESO DE RESTAURACIÓN. FUENTE: FOTOGRAFÍA DEL AUTOR DEL ARTÍCULO

El rescate de elementos constructivos originales se alza como una estrategia igualmente promisoría en la lucha contra el cambio climático. Conservar y restaurar estos componentes auténticos no solo evita la producción de réplicas modernas —que consumiría recursos adicionales—, sino que también aporta un valor cultural y estético inigualable a las edificaciones históricas y al paisaje urbano en su conjunto (Feilden, 2003). Más allá de la reducción directa de la huella de carbono, esta práctica también promueve la continuidad de técnicas constructivas tradicionales, evitando la pérdida de saberes que son esenciales para una construcción más sostenible en el futuro (Ashurst y Dimes, 2008).

La intersección entre el reciclaje de materias primas y el rescate de elementos constructivos presenta una oportunidad clara para que el sector de

la construcción alcance sus objetivos de reducción de emisiones al 2030, en línea con los ODS establecidos por la ONU. Al integrar estas prácticas en la planificación, el diseño y la ejecución de proyectos, las emisiones de gases de efecto invernadero pueden ser reducidas de manera significativa. El énfasis en la reutilización y conservación permite una transición más fluida hacia una construcción más baja en carbono y una infraestructura más resiliente al clima.

En última instancia, la restauración arquitectónica, con su enfoque en el reciclaje de materias primas y el rescate de elementos constructivos, se convierte en un faro de esperanza y acción en un momento crítico para el futuro del planeta. Al adoptar estas prácticas, el sector de la construcción contribuye a la mitigación del cambio climático, a la vez que forja un camino hacia una industria más consciente y responsable, capaz de cumplir sus metas de reducción de emisiones al 2030 y más allá.

### Referencias bibliográficas

- Ashurst, J. y Dimes, F. (2008). *Conservation of building and decorative stone* [Conservación de la piedra de construcción y decorativa] (2.ª ed.). Ámsterdam: Elsevier.
- Cámara Chilena de la Construcción. (2019, diciembre). El sector de la construcción ante el desafío climático global. *Fundamenta*, (45). Recuperado de <https://cchc.cl/centro-de-informacion/publicaciones/publicaciones-fundamenta/fundamenta-45>
- English Heritage. (2017). *Climate Change and the Historic Environment*. [El cambio climático y el entorno histórico]. Recuperado de <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17567505.2021.1990492>
- Feilden, B. M. (2003). *Conservation of Historic Buildings* [Conservación de edificios históricos] (3.ª ed.). Burlington: Routledge.
- Hammond, G. y Jones, C. (2008). Embodied Energy and Carbon in Construction Materials [Energía y carbono incorporado en los materiales de construcción]. *Energy*, 16(2), 87-98. <https://doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.87>
- National Park Service. (2016). *The Secretary of the Interior's Standards for the Treatment of Historic Properties* [Normas de la Secretaría de Gobernación para el tratamiento de propiedades históricas]. Recuperado de <https://www.nps.gov/tps/standards/rehabilitation/rehab/stand.htm>
- Se quema iglesia símbolo de Valparaíso. (2010, 3 de setiembre). *La Tercera* [portada].
- UN-Habitat. (2019). Global Status Report on Localizing the Sustainable Development Goals [Informe de estado global sobre localización de los objetivos de desarrollo sostenible]. United Nations Human Settlements Programme. Recuperado de [https://unhabitat.org/sites/default/files/documents/2019-07/sdg\\_report\\_2019.pdf](https://unhabitat.org/sites/default/files/documents/2019-07/sdg_report_2019.pdf)



# Centro de innovación para el departamento de Caldas

Colombia

EDISON HENAO CARVAJAL E ISABEL LLANOS CHAPARRO

Los arquitectos Henao y Llanos han liderado y participado en los siguientes proyectos urbanos y arquitectónicos desarrollados tanto por la Universidad Nacional de Colombia como de forma independiente: Parque Tecnológico de Villamaría, Caldas (2018-2021); Malecón Río de la Magdalena para el Municipio de La Dorada (2018); Centro de Innovación de la Universidad de Caldas (2017-2021); Plaza de Gobierno del Cesar (2014-2016); Campus Aguachica de la Universidad Popular del Cesar (2014); Centros de Desarrollo Tecnológico Pesquero y Ganadero (2013); Campus La Paz de la Universidad Nacional de Colombia (2011-2018); Edificio de Informática Aplicada, Campus El Cable de la Universidad Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales (2004-2006).

FOTOGRAFÍA: ISAAC RAMÍREZ MARÍN; ANGELA MARÍA ÁLVAREZ (P. 135)

<b>OBRA</b>	CENTRO DE INNOVACIÓN PARA EL DEPARTAMENTO DE CALDAS, COLOMBIA
<b>PROGRAMA</b>	INFRAESTRUCTURA PARA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA, EDUCACIÓN Y TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO (6110 M <sup>2</sup> )  PLANTA + 0,20 M (PLANTA BAJA): ESPACIOS ABIERTOS DE <i>CO-WORKING</i> ; TRES AULAS POLIVALENTES (N° 1, N° 2 Y N° 3); MÓDULO DE CAFETERÍA  PLANTA + 5,48 M: LABORATORIO DE CREATIVIDAD, INNOVACIÓN Y ESPACIO DE <i>WE-WORK</i> ; DOS LABORATORIOS DE <i>LANDING</i> Y BIOTECNOLOGÍA (N° 1 Y N° 2); DOS SALAS DE VIGILANCIA TECNOLÓGICA Y COMERCIAL (N° 1 Y N° 2); LABORATORIO DE BIOINFORMÁTICA; DOS AULAS DE FORMACIÓN (N° 1 Y N° 2); LABORATORIO DE SUELOS Y TEJIDOS VEGETALES, Y OFICINAS ADMINISTRATIVAS Y CATI.
<b>UBICACIÓN</b>	CORREGIMIENTO GUARINOCITO, MUNICIPIO LA DORADA, CALDAS (COLOMBIA)
<b>MODALIDAD</b>	ADMINISTRACIÓN DELEGADA
<b>PERÍODO DE OBRA</b>	FINALIZACIÓN: FEBRERO DE 2022
<b>AUTORES</b>	DR. MG. ARQ. EDISON HENAO CARVAJAL (PROF. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA); DR. MG. ARQ. ISABEL LLANOS CHAPARRO (PROF. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA); ARQ. ESTEFANÍA MARÍN MURILLO (PROF. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA); ARQ. YEIMY MARCELA RÍOS RODRÍGUEZ, Y ARQ. SERGIO ESCOBAR VARGAS
<b>COLABORADORES</b>	ARQ. JUANITA MONTES O.; ARQ. ANDRÉS CAMILO ARIAS A.; ARQ. LUIS FELIPE ARIAS L.; ARQ. MICHAEL STIVEN GÓMEZ T., Y ARQ. SANTIAGO BEDOYA L.
<b>ESTUDIOS TÉCNICOS</b>	BIOCLIMÁTICA Y ACÚSTICA: ARQ. GUSTAVO JIMÉNEZ O. DISEÑO ESTRUCTURAL - DAC: INGENIERÍA ESTRUCTURAL S.A.S. DISEÑO HVAC: INSERIM AIRE S.A. DISEÑO HIDROSANITARIO: A & A DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN S.A.S. DISEÑO DE REDES ELÉCTRICAS: ING. JUAN ANTONIO GONZÁLEZ O. DISEÑO DE REDES DE VOZ Y DATOS: ING. LUIS FERNANDO DIAZ C. DISEÑO DE VÍAS: ING. DIEGO ESCOBAR G. PLAN DE MANEJO AMBIENTAL: ARQ. GERMÁN VILLADA S. TOPOGRAFÍA: GERMÁN A. JARAMILLO ESTUDIO DE SUELOS: COMPLEMENTOS CIVILES S.A.S. PRESUPUESTO: ING. LADY TATIANA DIAZ

<b>EQUIPO DE OBRA</b>	DIRECTOR ADMINISTRATIVO: PAULO C. DUQUE SUPERVISIÓN UNIVERSIDAD DE CALDAS: ANA MARÍA VENEGAS / ÁNGELA GARCÍA CONSTRUCCIÓN: ALTA GERENCIA S.A.S. SUPERVISIÓN TÉCNICA: RICARDO ACUÑA INTERVENTORÍA: JOSÉ IGNACIO LONDOÑO S.A.S. Y UNIÓN TEMPORAL, INTERVENTORES DE OBRAS (MAGDALENA MEDIO)
<b>PROMOTOR</b>	GOBERNACIÓN DE CALDAS; UNIVERSIDAD DE CALDAS; ALCALDÍA DE LA DORADA; CHEC; CÁMARA DE COMERCIO DE LA DORADA; CELEMA; EMPRESA DE SERVICIOS PÚBLICOS DE LA DORADA; CÁMARA DE COMERCIO DE MANIZALES POR CALDAS, Y BIOS MANIZALES
<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>	USD 4.413.000,00 (APRÓX.)
<b>SISTEMA ESTRUCTURAL</b>	PÉNDULO INVERTIDO (DMO) - EXOESQUELETO DE ACERO EN «V» SOBRE PEDESTALES DE HORMIGÓN MEDIANTE CONEXIÓN RÓTULA PLATINADA CON ÉMBOLO.
<b>MODULACIÓN ESTRUCTURAL</b>	LUZ TRANSVERSAL DE 17 M Y LUZ LONGITUDINAL CONSTANTE DE 7,20 M
<b>CERRAMIENTOS HORIZONTALES INTERMEDIOS</b>	PLACA DE STEEL DECK
<b>CERRAMIENTO HORIZONTAL SUPERIOR</b>	CUBIERTA EN PANELES TIPO «SÁNDWICH» INYECTADO EN LÍNEA CONTINUA CON POLIURETANO EXPANDIDO DE ALTA DENSIDAD (38 KG/M3). CARA EXTERNA PREIMPERMEABILIZADA CON MEMBRANA FLEXIBLE DE POLIOLEFINA TERMOPLÁSTICA PVC. CARA INTERNA EN LÁMINA DE ACERO GALVANIZADO PREPINTADO
<b>CERRAMIENTOS VERTICALES PERMEABLES A LA LUZ</b>	MURO CORTINA. PERFILERÍA EN ALUMINIO Y VIDRIO LAMINADO 3 + 3
<b>PROTECCIÓN SOLAR</b>	ENTRAMADO EXTERIOR CONFORMADO POR VIGAS «V» ESTRUCTURALES EN ACERO Y PARASOLES EN MALLA EXPANDIDA EXR.
<b>PAVIMENTOS</b>	PISO EN HORMIGÓN PULIDO CON ACABADO A LA VISTA



## Memoria

La ausencia de infraestructura para desarrollar investigación científica y transferencia de conocimiento en la región, identificada por la Gobernación y la Universidad de Caldas, dio origen en 2017 al proyecto Centro de Innovación para el Departamento de Caldas. La elección del municipio de La Dorada para su ubicación fue acertada en tanto este se encuentra atravesado por el río Magdalena y limitado por los departamentos de Tolima, Cundinamarca, Boyacá y Antioquia, condiciones que fortalecen la conexión con otras regiones del país.

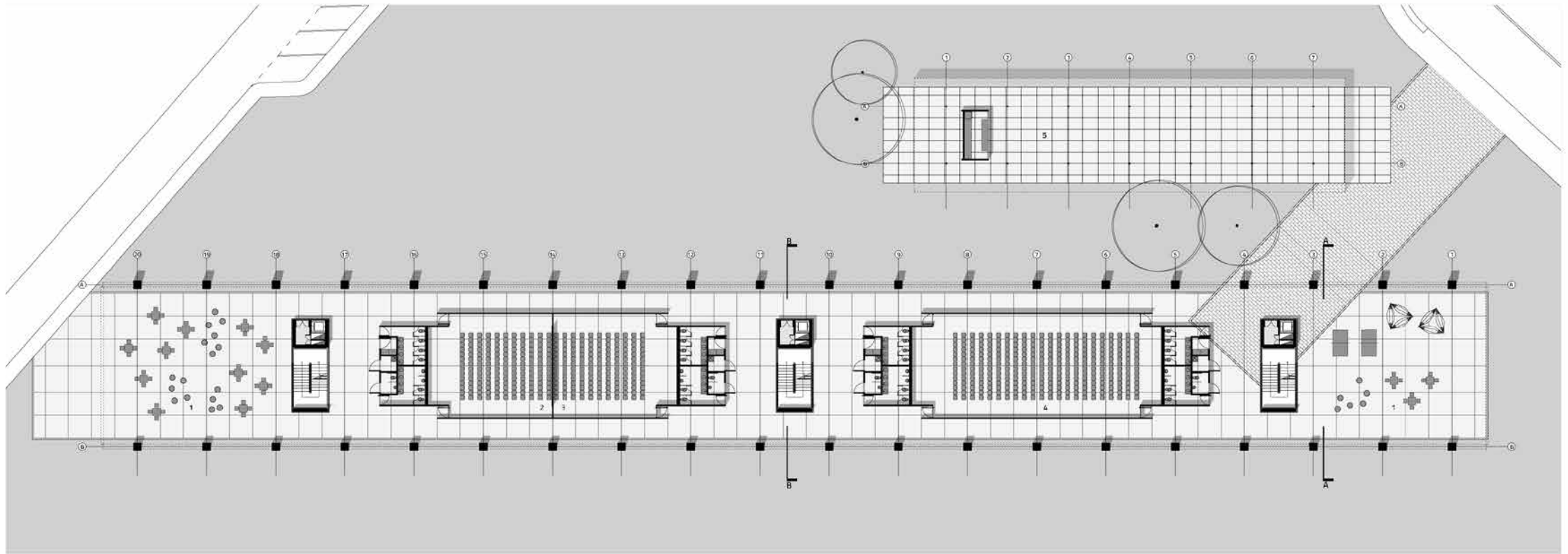
El predio presenta grandes ventajas ambientales para el desarrollo de actividades de investigación y formación agropecuaria. Por un lado, su ubicación en la fértil cuenca del río Guarinó, cerca de la charca de Guarinocito, lo convierte en un laboratorio natural apto para la implementación de proyectos de innovación agrícola, pecuaria, silvopastoril, geológica y biológica. Por otra parte, su localización en una zona despoblada del valle fluvial del río Magdalena garantiza que el proyecto goce de unas condiciones higrotérmicas menos extremas que las de los centros consolidados. A su vez, la delimitación del valle por las cordilleras central y oriental condiciona la incidencia eólica, que fue determinante en la disposición del edificio.

La cercanía al cerro El Bolilludo también constituyó una condición significativa en la propuesta de emplazamiento. La ubicación del edificio brinda una relación visual constante con este icónico accidente geográfico y con el contexto natural inmediato. La diversa vegetación existente tanto en el predio como en sus alrededores incidió en la propuesta arquitectónica, la cual plantea una planta baja liberada y un cerramiento definido por el exoesqueleto que, con luces de 17 m, soporta el edificio, corta el sol y permite la realización de un espacio flexible y adaptable en el tiempo a las variaciones programáticas.

En estas condiciones, se abrieron las largas fachadas norte y sur para permitir la ventilación cruzada de todos los espacios interiores del centro y se redujeron al máximo las fachadas de naciente y poniente para disminuir el impacto calórico. Es importante mencionar que, según los cálculos técnicos, se lograron altos niveles de confort durante la mitad del año. De igual manera se consiguió reducir a cero el consumo de iluminación artificial en las horas diurnas, en tanto las características de las fachadas y la orientación del edificio permiten el ingreso de iluminación indirecta —500 lx— en los espacios centrales de la planta libre.

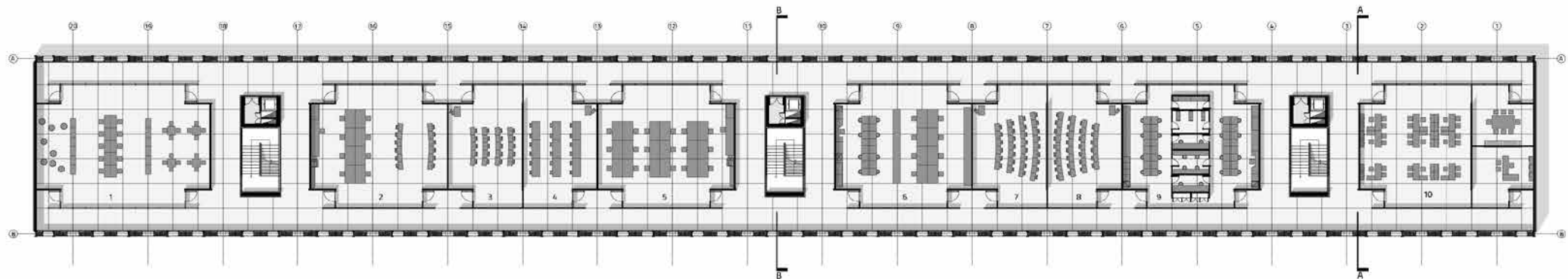






PLANTA PRIMER PISO  
NIVEL +0.20 M

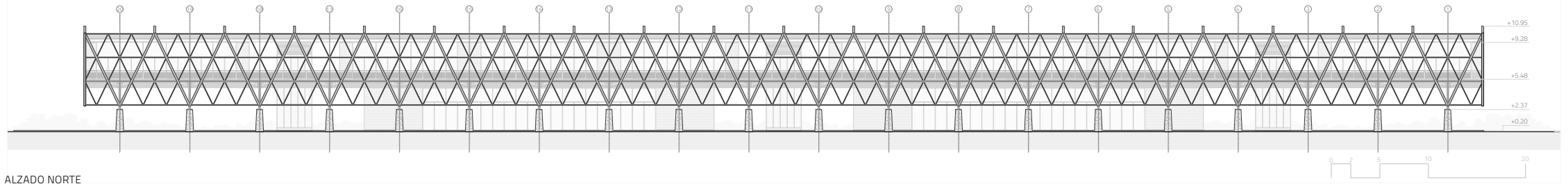
- |                                   |                       |                        |
|-----------------------------------|-----------------------|------------------------|
| 1. Espacios abiertos de coworking | 3. Aula polivalente 2 | 5. Módulo de cafetería |
| 2. Aula polivalente 1             | 4. Aula polivalente 3 |                        |



PLANTA SEGUNDO PISO  
NIVEL +5.48 M

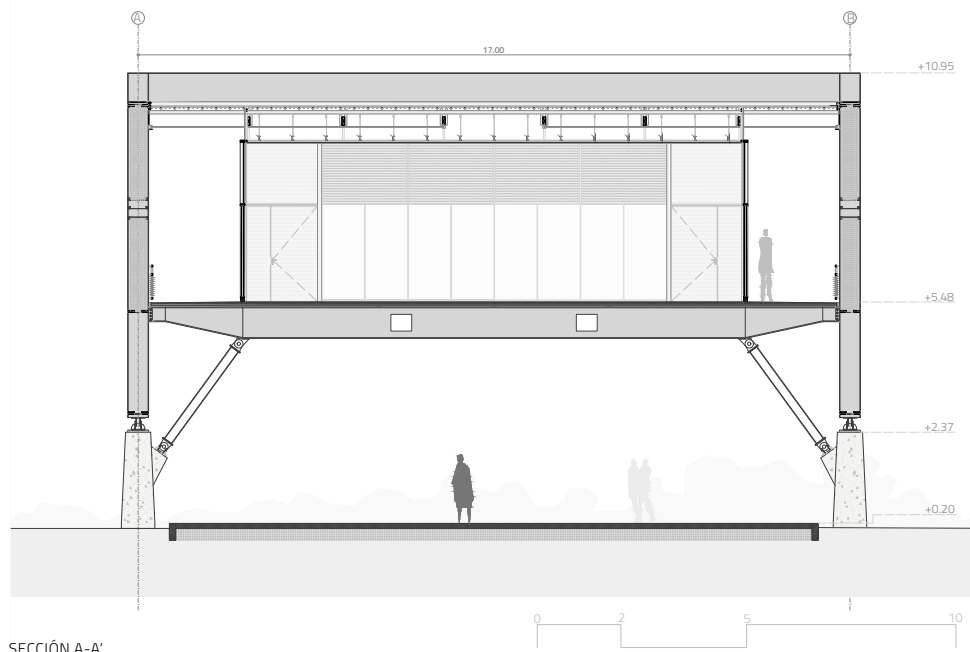
- |  |   |                                       |                                     |
|--|---|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Lab. de creatividad, innovación y espacio de <i>we-work</i> | 4. Sala de vigilancia tecnológica y comercial 2 | 7. Aula de formación 1                | 10. Oficinas administrativas y CATI |
| 2. Lab. de <i>landing</i> y biotecnología 1                    | 5. Lab. de bio-informática                      | 8. Aula de formación 2                |                                     |
| 3. Sala de vigilancia tecnológica y comercial 1                | 6. Lab. de <i>landing</i> y biotecnología 2     | 9. Lab. de suelos y tejidos vegetales |                                     |



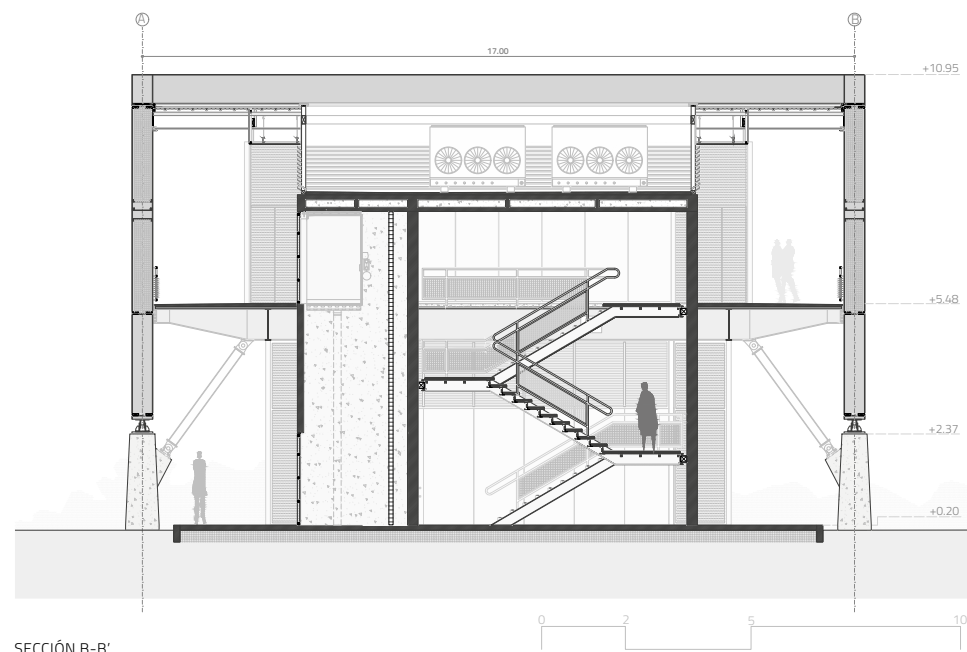


ALZADO NORTE





SECCIÓN A-A'

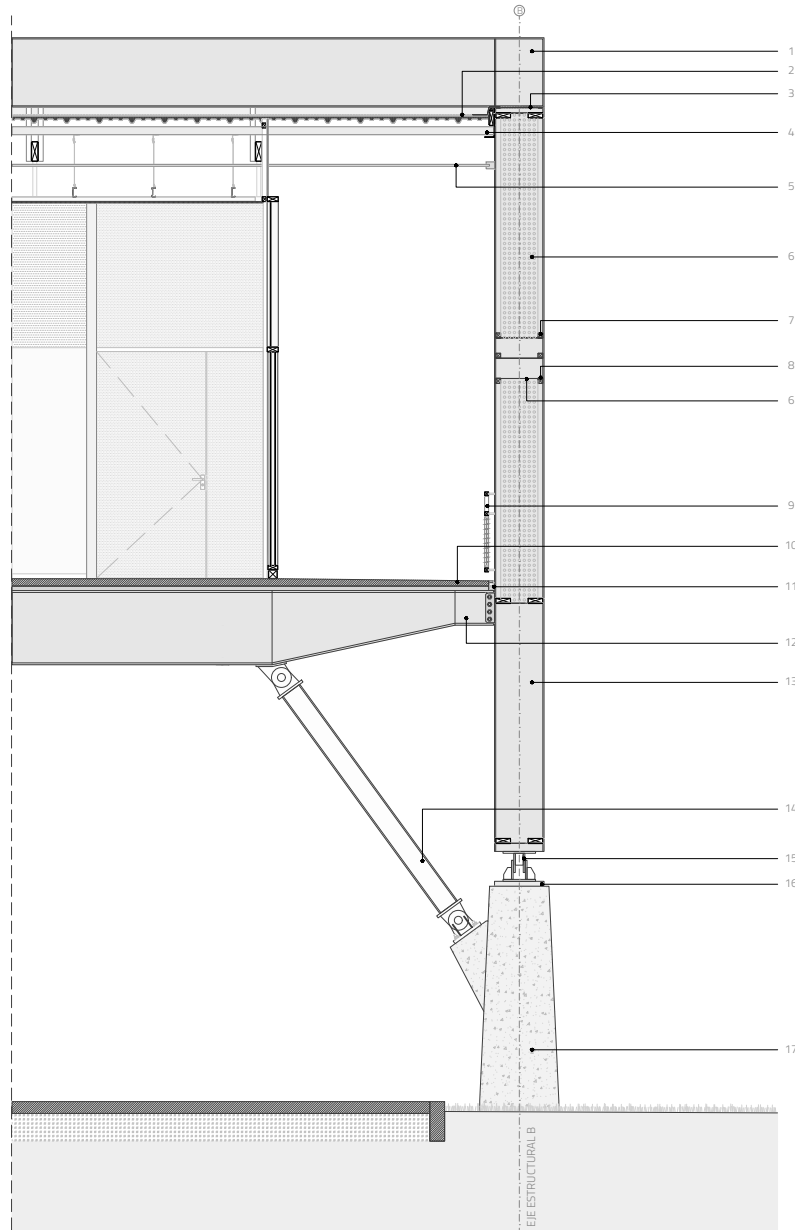


SECCIÓN B-B'





- |  |   |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Viga superior en "I" armada en acero. 70 x 20 cm</li> <li>2. Cubierta en paneles tipo "sándwich"</li> <li>3. Vidrio laminado 3+3. Fijación con epóxico</li> <li>4. Correa en acero para soporte de cubierta</li> <li>5. Tensor en tubo de acero Ø3/4"</li> <li>6. Corta-sol en Malla expandida EXR 25</li> <li>7. Perfil tubular en acero para conformación de corta-sol. 5 x 5 cm</li> <li>8. Platina en acero 2"</li> <li>9. Baranda en perfiles de acero y malla pre-ondulada</li> <li>10. Placa de piso en steel-deck. Acabado en concreto a la vista</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>11. Canaleta en lámina metálica Cal. 16</li> <li>12. Viga de entrepiso en "I" armada en acero</li> <li>13. Exo-esqueleto estructural conformado por vigas en "I" armadas en acero</li> <li>14. Pie de amigo en tubo estructural de acero sección cuadrada</li> <li>15. Apoyo conformado por platinas de acero con pasador para conexión exo-esqueleto a pedestales</li> <li>16. Grouting estructural de placas base</li> <li>17. Pedestales en concreto. Sección de base 80x80 cm. Sección de remate 60 x 60 cm</li> </ol> |
|--|---|







## Piezas de resistencia

### PALABRAS CLAVE

RACIONALISMO ESTRUCTURAL; CONSTRUCCIÓN HÍBRIDA; ESTADO LÍMITE; HIPERESTÁTICA;  
ESTANDARIZACIÓN; OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS; INFRAESTRUCTURAS EVOLUTIVAS

### Resumen

Este artículo de reflexión presenta una investigación, llevada a cabo en el seno del estudio GNWA, concentrada fundamentalmente en los dos últimos años, aunque recogiendo el fruto de reflexiones de casi una década.

A raíz de la finalización de las dos primeras obras en común con el despacho de ingenieros civiles Muttoni y Fernández, en Lausana, surgen una serie de intercambios e interacciones, en especial con Miguel Fernández Ruiz, sobre el uso de los materiales de construcción en la arquitectura suiza de hoy en día.

A partir de ese momento, los dos equipos deciden efectuar una serie de *workshops* para poner en común sus conocimientos —abordados desde diferentes perspectivas— y tratar de encontrar sistemas estructurales alternativos a los utilizados de forma recurrente en la arquitectura contemporánea. Diferentes temas son así planteados, entre ellos, la optimización de estructuras de hormigón —alternativas al uso de este—, las estructuras híbridas y la prefabricación.

Bajo este nuevo enfoque, basado en una sensibilidad marcada por los conceptos de la sostenibilidad, GNWA desarrolla nuevas estrategias que permiten optimizar las estructuras y proponer soluciones innovadoras.

Este artículo se divide en tres partes: la primera, desarrolla el enunciado teórico de las estrategias; la segunda, comenta tres ejemplos de obras arquitectónicas donde estos planteos se hacen visibles, facilitando su comprensión, y la tercera, presenta el centro cultural y deportivo en Romont para ilustrar el inicio de esta investigación y ver cómo estos métodos se pueden aplicar en el ejercicio arquitectónico actual.

### CRISTINA GONZALO NOGUÉS

Diplomada por la ETSAB-UPC (Barcelona), se forma como arquitecta en el despacho E2A en Zúrich, antes de fundar el estudio GNWA (Gonzalo Neri & Weck Architekten) con sus asociados Marco Neri y Markus Weck. Su actual foco de interés se centra en la investigación y búsqueda de nuevos conceptos estructurales sostenibles, e imparte conferencias sobre ello en diferentes universidades como FADU-UBA (Argentina) y EPFL (Suiza). Ha sido invitada como crítica de proyectos en los departamentos de arquitectura e ingeniería civil de la ETHZ (Suiza), la EPFL (Suiza) y la HEIA (Suiza).

## Introducción

Frente a la crisis climática de las últimas décadas, revelando la falta de conciencia respecto al desarrollo sostenible, nos hemos visto obligados a salir de nuestra zona de confort y cambiar de paradigma, para de este modo poder desarrollar nuevas estrategias que nos permitan evolucionar hacia un uso racional y justificado de los recursos.

Ha llegado el momento urgente de unir esfuerzos y encontrar soluciones comunes que puedan ayudar a todo el sector de la construcción. Tres ejes centrales articulan esta investigación, dando respuesta a los pilares económico, social y ambiental que asientan un desarrollo sostenible: reducir las emisiones de carbono durante el proceso de construcción y la vida útil del edificio; apostar por un uso racional y austero de los recursos disponibles; promover una economía circular con la recuperación de técnicas de construcción tradicionales y locales, abandonadas por los efectos de la globalización.

Aunque la crisis climática sea sin duda la problemática más visible del momento, y la que ha despertado las conciencias, nuestra sociedad evoluciona a tal velocidad, y se ha vuelto tan altamente inestable, que resulta imposible encontrar un adjetivo específico que pueda contener toda esta complejidad sin caer en reduccionismos. Por esta razón, fruto de una investigación con énfasis ante la crisis climática, pero también ante las actuales crisis socioeconómica y energética, hemos decidido llamar a nuestros últimos proyectos «piezas de resistencia», del francés *pièces de résistance*: elemento que forma parte de un mecanismo y lo refuerza particularmente.

Piezas de resistencia puede parecer a primera vista una denominación poco específica que pudiera aplicarse a cualquier objeto. Sin embargo, una mirada más profunda nos ayuda a entender, a través de este término, la complejidad de nuestro oficio y de la arquitectura en sí, al mismo tiempo que permite incluir nuevos conceptos en vista de los rápidos cambios que sacuden nuestra sociedad.

Piezas de resistencia engloba para nosotros todas aquellas obras que huyen del *modus vivendi* actual, donde se construye rápidamente, se consume sin preocupaciones y se desecha de manera incontrolada. Dichas piezas constituyen una arquitectura que se esfuerza por hacer construcciones perennes y de calidad, precisas y específicas con respecto a cada programa y emplazamiento, pero que permiten, a la vez, una gran adaptabilidad.

Piezas de resistencia son aquellos proyectos que abogan por una honestidad estructural, un uso racional y limitado de los recursos, y retoman el momento en que la arquitectura era espacio utilizado y puramente estructura resistente al paso del tiempo.

Con piezas de resistencia queremos huir de aquella arquitectura que es concebida desde un inicio de forma obsoleta y con una visión a corto plazo o efec-tista. Una arquitectura incapaz de integrarse al lugar, de ser reutilizada, de inter-pelarnos y generar cualquier tipo de emoción. De acuerdo con Paul Rudolph (s.f.),

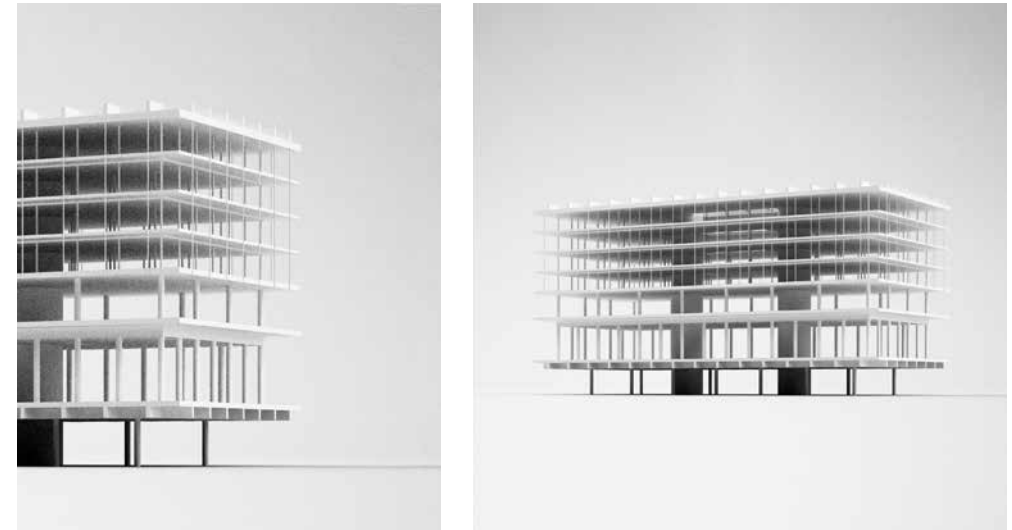


FIGURA 1. PIEZA DE RESISTENCIA. UNIVERSIDAD DE CIENCIAS HUMANAS (UNIL), LAUSANA (SUIZA). CONCURSO, 2021. FUENTE: GNWA

«I'm pleased that the building touches people, and part of that is that people's opinions oscillate about it. That's okay. The worst fate from my viewpoint would be indifference» (párr. 43), preferimos esta arquitectura, aunque ella suscite la crítica o a veces la incompreensión.

## La estructura como elemento generador del proyecto

En el transcurso del tiempo hemos ido desarrollando un gran interés por proyectos de equipamiento de tamaño medio o grande, todos ellos con una particularidad común: contener programas mixtos e híbridos que requieren estructuras adaptadas. Estas pueden ser simples o complejas, perceptibles o discretas.

Por esta razón, en la mayoría de nuestros proyectos la estructura se ha revelado como el elemento generador del proyecto. Esta es el elemento permanente, pero simultáneamente flexible y adaptable, permitiendo contener un programa con todas sus especificidades.

Según Torroja (1957) en *Razón y ser de los tipos estructurales*,

el resultado debe comprender estas cuatro cosas: el material, el tipo estructural, sus formas y dimensiones, y el proceso de ejecución en relación con los elementos auxiliares que requiera. Las cuatro cosas van unidas y se influyen mutuamente; solo una atinada elección de las cuatro puede dar la solución óptima; ninguna puede considerarse independiente de las otras; ninguna puede olvidarse. (p.21)

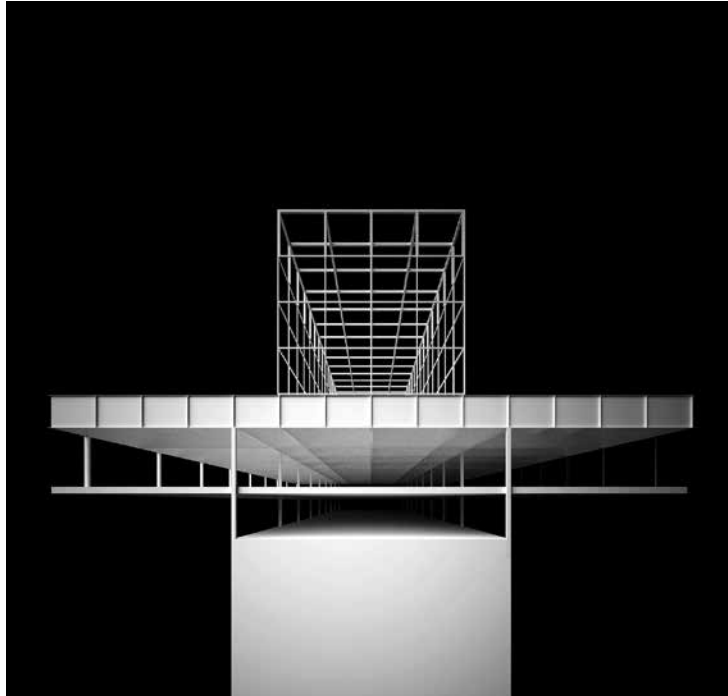


FIGURA 2. CONCEPTO ESTRUCTURAL. NUEVA SEDE PARA LA EMPRESA VITEOS S.A., LA CHAUX-DE-FONDS (SUIZA). PROYECTO EN CURSO, 2021-2026. FUENTE: GNWA

Como Eduardo Torroja en 1957, en 2023 seguimos convencidos de que la correcta elección del sistema estructural para cada proyecto, su optimización en términos cuantitativos, la selección de los materiales más coherentes según sus cualidades resistentes y su combinación adecuada para cada uso, son herramientas fundamentales para elaborar estrategias eficaces para un ahorro sustancial de recursos.

El racionalismo estructural, unido a las nuevas técnicas y avances en la construcción, pero al mismo tiempo ligado a una tradición constructiva, permitirá desarrollar estos cuatro puntos aquí abajo mencionados de una forma coherente y actual, bajo la óptica del desarrollo sostenible:

- La elección del sistema estructural correcto permitirá una reversibilidad y responderá a una arquitectura evolutiva.
- En términos cuantitativos, la estructura tiene un gran impacto en los costes globales de una obra y es la responsable de más del 50 % de gas de efecto invernadero durante la construcción. De este modo, al optimizarla desde una primera fase conceptual, tendremos la posibilidad de reducir el volumen del edificio, así como las superficies de fachadas y, por consiguiente, un ahorro en los materiales.
- El proceso de selección de los materiales deberá apostar por materiales robustos, pero también aquellos que permitan la reducción de la huella de carbono.

- Las técnicas constructivas tradicionales serán recuperadas, ya que apuestan por materiales y métodos de construcción locales, reduciendo el transporte y favoreciendo así la economía local.

Para asegurar este nuevo racionalismo estructural, la estructura debe ser tratada con la importancia que merece y ser fruto de una optimización durante todo el proceso de diseño. El concepto estructural debe ser abordado durante la fase de concepción en paralelo al concepto arquitectónico. Arquitectos e ingenieros deben trabajar desde el inicio conjuntamente y poner sus conocimientos en común para crear auténticas piezas de resistencia.

### Modo operativo

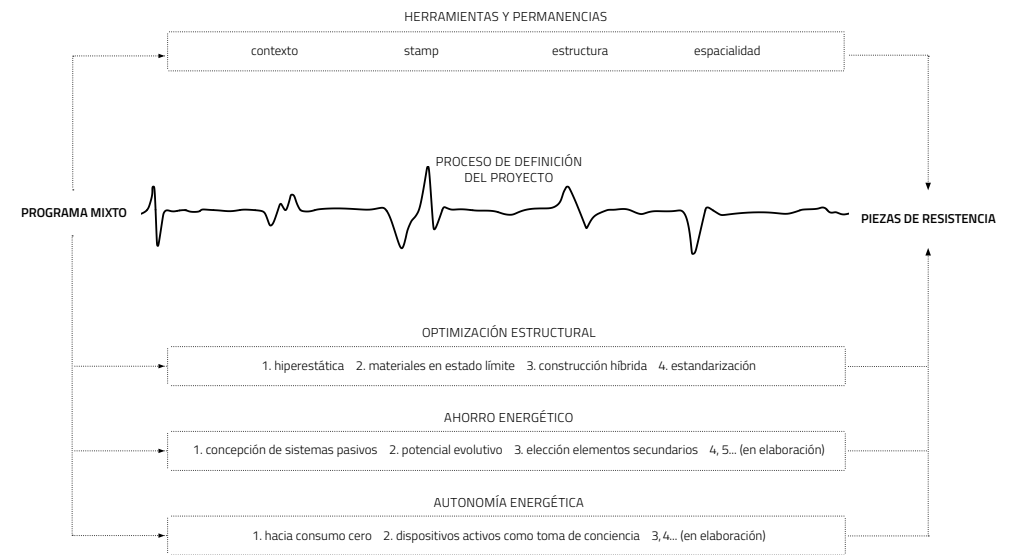


FIGURA 3. ORGANIGRAMA QUE MUESTRA DE FORMA SINTÉTICA EL MÉTODO DE TRABAJO PARA DESARROLLAR PIEZAS DE RESISTENCIA. FUENTE: ELABORADO POR GNWA

Para llevar a cabo estos objetivos, hemos elaborado una serie de herramientas que, a modo de decálogo a seguir, nos ayudan en cada uno de nuestros proyectos.

El desarrollo del proyecto se entiende, en nuestro caso, como la interdependencia entre múltiples procesos; en su transcurso, la totalidad de los componentes que lo integran son tratados de forma holística.

Mediante el primer proceso y a través de herramientas proyectuales, se establecen y estudian los datos de base y las preexistencias de cada caso. Esto permite entender las permanencias y especificidades de cada proyecto, pero también su potencial de evolución. Así podremos concebir conceptos arquitectónicos precisos para crear infraestructuras abiertas, flexibles en el futuro.

El segundo proceso se centra en aplicar una serie de estrategias bajo el foco de la sostenibilidad. Estas se van evaluando de forma objetiva y específica para cada caso, aplicándolas para ayudar a reforzar el concepto arquitectónico de base.

Estas herramientas van evolucionando y actualizándose mediante un esfuerzo diario de aprehender nuestro presente cambiante. En este artículo profundizaremos en la primera estrategia, la optimización de la estructura, desde el prisma del desarrollo sostenible.

Nuevas estrategias están siendo actualmente elaboradas en el estudio y se dejan entrever de forma incipiente en los concursos más actuales.

### Estrategias

Los términos utilizados a continuación para expresar los siguientes conceptos son adoptados, algunos de ellos, del mundo de la ingeniería y adaptados según nuestras necesidades. El objetivo es aunar el concepto arquitectónico y estructural, definiendo una terminología que nos ayude a su comprensión.

### HIPERESTÁTICA<sup>1</sup>

Bajo este término, entendemos la estrategia por la cual la estructura (sea esta isostática o hiperestática) no debe solamente asegurar el equilibrio estático del edificio. Esta debe resolver otras funciones ligadas al concepto arquitectónico.

Mediante esta estrategia, la estructura de un edificio puede ser optimizada y generar espacios habitados que permitan reducir el volumen global del proyecto. Esto permite, a su vez, generar soluciones que, si bien en un primer momento pueden parecer arbitrarias, son justificadas a mediano o largo plazo para resolver programas complejos y permitir una reversibilidad programática.



FIGURA 4. EJEMPLO DE HIPERESTÁTICA. EXTENSIÓN DE LA ESCUELA ENTLISBERG, ZÜRICH (SUIZA). CONCURSO, 2022. GNWA. FUENTE: IMAGEN DE OLIVIER CAMPAGNE PARA ARTEFACTORYLAB

1. Una estructura es hiperestática cuando los esfuerzos internos no pueden calcularse únicamente mediante condiciones de equilibrio. Eso hace que múltiples estados de esfuerzos sean posibles, y que la estructura, por tanto, pueda «adaptarse» a diferentes configuraciones y ser más robusta en rotura (siempre que se eviten las roturas frágiles).

## MATERIAL EN ESTADO LÍMITE<sup>2</sup>

Estrategia que consiste en la utilización de un material según sus capacidades estructurales y su máximo potencial. Cada material debe trabajar con toda su capacidad, resultando la resistencia estructural de una estructura hiperestática de la resistencia conjunta de sus componentes.

La elección del material según el sistema estructural es una de las decisiones más importantes del proceso de diseño. Una vez la decisión se haya tomado, se utilizará el material en su justa medida para optimizar los recursos a disposición y poder reducir el peso total de la obra.

En palabras de Bengana (2023), detectamos como el hormigón es un claro ejemplo del mal uso de los materiales de construcción:

hoy en día, en un edificio de hormigón armado, lo que más contribuye al impacto de la huella de carbono, es la multiplicación de losas macizas y muros de carga. El grosor de las losas macizas y la cantidad de barras de refuerzo no



FIGURA 5. EJEMPLO DE UTILIZACIÓN DE MATERIAL EN ESTADO LÍMITE. UNIVERSIDAD DE CIENCIAS HUMANAS (UNIL), LAUSANA (SUIZA). CONCURSO, 2021. GNWA. FUENTE: IMAGEN DE OLIVIER CAMPAGNE PARA ARTEFACTORYLAB

2. El «análisis límite» es una rama de la estática basada en la teoría de la plasticidad, que permite determinar la carga de colapso de una estructura asumiendo un comportamiento dúctil de sus componentes.

Fue una de las grandes aportaciones del siglo XX a la ingeniería estructural y se aplica mediante tres teoremas: límite inferior, límite superior y unicidad (bajo condiciones de plasticidad asociada).

han dejado de aumentar en el último medio siglo, sin que hayan cambiado las propiedades del hormigón. La losa maciza sigue siendo el sistema de forjado más común en Suiza para edificios residenciales y de oficinas, a pesar de que no permite modernizar los conductos técnicos que la atraviesan, y mucho menos la adaptación de sus usos en el futuro.

## CONSTRUCCIÓN HÍBRIDA



FIGURA 6. EJEMPLO DE CONSTRUCCIÓN HÍBRIDA. NUEVA SEDE PARA LA EMPRESA VITEOS S.A., LA CHAUX-DE-FONDS (SUIZA). PROYECTO EN CURSO, 2021-2026. GNWA. FUENTE: IMAGEN DE OLIVIER CAMPAGNE PARA ARTEFACTORYLAB

Esta estrategia apuesta por la combinación de sistemas estructurales, pero también de distintos materiales, de la forma más coherente y pertinente para cada proyecto. Para ello se emplean materiales artificiales, como el hormigón o el acero, en combinación con materiales de origen natural, como la madera. El objetivo es extraer las mejores cualidades de cada uno: robustez e impermeabilidad del hormigón, ligereza y resistencia del acero, recursos locales y renovables como en el caso de la madera. Por supuesto, esta concepción no queda reducida a estos tres materiales básicos, sino que permite incorporar otros, como la fábrica, el adobe o la piedra natural.

### ESTANDARIZACIÓN



**FIGURA 7.** EJEMPLO DE ESTANDARIZACIÓN Y PREFABRICACIÓN. NUEVO CENTRO EDUCATIVO EN GIVISIEZ, FRIBURGO (SUIZA). CONCURSO, 2022. GNWA. FUENTE: IMAGEN DE OLIVIER CAMPAGNE PARA ARTEFACTORYLAB

Utilización de elementos a partir de un modelo único para así optimizar los recursos, facilitar la puesta en obra y reducir los costes mediante la prefabricación de elementos en la estructura.

Esta técnica, cuando las reflexiones necesarias se integran desde el origen del proyecto, permite además integrar una lógica de desmontaje y reutilización de elementos.

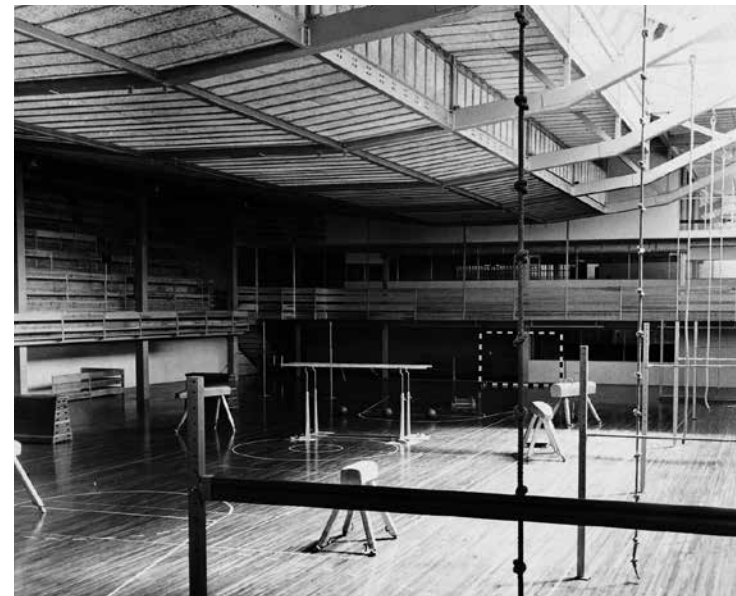
### CASOS DE ESTUDIO

GIMNASIO DEL COLEGIO MARAVILLAS, ALEJANDRO DE LA SOTA,  
MADRID, 1960-62

En el gimnasio del Colegio Maravillas de Alejandro de la Sota encontramos el gesto de hiperestática en su estado puro —a pesar de ser estáticamente un conjunto de cerchas isostáticas—.

La problemática inicial es clara: se trata de cubrir la sala de deportes de un punto a otro sin apoyos intermedios. Alejandro de la Sota resuelve esta cuestión al mismo tiempo que incrementa su complejidad al añadir otros factores externos suplementarios: incluir un dispositivo de luz cenital para la sala y albergar un programa de clases bajo cubierta.

Al resolver la estructura proyectando un sistema de cerchas metálicas de sección optimizada, consigue solventar todas las coyunturas del ejercicio



**FIGURA 8.** GIMNASIO DEL COLEGIO MARAVILLAS, ALEJANDRO DE LA SOTA. MADRID, 1960-1962. FUENTE: FUNDACIÓN ALEJANDRO DE LA SOTA

arquitectónico de un solo gesto y reclamar más funciones para la estructura, que el hecho de meramente soportar el peso de la cubierta.

La estructura habitada aloja las clases en el interior de su sección. A su vez, mediante el apoyo estricto de las cerchas en el paramento vertical, se permite la entrada de luz en el interior de la sala, proporcionando al mismo tiempo un funcionamiento estático claro y coherente.

MUSEO DE ARTE DE SAN PABLO (MASP), LINA BO BARDI,  
SAN PABLO, 1968



FIGURA 9. MUSEO DE ARTE DE SAN PABLO ASSIS CHATEAUBRIAND (MASP), LINA BO BARDI, 1968.  
FUENTE: FOTOGRAFÍA DE HANS GUNTHER FLIEG (1968), ACERVO IMS

En el proyecto para el MASP, Lina Bo Bardi utiliza la estructura en su estado límite, al desarrollar el edificio como un dintel empotrado en dos pórticos que son los núcleos de circulación vertical. La estructura trabaja en este caso en sinergia con el urbanismo y la arquitectura.

Nuevamente, a través de un gesto de pieza resistente hiperestática, el edificio se «suspende» —empotra, estructuralmente hablando— bajo los pórticos. La idea desarrollada permite la generación de una plaza urbana enfrente de un parque y con vistas a la ciudad.

Mediante un empleo audaz de la materia, todos los elementos necesarios para la arquitectura trabajan de manera estructural monolítica y conjunta, aportándole valor.

El interior del edificio se libera de apoyos y se consigue un espacio flexible para la exposición, pero también en un sentido mucho más amplio: es un ejemplo perfecto de infraestructura abierta.

CASA HELIO OLGA, MARCOS ACAYABA,  
SAN PABLO, 1990

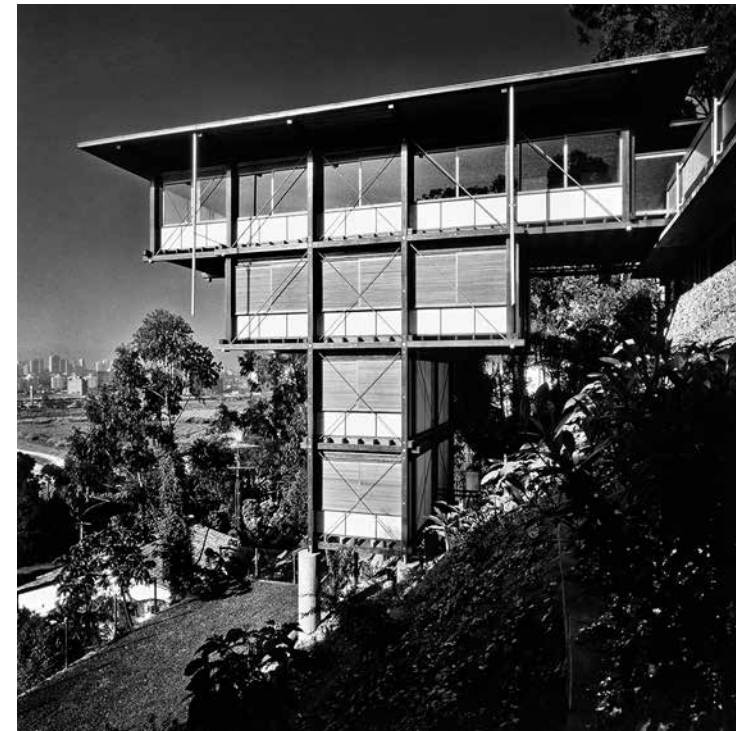


FIGURA 10. CASA HELIO OLGA, MARCOS ACAYABA. SAN PABLO, 1990.  
FUENTE: FOTOGRAFÍA DE NELSON KON

La casa Helio Olga de Marcos Acayaba representa un excelente ejemplo de estandarización, en el que, a través de la utilización de un sistema modular a partir de elementos de madera, se genera un sistema constructivo a modo de prototipo.

Este sistema permite combinar diferentes sistemas constructivos, mientras evoca una construcción tradicional basada en materiales locales. La construcción híbrida es utilizada en esta obra al emplear los elementos primarios de montaje en madera, apoyados sobre cimentaciones en hormigón y rigidizados entre ellos a través de tirantes metálicos.

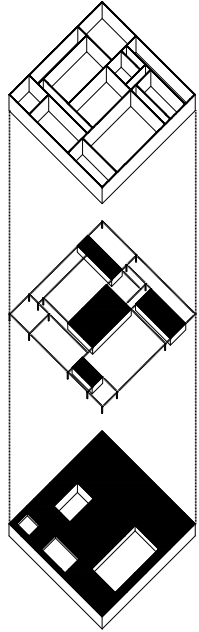


FIGURA 11. DIAGRAMA DEL CONCEPTO ESTRUCTURAL. FUENTE: GNWA

Mediante un gesto de hiperestática y de material en estado límite, se desarrolla un concepto arquitectónico en cascada invertida que permite asomar la casa al paisaje con un apoyo mínimo sobre el terreno en pendiente.

#### CENTRO DEPORTIVO Y CULTURAL EN ROMONT, GNWA, SUIZA, 2021

El proyecto para la comuna de Romont, en el cantón de Friburgo, es la primera obra construida del estudio, fruto de la participación en un concurso público en Suiza.

El solar presenta una pendiente homogénea hacia el sur, ofreciendo una vista excepcional de Romont, su casco antiguo y el castillo, y los pre-Alpes suizos al fondo.

El edificio se compone de tres elementos: el basamento contra el terreno, destinado al programa técnico; una «planta libre» con los programas públicos y la zona de piscinas, a nivel de la calle; el nivel superior, caracterizado por una trama de muros de hormigón que aloja el conservatorio, la zona *wellness* y el programa deportivo y de danza.

Cabe destacar que este equipamiento mixto contiene usos con exigencias programáticas y estructurales muy distintas. Uno de los mayores retos del proyecto es el de hacer cohabitar todos estos programas en una sola pieza.

#### HIPERESTÁTICA

El concepto estructural principal desarrollado para el proyecto se basa en la interdependencia de dos sistemas constructivos diferentes: trama de pilares y retícula de muros, ambos en hormigón armado.

Bajo esta lógica estructural y constructiva, el concepto arquitectónico se caracteriza por la reducción de los apoyos en la planta baja. Mediante esta estrategia, se consigue una máxima permeabilidad visual con el paisaje, diluyendo los límites entre el interior y el exterior a través de una fachada totalmente acristalada.

La realización de este desafío estructural se consigue gracias a la altura estática de aproximadamente 5 m de los muros de hormigón armado y al uso del hormigón pretensado mediante postensión.

Los muros estructurales en hormigón armado trabajan solidariamente y permiten una reducción del número de pilares en la planta inferior. Los pilares se encuentran solamente en el cruce entre dos muros y definen así espacialmente las diferentes células del proyecto.

Con el objetivo de hacer perceptible la sutil definición de estos subespacios dentro del «plan libre», se dejan visible parte de los muros del piso superior, a modo de dinteles. De esta manera se consigue una secuencia espacial fluida de una zona a otra, con diferentes alturas y atmósferas, dentro de un espacio unitario.



FIGURA 12. DETALLE DEL SISTEMA ESTRUCTURAL EN LA ZONA DE PISCINA DE SALTOS. FUENTE: FOTOGRAFÍA DE RASMUS NORLANDER

#### MATERIAL EN ESTADO LÍMITE

En el proyecto se yuxtaponen dos sistemas, pilares y muros, trabajando de manera solidaria. El uso moderado del hormigón se realiza compensando la masa necesaria del piso superior con la ausencia casi total de esta en planta baja.

El piso superior muestra un carácter introvertido en contraposición con la planta baja transparente. Sin embargo, eso no excluye el uso de *fenêtres en longueur*, a la manera de Le Corbusier, en algunos de los espacios.

En la zona de *fitness* y la sala de danza se recortan ventanas corridas de muro a muro, dividiendo el paramento de fachada en antepecho y dintel con el objetivo de enmarcar el paisaje exterior.

La realización de estas ventanas de hasta 28 m de longitud, sin puntos de apoyo, se consigue haciendo trabajar al hormigón en su estado límite.

Este proyecto demuestra las capacidades estructurales extraordinarias del hormigón y cómo su empleo puede hacerse con rigor y moderación.



FIGURA 13. DETALLE DE LA VENTANA CORRIDA EN LA SALA DE DANZA.  
FUENTE: FOTOGRAFÍA DE JUAN FABUEL

#### CONSTRUCCIÓN HÍBRIDA

El proyecto desarrolla un bastidor para la estructura primaria en hormigón armado. En fase de concurso se concibió un sistema de forjados y elementos de cubierta en madera, flexibles y adaptables según las alturas necesarias de cada espacio.

Durante el proceso de desarrollo, se fueron estudiando y desarrollando sistemas constructivos especiales que pudieran responder de forma eficiente a las múltiples exigencias del programa, derivando en diferentes tipos de forjados.

En la zona de piscinas se utiliza una solución de forjado mixto madera-hormigón para poder responder a las vibraciones del piso superior, donde se encuentran los espacios dedicados al *fitness* y a la danza. El recubrimiento inferior en madera, elemento estructural, sirve para rigidizar el conjunto del sistema y también como elemento acústico.

En cambio, en la zona norte se opta por el hormigón, debido a su alto potencial acústico, exigido en el programa del conservatorio. En estos espacios se trabaja con losas nervadas. Esta solución estructural, además de permitir una reducción de la cantidad de hormigón utilizado, refuerza la arquitectura y permite el paso de todas las instalaciones vistas entre los nervios.

Por último, un sistema de cerchas tridimensionales conforma la cubierta de los tres espacios principales y en doble altura del proyecto: vestíbulo, piscina de natación y piscina de saltos.



FIGURA 14. DETALLE DE SECUENCIA ESPACIAL EN LA ZONA DE PISCINAS. FUENTE: FOTOGRAFÍA DE RASMUS NORLANDER

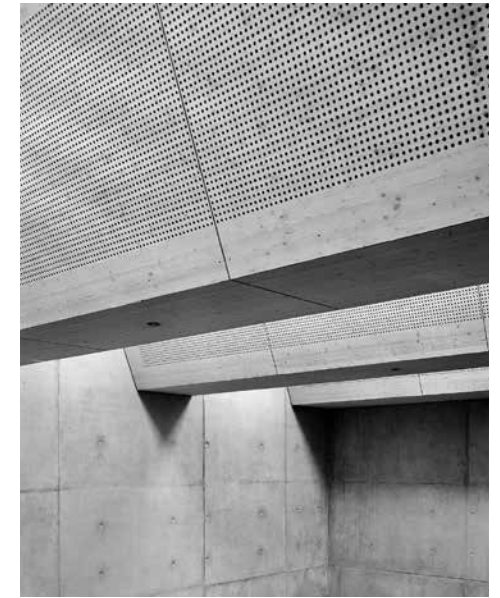


FIGURA 15. DETALLE DE LOS ELEMENTOS DE CUBIERTA. FUENTE: FOTOGRAFÍA DE RASMUS NORLANDER

#### ESTANDARIZACIÓN

Los elementos de cubierta rinden homenaje a «los huesos» de Miguel Fisac, utilizados en el Centro de Estudios Hidrográficos de Madrid y en otros proyectos.

En el proyecto de Romont, dicha cubierta se concibe en madera, material ligero y disponible en la región, con el que se construyen cajones de gran canto. Esta estructura hueca aloja las instalaciones de ventilación necesarias en una piscina. Las cerchas tridimensionales finalmente se envuelven con un panel en madera perforada, a modo de paramento acústico, y permiten, a su vez, la extracción del aire a través de las perforaciones.

Estos elementos, así como los forjados de las piscinas, se prefabrican en taller con madera regional y se transportan e instalan en obra mediante medios relativamente sencillos, considerando su reducido peso.

#### Conclusión

Este proyecto se considera un primer hito para el estudio en un largo camino por recorrer en términos de desarrollo sostenible. Su resultado pone de manifiesto la colaboración entre arquitectos e ingenieros y la capacidad de trabajar de la mano en la ejecución de todas las estrategias mencionadas anteriormente.

GNWA apuesta por el retorno a un racionalismo estructural y arquitectónico, reflexionando sobre su concepto e implicaciones, que permita reducir tanto los

recursos utilizados como las emisiones de CO<sub>2</sub>, garantizando su resistencia al tiempo.

Si somos capaces de concebir estructuras adaptables, estas se convertirán en el elemento sustancial del proyecto y podrán transmitir nuestro legado a las siguientes generaciones. Este legado hablará entonces de resistencia, no solo referida al paso del tiempo, sino también en el sentido de estandarte de la cultura arquitectónica. Las piezas de resistencia no solo hablan de una forma física de solidez, sino también de defensa de todo el patrimonio arquitectónico.

Apuntaba Alejandro de la Sota en 1989:

resultaba, además, que la limpieza obtenida sin crustáceos exigía, por y para sí misma, un cuidado muy grande en planteamientos, en claridad de esquemas, hasta en composición, y que exigía también una delicadeza y una fina sensibilidad que, tal vez, la Arquitectura al uso podía saltarse ya que luego podría ser tapado un no tan puro arranque. (p.74)

A fin de cuentas, una estructura honesta y coherente garantiza un proyecto de una belleza inherente y gran potencia, que es inteligible para todos, sin excepción.

## Referencias bibliográficas

- Bengana, A. (2023, 30 de enero). *Béton préfabriqué: en structure plutôt qu'en façade?* [Prefabricados de hormigón: ¿para estructuras más que para fachadas?]. <https://www.espazium.ch/fr/actualites/beton-prefabrique-en-structure-plutot-quen-facade>
- De la Sota, A. (1989). *Alejandro de la Sota. Arquitecto*. Madrid: Pronaos
- Rudolph, P. (s.f.). *On Design Criticism*. <https://www.paulrudolph.institute/quotes>
- Torroja, E. (1957). *Razón y ser de los tipos estructurales*. Madrid: Instituto de la Construcción y del Cemento.

# Centro deportivo y cultural en Romont

## Suiza

### GNWA

**Gonzalo Neri & Weck Architekten** es un estudio de arquitectura establecido en 2015 en Zúrich por Cristina Gonzalo (España), Marco Neri (Portugal-Suiza) y Markus Weck (Alemania), tres arquitectos que coinciden en la búsqueda de una arquitectura coherente e innovadora a la vez. GNWA aborda diferentes escalas y programas, con un especial interés por los equipamientos públicos de programa mixto que exigen estructuras complejas. La arquitectura de GNWA nace de la tensión entre dos nociones, lo específico y lo genérico, y genera a través de estos opuestos complementarios una arquitectura de múltiples dimensiones. Así, cada proyecto explora una singularidad y garantiza la coherencia de todos sus elementos a través de la estructura, medio fundamental por el cual se expresan conceptos espaciales fuertes y permanentes.

FOTOGRAFÍAS: RASMUS NORLANDER Y JUAN FABUEL

<b>OBRA</b>	CENTRO DEPORTIVO Y CULTURAL EN ROMONT, SUIZA
<b>PROGRAMA</b>	ZONA DE PISCINAS, CONSERVATORIO DE MÚSICA, AUDITORIO, ZONA WELLNESS, FITNESS, SALA DE DANZA Y CAFETERÍA
<b>UBICACIÓN</b>	ROMONT, CANTÓN DE FRIBURGO (SUIZA)
<b>MODALIDAD</b>	CONCURSO PÚBLICO
<b>PERÍODO DE OBRA</b>	2017-2021
<b>AUTORES</b>	PROYECTO DEL CONCURSO: CRISTINA GONZALO NOGUÉS, MARKUS WECK, MARCO NERI Y VÍCTOR FIGUERAS CORBOUD OBRA: MARCO NERI, CRISTINA GONZALO NOGUÉS Y MARKUS WECK.
<b>EQUIPO</b>	DAVIDE LAZZARI, SILVIA TONINELLO, LAURA SANCHIS ESTRUCH, VANESA BIJELIC, LEA MUTTONI, YASHA REY-IVAN, MARINA ESGUERRA LAUDO, MATHILDE LOISEAU, JULIEN GRAF, VALENTIN SCHMID, CLÉMENCE THIMONIER, ISIS GIROD Y DENIS FERRÉ
<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>	CHF 31.500.000
<b>SISTEMA ESTRUCTURAL</b>	PILARES Y MUROS DE HORMIGÓN ARMADO
<b>CERRAMIENTOS HORIZONTALES INTERMEDIOS</b>	FORJADO MIXTO HORMIGÓN - MADERA
<b>CERRAMIENTO HORIZONTAL SUPERIOR</b>	LOSAS NERVADAS Y CERCHAS TRIDIMENSIONALES EN MADERA
<b>CERRAMIENTOS VERTICALES PERMEABLES A LA LUZ</b>	- PLANTA BAJA: PARAMENTO ACRISTALADO FIJO - PLANTA SUPERIOR: VENTANAS ABATIBLES
<b>PAVIMENTOS</b>	- PISCINAS, SERVICIOS Y ESPACIO WELLNESS: AZULEJOS - CONSERVATORIO: MADERA - DANZA Y FITNESS: SUELO DEPORTIVO - CAFETERIA Y CIRCULACIONES: HORMIGÓN PULIDO



### Memoria

El nuevo centro deportivo y cultural en Romont (Friburgo, Suiza) se sitúa próximo a la escuela existente, creando una nueva conexión peatonal entre los dos edificios y reforzando la idea de campus con la sala de deportes y espectáculos.

La forma cuadrada de la planta del edificio aprovecha al máximo la orientación suroeste y ofrece unas vistas sobre el paisaje. La compacidad del volumen permite la creación de un jardín, completando así el sistema de llenos y vacíos existente, a lo largo del eje principal.

### Programa

El edificio, de uso mixto, requiere una estrategia global para resolver la complejidad estructural y las exigencias diversas de los diferentes programas. El concepto estructural ayuda a resolver todos los usos, ofreciendo continuidad espacial a las diferentes estancias.

Los protagonistas principales del proyecto son las vistas sobre el paisaje y la luz. El sistema estructural de muros de hormigón en el primer piso libera la fachada de apoyos en planta baja, ofreciendo permeabilidad con el exterior. A su vez, unas cerchas tridimensionales se apoyan sobre estos muros, permitiendo así la entrada de luz cenital en los tres espacios principales: foyer, piscina de saltos y natación.

El acceso al edificio se realiza desde la fachada norte a través del foyer de doble altura que articula los diferentes usos.

En planta baja, el programa de piscinas se sitúa en la fachada sur. Cada piscina se encuentra delimitada por dinteles que se apoyan en pilares de esquina, definiendo zonas con diferentes alturas y ambientes dentro del gran espacio común. Las piscinas de saltos y natación son espacios de doble altura, mientras que las dos de aprendizaje, de altura inferior, se sitúan directamente en fachada.

En el piso superior se encuentra el programa del conservatorio, deportivo y zona *wellness*, espacios con carácter introvertido.

## Materialidad

Los materiales escogidos para el proyecto refuerzan el concepto estructural y otorgan especificidad a cada parte del programa. El hormigón se deja visto para pilares, dinteles y muros y la madera para los forjados y las cerchas triangulares que cubren las piscinas. Los dos materiales estructurales se yuxtaponen junto a revestimientos más refinados y suntuosos, como el acero inoxidable pulido, el terciopelo o el mosaico.

## Envolvente

La fachada se trata como una envolvente abstracta que representa la reducción máxima del concepto arquitectónico. De este modo, el acero galvanizado, también presente en el interior, conforma el zócalo y el piso superior, mientras que la planta baja se muestra totalmente transparente.

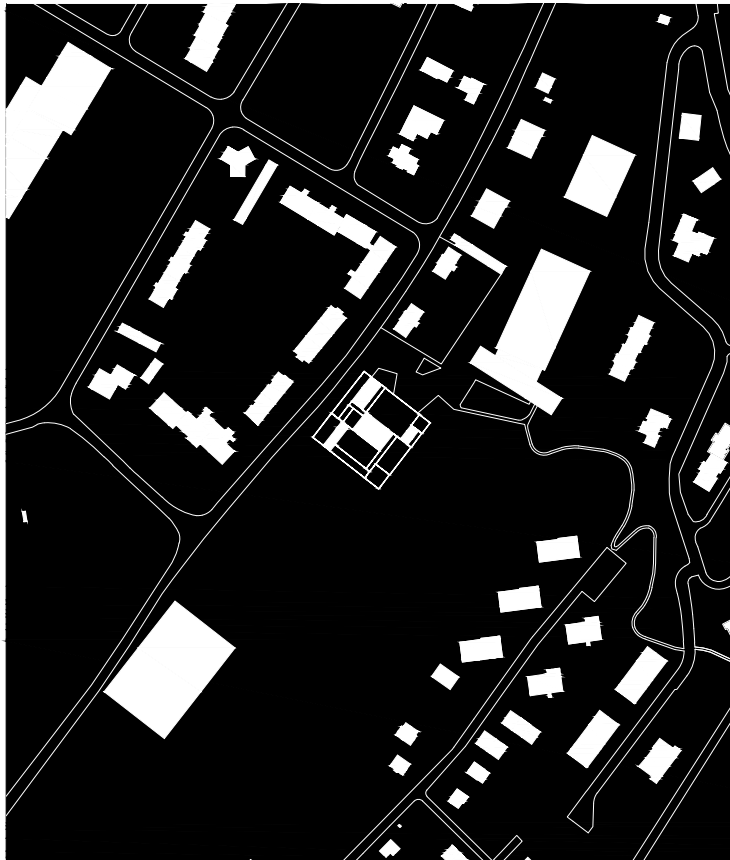
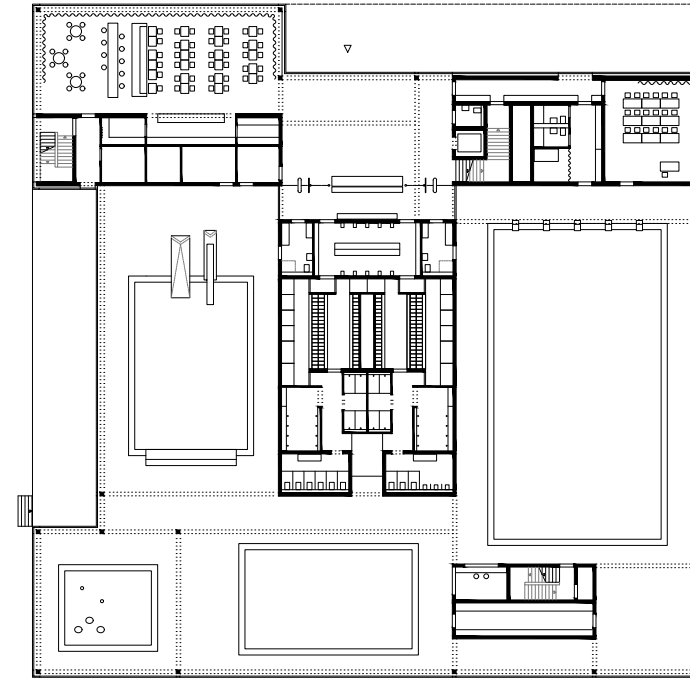
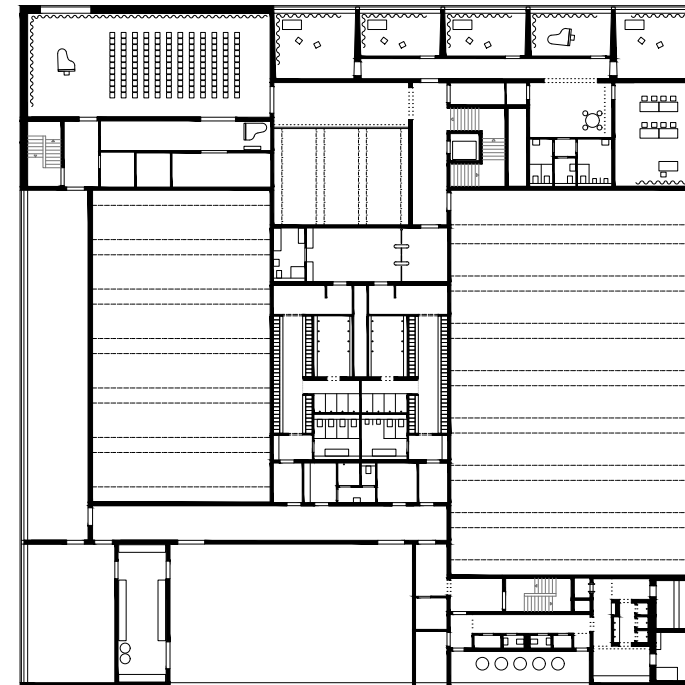


FIGURA 1.  
PLANO DE SITUACIÓN

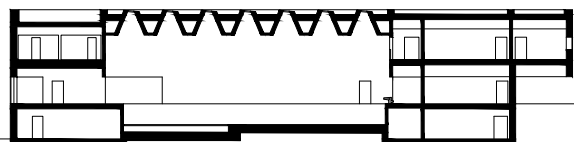


PLANTA BAJA

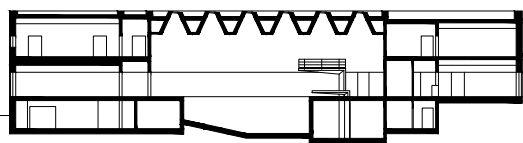


PLANTA PRIMERA

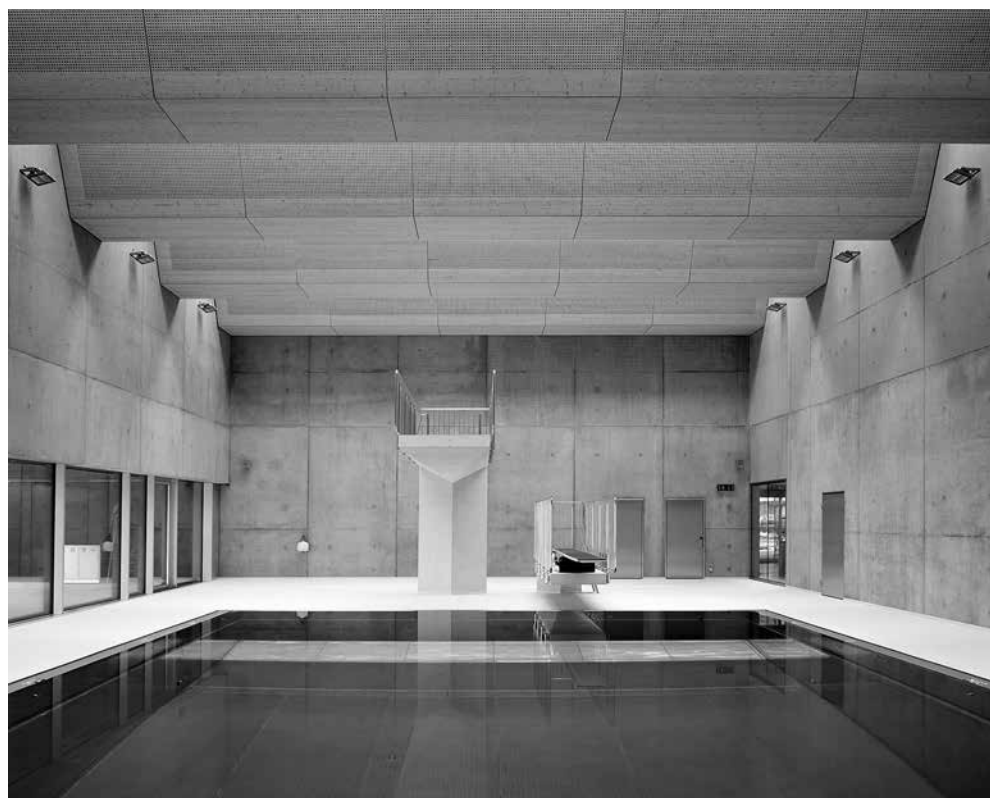


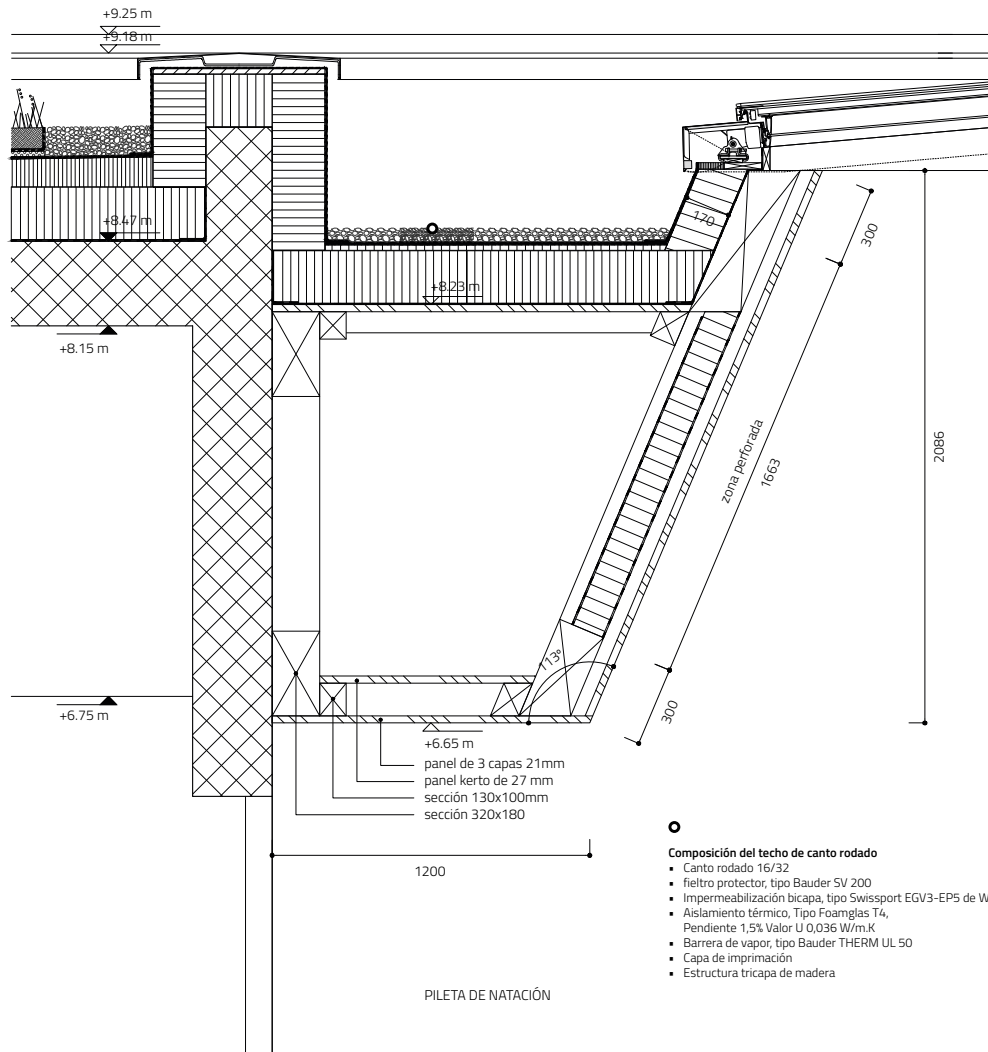


SECCIÓN PISCINA DE NATACIÓN

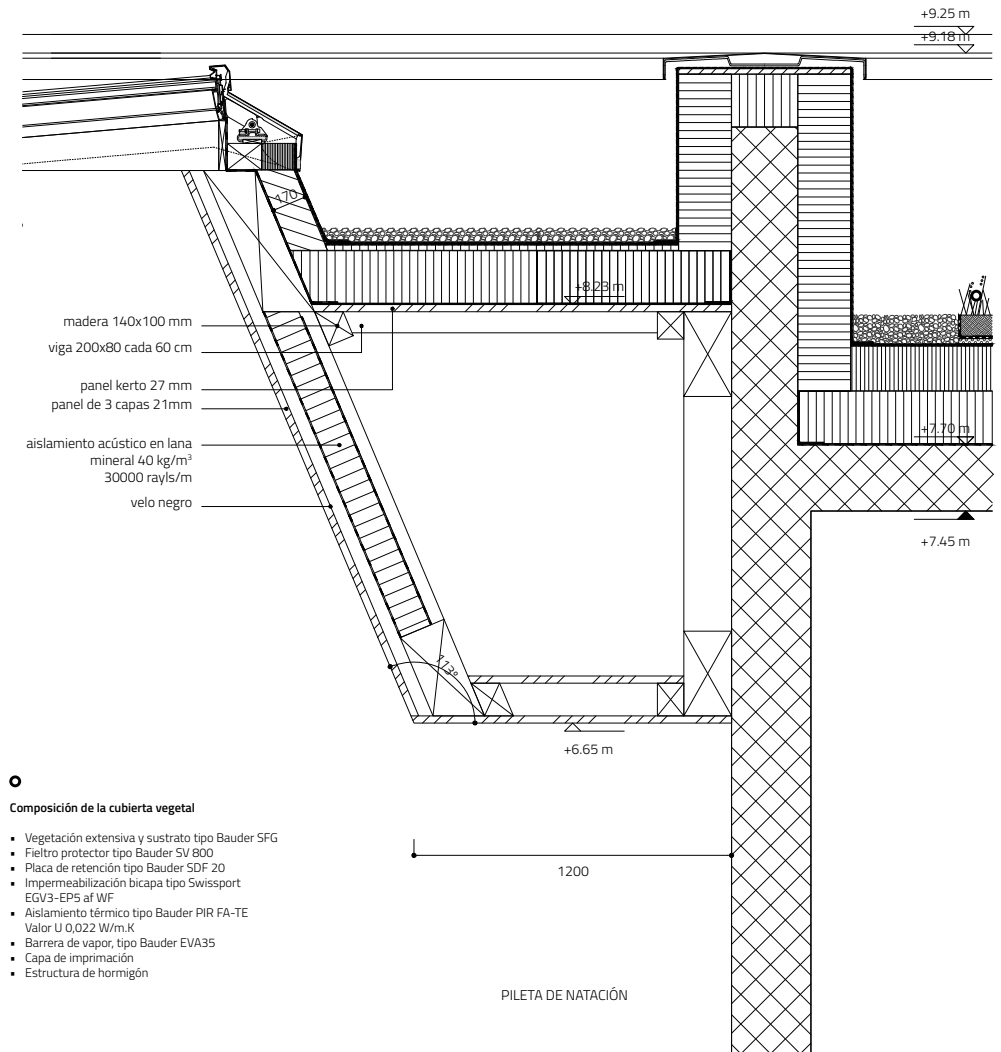


SECCIÓN PISCINA DE SALTO

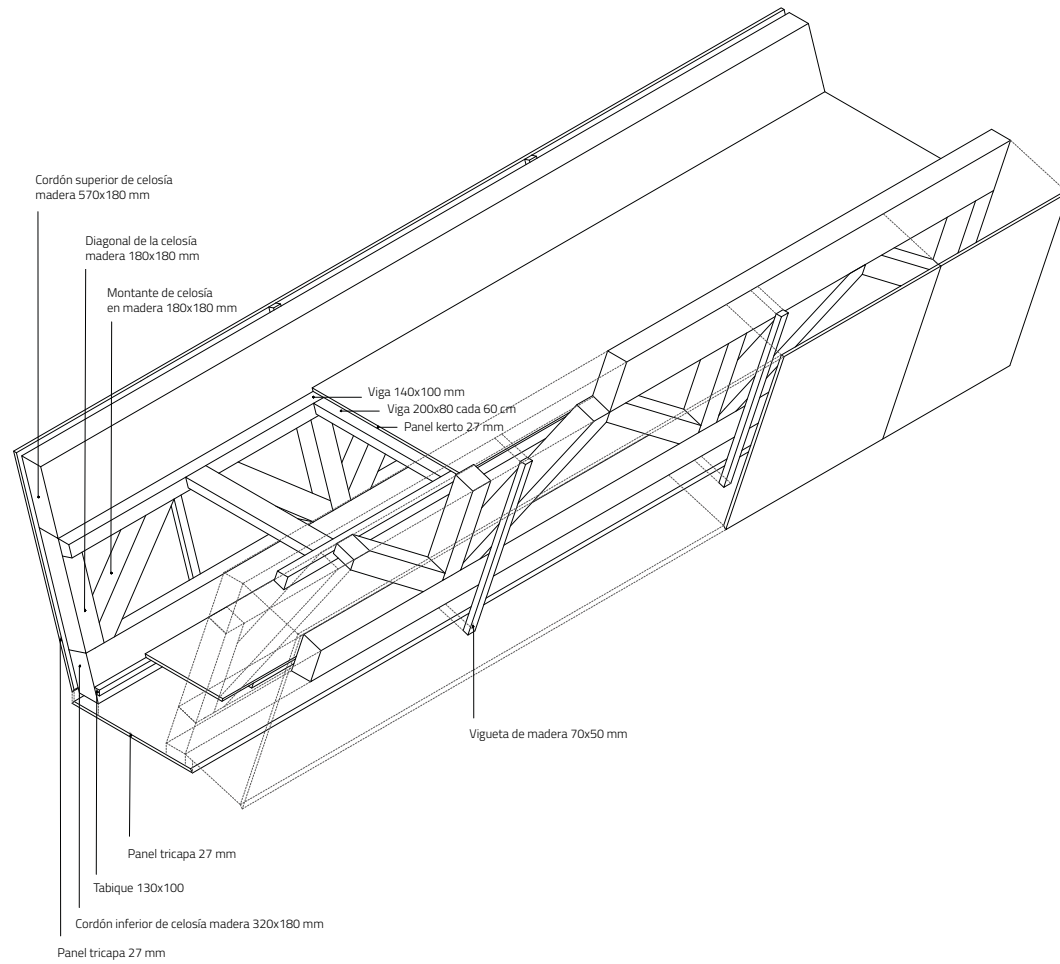




DETALLE D33



DETALLE D35



AXONOMÉTRICA





TEXTOS DE TECNOLOGÍA  
COMITÉ EDITORIAL

MARIO BELLÓN

Secretario ejecutivo del Instituto Uruguayo de la Construcción en Seco. Director de la revista técnica *Edificar* y del espacio de exhibición y capacitación Constructiva. Director de la agencia D+B Comunicación y de la distribuidora y librería editorial Forum.uy. Director del espacio La Columna en Radio Sarandí. Miembro del Consejo Directivo de la Liga de la Construcción del Uruguay. Asesor en gestión de recursos y proyectos del Fondo de Publicaciones y Divulgación del Instituto de Tecnologías (FADU-Udelar).

JUAN JOSÉ FONTANA

Arquitecto (FArq-Udelar, 2001). Doctor (Universidad de Alicante, 2012). Profesor Titular del Instituto de Tecnologías (FADU-Udelar) en régimen de Dedicación Total. Miembro del Comité Académico del Doctorado en Arquitectura (FADU-Udelar). Director del Diploma de Especialización de Diseño de Estructuras en la Arquitectura (FADU-Udelar).

JORGE GAMBINI

Arquitecto (FArq-Udelar, 1999). Doctorando en Proyecto (FADU-Udelar). Profesor Titular del Instituto de Tecnologías (FADU-Udelar) y profesor Adjunto del Taller Velázquez (FADU-Udelar). Director de la Carrera de Arquitectura (FADU-Udelar).

CLAUDIA VARIN

Arquitecta (FArq-Udelar, 2014). Magíster en Arquitectura, área tecnológica, (FADU-Udelar, 2023). Doctoranda en Arquitectura (UNC, Argentina). Docente Ayudante del Instituto de Tecnologías (FADU-Udelar). Integrante del comité editorial de la revista *Textos de Tecnología* y del equipo de investigación Arquitectura con Tierra. Docente Ayudante en Tecnología Integrada. Integrante del Centro de Sustentabilidad de FADU. Docente de Capacitación en Bioconstrucción en el Instituto de Enseñanza de la Construcción (UTU). Integrante de la Red Iberoamericana Proterra.

GUILLERMO ZUBELDÍA

Arquitecto (FArq-Udelar, 2016). Magíster en Eficiencia Energética y Energías Renovables (URJC, España, 2018). Integrante del equipo de Patrimonio FADU, desarrollando actividades de extensión e investigación. Integra el grupo I+D «Artes aplicadas a la arquitectura con valor patrimonial». Integrante del comité editorial de la revista *Textos de Tecnología*.



ARMCO

Este símbolo marca la diferencia

PERFILES ESTRUCTURALES  
PERFILES PARA LA CONSTRUCCIÓN EN SECO  
PANELES PARA LA CONSTRUCCIÓN

**ENTRE LOSA Y LOSA  
TODO LO QUE NECESITÁS  
ESTÁ EN MC3**



**KNAUF**



**MC3**  
CONSTRUYENDO  
CONFIANZA

**AQUAPANEL®**

MATERIALES, HERRAMIENTAS Y ASESORAMIENTO PARA TU OBRA SECA

📍 Dra. María Luisa Saldún de Rodríguez 2383 🌐 [www.mc3.com.uy](http://www.mc3.com.uy) ☎ 2 601 41 55 📱 @mc3uruguay

**BARBIERI**

**Drywall Plus**

PERFILES PARA TABIQUES  
Y CIELORRASOS GALVANIZADOS



**ELEGÍ PARA TUS CLIENTES**

**LO QUE ELEGIRÍAS PARA VOS**



[adbarbieri.com](http://adbarbieri.com)

## Reconectando la naturaleza con lo urbano



El Termowood finlandés de Lunawood es un hermoso material de madera que se fabrica utilizando solo calor y vapor.

La modificación térmica hace que la madera nórdica sea dimensionalmente estable y resistente a la intemperie completamente sin productos químicos.

Estas características únicas inspiran a arquitectos y diseñadores a crear proyectos asombrosos en todo el mundo. Los productos Lunawood se pueden utilizar en fachadas, interiores y paisajismo en todas las condiciones climáticas.



Próximamente  
en nuestro  
showroom

[barracaparana.com](http://barracaparana.com)

CASA CENTRAL  
Democracia 2350  
T: 2200 0845 int.1

YESOCENTRO  
Democracia 2319  
T: 2200 0845 int.2

CDL  
B. Berges 4300  
T: 2227 7952

MALDONADO / PUNTA DEL ESTE  
Av. J. Batlle y Ordoñez y Ruta 39  
T: 4222 0492