



Centre de Cooperació per  
al Desenvolupament. CCD

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



## **Los ciclos de materiales en la edificación Materiales y tecnologías respetuosas con el medio**

Albert Cuchí  
Universidad Politécnica de Cataluña

Diplomado internacional

Acercamiento a criterios arquitectónicos ambientales para comunidades  
aisladas en áreas naturales protegidas de Chiapas

**Universidad Autónoma de Chiapas**

Tuxtla Gutiérrez, 25 de enero del 2003

El desarrollo sostenible exige el cierre de los ciclos de los materiales usados para cualquier actividad, retornando a la calidad de recursos los residuos que ésta genera.

Ello implica la necesidad de disponer de la energía, la tecnología y la organización social que permita mover los materiales a través de ese ciclo cerrado y, en concreto, el abatimiento de los residuos y su reconversión de nuevo en recursos.

Tradicionalmente, y hasta la aparición de los combustibles fósiles como elemento que permitió el acceso a una cultura de base mineral, el uso de la biosfera como fuente de recursos y absorción de residuos funcionó como la 'gran máquina' que permitió mantener las diferentes culturas durante largos periodos de tiempo mediante estrategias de máximo aprovechamiento de los recursos biosféricos.

Hoy día, el reto de la sostenibilidad nos devuelve a la necesidad de contar con los recursos de la biosfera llamados ahora 'recursos renovables'. Su utilización obliga, no obstante, a considerar una serie de restricciones que permitan el mantenimiento del suministro de recursos en el futuro.

Esas restricciones se pueden formalizar en unas ecuaciones para un recurso dado provisto por una cantidad de entorno dado:

$$(1) \text{ tasa de renovación (kg/año) = existencias (kg) / durabilidad (años)}$$

si consideramos que una parte del material se recicle o recupere dentro del ciclo técnico, definiremos la *tasa de reciclaje* (adimensional), como la relación entre la cantidad de material *reciclado* o recuperado respecto a las *existencias*, (ambas cantidades expresadas en kg)

$$(2) \text{ tasa de reciclaje = reciclado / existencias}$$

con lo que, incluyendo este nuevo factor a (1) se obtiene,

$$(3) \text{ tasa de renovación = [existencias x (1 - tasa de reciclaje)] / durabilidad}$$

si suponemos ahora que el material se extraerá de los sistemas biosféricos de una extensión determinada, existirá una *tasa de producción natural*, expresada en kg/año, que representará el flujo de material que estos sistemas aportan anualmente (y que no debe confundirse con el depósito o las reservas existentes de ese material).

Si se desea que el uso del recurso sea sostenible, la *tasa de renovación* utilizable deberá ser menor o igual a la *tasa de producción natural*, descontando de ella el mantenimiento de los servicios vitales que sea preciso considerar:

$$(4) \text{ tasa de producción natural} \geq \text{tasa de renovación}$$

y, por tanto, quedan restringidas las *existencias* posibles,

(5) *tasa de producción natural*  $[existencias \times (1 - \textit{tasa de reciclaje})] / durabilidad$

de dónde resulta

(6) *existencias*  $(\textit{tasa de producción natural} \times durabilidad) / (1 - \textit{tasa de reciclaje})$

transformándose en igualdad si consideramos, en lugar de las *existencias*, la *cantidad máxima utilizable* del recurso en cuestión, expresada igualmente en kg

(7) *cantidad máxima utilizable*  $= (\textit{tasa de producción natural} \times durabilidad) / (1 - \textit{tasa de reciclaje})$

con lo que disponemos de una formulación que nos permite, en un entorno determinado, utilizar un recurso de forma sostenible. Simétricamente se establecen las condiciones para que el entorno pudiese absorber los residuos, substituyendo en la ecuación la *tasa de producción natural* por la *tasa de absorción natural* de los residuos, expresada en kg/año

(8) *cantidad máxima utilizable*  $= (\textit{tasa de absorción natural} \times durabilidad) / (1 - \textit{tasa de reciclaje})$

Sobre estas ecuaciones es conveniente remarcar algunas consideraciones.

En primer lugar, la limitación de la cantidad máxima del recurso utilizable en una determinada actividad. Esa limitación choca con la percepción actual de que el flujo de un material sólo depende del aumento en su velocidad de extracción y, por lo tanto, las limitaciones al acceso a un recurso son sólo temporales.

En segundo lugar, que el aumento de esa cantidad máxima disponible sólo puede hacerse a través o bien del aumento de la productividad del trozo de biosfera que nos lo ofrece, teniendo en cuenta que esa productividad no debe afectar a la capacidad productiva futura, o bien actuando sobre los otros factores de la ecuación, eso es, la durabilidad del recurso en la fase de servicio o su reciclaje en el interior del sistema técnico.

La durabilidad del recurso debe ser entendida de la forma adecuada. Hay una durabilidad producto de la duración del servicio que provee, eso es, de la obsolescencia funcional del producto en el que el material se halla. Así, por ejemplo, la durabilidad de un envoltorio no depende tanto de la durabilidad de sus materiales como de la duración de los procesos de transporte y almacenamiento del producto que protege hasta su consumo.

La arquitectura posee una gran ventaja en este aspecto respecto a otras actividades sociales. Se ha entendido tradicionalmente la casa como un producto 'para toda la vida' e incluso, en muchas sociedades sedentarias, como un bien patrimonial a transmitir entre generaciones. Ello permite que los materiales empleados en su construcción tengan un largo periodo de permanencia sin quedar afectados por la obsolescencia funcional del edificio al que pertenecen.

Un ejemplo revelador de esa ventaja de la arquitectura respecto a otras actividades es el uso del aluminio como material de construcción:

Una ventana de aluminio de un edificio, de un metro de alta por dos metros de ancha, de dos hojas correderas, contiene 16 kg de aluminio

Si suponemos que todas las ventanas de una vivienda son de aluminio, ello supondría una cantidad del orden de 80 kg de aluminio empleado en ellas

Si una vivienda tiene una vida estimada de 50 años y viven dos personas, el consumo de aluminio por persona y año que supone el aluminio de las ventanas es de

$$80 \text{ kg} / 50 \text{ años} \times 2 \text{ personas} = 0.8 \text{ kg de aluminio por habitante y año}$$

Si suponemos que no sólo las viviendas sino todas las ventanas de todos los edificios fuesen de aluminio, ello probablemente supondría doblar esa cantidad, aumentando el consumo de aluminio en ventanas en la edificación a

$$1.6 \text{ kg de aluminio por persona y año}$$

¿Es eso mucho aluminio en comparación con otras actividades que usan también de ese material?  
Veamos un caso

Una lata de aluminio, de Coca-Cola concretamente, pesa 16 gramos. Si consumimos 100 latas anuales de ese producto, habremos consumido en un uso tan banal la misma cantidad de aluminio que la necesaria para construir las ventanas de todos los edificios, eso es,

consumiendo dos latas a la semana. ¿Cuántas consume usted?

Otro aspecto a considerar en la durabilidad de los materiales es que, en muchas ocasiones, esa durabilidad depende de contrarrestar la incidencia de los mismos factores que aseguran su reintegro al medio natural, con lo que según el tipo de protecciones que se utilicen frente a esos agentes se impide el posterior retorno a la biosfera y se anula así su calidad de renovable. El ejemplo de la madera es clarificador.

La madera es el modelo de material renovable por antonomasia. Producto de los árboles, su explotación a través de patrones que mantienen continuamente la capacidad de renovación de los bosques establece las condiciones de productividad del medio, su versatilidad como material le permite adoptar formas y configuraciones con las que responder a muy diferentes tipos de necesidades, desde herramientas de trabajo, domésticas, ajuar, contenedores de fluidos, material de construcción tanto resistente como de cerramiento o recubrimiento, etc., etc.,... incluyendo su función como material proveedor de energía en su combustión, frecuentemente al final de la vida útil del producto al que da materialidad.

La madera es el principal material en casi todas las culturas tradicionales, en la actualidad, y sobre el que se ponen buena parte de las esperanzas de una sociedad sostenible. Pero como material orgánico dispone, en todos los medios en que se produce, de una cohorte de tipos de vida que se nutren de su fibra, que obtienen recursos, esencialmente alimentarios, de sus constituyentes y que, en última instancia, los reciclan de nuevo en el medio biosférico.

El mantenimiento de la madera, la durabilidad del elemento que conforma y que nos presta servicio, obliga a evitar o cuando menos retrasar la velocidad de la degradación de su estructura que esos organismos producen. La defensa frente a esa degradación de los elementos contruidos con madera no debe impedir en el futuro que esa material vuelva al medio biosférico a cerrar su ciclo. Todas las culturas tradicionales han elaborado mecanismos adecuados para frenar la degradación de la madera sin evitar su descomposición.

Pero hoy, en nuestra mineralizada cultura en la que el uso de la madera en construcción se mantiene aún por la insustituible calidad visual y táctil que aporta, las estrategias de protección frente a la degradación sellan el camino hacia una posterior reintegración al ciclo biológico, al adoptar medidas biocidas con productos que envenenan el medio al reintegrar la madera tratada de ese modo, no sólo impidiendo su absorción sino degradando la infraestructura biológica que lo hace.

La tabla que se adjunta al final de este texto, que se ha extraído de la Environmental Resource Guide del American Institute of Architects, muestra el ciclo de vida de los materiales que constituyen el tratamiento estándar de protección de la madera en las actuales estructuras de madera laminada encolada para su uso en edificación.

El ejemplo de la madera es el más evidente y conocido, pero todos los materiales y técnicas constructivas tradicionales no son sino estrategias de optimización de recursos frente a los factores incluidos en las ecuaciones que limitan el uso sostenible de los recursos. Comentaremos dos ejemplos de materiales de amplia difusión, la tierra y la piedra, para 'leer' las estrategias que adoptan.

Cuando se habla de 'tierra' como material de construcción se habla, en realidad, de suelo. El suelo es un complejo conjunto de materiales obtenidos de la descomposición de las rocas a través de procesos físico-químicos a los que no son en absoluto ajenos los agentes bióticos. Al contrario, la formación y mantenimiento de los suelos requiere la intervención de numerosos agentes biológicos, desde bacterias a vertebrados pasando por plantas y hongos.

Como material de construcción la tierra es capaz de formar masas coherentes gracias a la capacidad aglomerante de las arcillas. La conformación de esas masas se puede conseguir con baja energía utilizando la variación de la cohesión de la arcilla con los cambios de humedad. Regulando esos cambios se puede transformar un suelo rígido en un material plástico fácilmente conformable y, regulando su secado, disponer de nuevo de una pieza rígida pero ahora con la forma que nos interesa para construir con ella.

Todos los procesos de conformación de la tierra para obtener elementos constructivos rígidos son reversibles, eso es, en presencia de humedad la tierra vuelve a plastificar y a perder rigidez, disolviendo su forma y destruyéndose por tanto la arquitectura que conformaba. Es por ello que las arquitecturas de tierra son siempre arquitecturas defensivas respecto del agua, defensa que consiste en proteger los elementos construidos con ese material lejos de los recorridos habituales del agua por el interior y por el exterior del edificio.

Pero el agua actúa también como el elemento que asegura la reintegración al medio de la tierra utilizada. Cuando una arquitectura de tierra se abandona y las protecciones de sus muros desaparecen, el agua poco a poco disuelve el material y lo reintegra al medio en unas condiciones idénticas a las que presentaba cuando se extrajo.

Es más, casi siempre la tierra se extrajo del mismo lugar, del mismo solar donde se edificó con ella, con lo que el retorno del material se produce en el mismo entorno y en las mismas condiciones que presentaba cuando se extrajo, con lo que servirá para restituir el medio original.

Pero, además, con las técnicas tradicionales la tierra no ha visto modificadas sus características físico-químicas, y la reversibilidad de los procesos se continúa manteniendo, con lo que la tierra reintegrada vuelve a ser utilizable para construir de nuevo con ella muros o bóvedas.

Con la tierra disponemos de un material que presenta una *tasa de reciclaje* igual a 1, lo que compensa sobradamente su baja *durabilidad*, que demanda un mantenimiento continuo y la disposición de elementos que la protejan del agua.

Por otra parte, la tasa de producción natural de suelo aunque extensa no es muy elevada, pero disponemos de depósitos enormes de tierras aptas para la construcción y tan sólo es preciso considerar la competencia con otros usos más preeminentes, como por ejemplo la agricultura.

La piedra es otro material de construcción tradicional. No más tradicional por más usado sino porque su persistencia en el tiempo hace más durable su imagen.

Efectivamente, la piedra disfruta de una durabilidad enorme comparada con los materiales comentados hasta ahora, madera y tierra, y con muchos otros como la mayoría de los metales, y algunos materiales pueden resistir milenios en ambientes muy agresivos.

Esta enorme *durabilidad* es lo que le confiere sus ventajas ambientales, pues es un material que pertenece a un ciclo de renovación a escala geológica y, por tanto, con una *tasa de producción natural* muy baja. Aparte de la enormidad de los depósitos de roca existentes, le favorece como material el hecho que su consideración como residuo en la preparación de los campos para el cultivo (al igual que la madera como subproducto de la roza), tradicionalmente lo ha puesto a disposición como subproducto de una actividad esencial y que se acumula, en realidad como vertedero, en vallas, muros y construcciones.

También fruto de su durabilidad, muy por encima de las edificaciones de las que forma parte e incluso de las civilizaciones que las utilizaron originalmente, su *tasa de reciclaje* es técnicamente la unidad: puede ser absolutamente reaprovechada.

Esta promesa de durabilidad ha permitido, por encima de cualquier otro material sea madera o metal, dedicarle una gran cantidad de recursos (trabajo y energía) en su conformación que ha aumentado su valor como material, lo que, a su vez, favorece su reciclaje una vez el edificio se abandona. Además existe una proporción en ello: cuanto más dura es la piedra más esfuerzo costará conformarla pero más durabilidad tendrá; cuanto más blanda menos esfuerzo pero, a la par, menos duración.

El aprovechamiento de piedras de edificios existentes es continua en toda la historia de la humanidad, y desde el Coliseo hasta las Pirámides, todos los monumentos antiguos han ejercido de canteras para las edificaciones posteriores, reciclando así no tan sólo el material piedra sino también, y sobretodo, el trabajo dedicado a conformar sillares y dovelas.

Por otra parte, las piezas de piedra son reintegrables al medio aunque su persistencia hace que las configuraciones arquitectónicas, de infraestructura o paisajística que determinen sean muy durables.

¿Y que sucede con los materiales de construcción actuales?

La construcción no ha quedado al margen de la evolución hacia una dependencia de los recursos energéticos no renovables y hacia un mayor aporte de los recursos minerales, no orgánicos. Aunque no lo haya hecho al mismo ritmo que otros sectores productivos.

Lastrada por un pasado y una tradición a la que habitualmente se hace responsable del 'atraso tecnológico' que afecta al sector, la construcción de edificios ciertamente ha vivido una evolución limitada en aquellos elementos técnicos tradicionales, sobre todo comparada con la de los nuevos sistemas técnicos incorporados a ella, como las instalaciones por ejemplo, o a otros productos nacidos ya con la Revolución Industrial, como los automóviles.

No obstante, los cambios producidos han sido suficientes y suficientemente significativos para considerar la edificación como un sistema técnico prácticamente independiente de los sistemas orgánicos y con sus ciclos materiales completamente abiertos.

Si los materiales tradicionales, como la piedra, la madera o la tierra, eran ejemplos de ciclos materiales cerrados y de integración en los sistemas biosféricos locales que los aprovisionaban, en la actualidad no sólo los nuevos materiales ya no presentan esas características sino que los tradicionales han visto alterados sus sistemas de producción hasta perder esas características que, hoy día, vuelven a ser valoradas por su acercamiento a la sostenibilidad.

Un vistazo a las cantidades de energía de origen fósil precisa para extraer y fabricar los productos de construcción actuales nos va a permitir darnos cuenta de esa evolución:

GRAVA.....	0,1 MJ/KG
ARENA .....	0,1 MJ/KG
HORMIGÓN.....	1 MJ/KG
FÀBRICA DE LADRILLO.....	2,8 MJ/KG
MADERA ASERRADA.....	3 MJ/KG
YESO.....	3,3 MJ/KG
LADRILLO.....	4,5 MJ/KG

TA BLERO CONTRACHAPADO.....	5 MJ/KG
CEMENTO.....	7,2 MJ/KG
ASFALTO.....	10 MJ/KG
TABLERO AGLOMERADO.....	14 MJ/KG
VIDRIO.....	19 MJ/KG
PINTURA PLASTICA.....	20 MJ/KG
FIBRA DE VIDRIO.....	30 MJ/KG
ACERO.....	43 MJ/KG

POLIURETANO.....	70 MJ/KG
POLIETILENO.....	75 MJ/KG
POLIPROPILENO.....	77 MJ/KG
PVC.....	80 MJ/KG
COBRE.....	90 MJ/KG
PINTURA (ESMALTES).....	100 MJ/KG
POLiestireno EXPANDIDO.....	100 MJ/KG
NEOPRENO.....	120 MJ/KG
ALUMINIO.....	160 MJ/KG

Fuente: Guia de l'Edificació Sostenible (1999)

Los materiales de la tabla están ordenados en sentido creciente de la cantidad de energía precisa para conformarlos, pero esa misma ordenación muestra otra lectura que no es sino la evolución de los materiales más tradicionales hasta los más modernos.

Efectivamente, el primer grupo de materiales, con contenidos energéticos entre 0 y 5 MJ/kg, agrupa a la casi totalidad de los materiales de construcción tradicionales que, aunque actualizados en sus procesos de producción, aún son materiales de baja densidad energética.

En la franja de 5 a 50 MJ/kg, que supone un salto de un orden de magnitud en el consumo de energía, aparece un segundo grupo de materiales que son ya fruto de la revolución industrial, del paso de una sociedad con una base biosférica a otra de base mineral. Agrupa los materiales de la arquitectura 'moderna', de la arquitectura que quiso tomar la máquina y la civilización industrial como modelo.

La última agrupación, con contenidos energéticos entre 50 y 150 MJ/kg muestra los últimos materiales, los más nuevos, que apenas llevan alguna decena de años con un uso sistemático en la construcción pero que, indudablemente, se nos ofrecen como 'los materiales del futuro'.

La evolución es hacia la insostenibilidad, hacia ciclos cada vez más abiertos, más intensivos en el uso de recursos minerales y en la generación de residuos. ¿A cambio de qué? ¿De una mejor calidad arquitectónica? ¿De una mejor habitabilidad? Veámoslo.

Actualmente vivimos en dos habitabilidades. Habitamos dos tipos de entornos que se enfrentan a la cuestión de proveer las condiciones necesarias para vivirlos con dos estrategias diferentes, incluso antitéticas. Aceptamos, por así decirlo, dos maneras de vivir contrapuestas, con una actitud que calificaría de esquizofrénica.

Por un lado, una habitabilidad antigua, heredada de una tradición secular y que se muestra relativamente impermeable al cambio, anclada al pasado, incluso normativamente. Hablamos de la vivienda, de nuestra casa.

De un tipo de edificación que, aunque ha estado en el centro del debate arquitectónico durante una buena parte del siglo XX y que ha asumido una ola modernizadora no sólo en las técnicas constructivas sino también en los equipos para utilizarla, hay que considerarla aún basada en unos modelos formales y de uso dependientes de criterios antiguos y asentados en la tradición. No nos resulta chocante habitar aún edificios centenarios y los consideramos, a menudo, de una calidad más que aceptable.

De un tipo de edificación que consagra una habitabilidad basada en el contacto con el exterior, que exige de cada habitación vistas, ventilación natural, iluminación natural y, a menudo, considerando el asoleo como un valor fundamental. Con materiales tradicionales o que mantienen un vínculo, aunque sólo sea histórico, con ellos.

Por otro lado, el modelo del siglo XX. El nuevo uso que permite dar expresión arquitectónica a las técnicas propias de nuestra sociedad industrial que son las que definen la nueva habitabilidad: el moderno edificio de oficinas.

Paradigma de los avances tecnológicos: control lumínico, térmico, de ventilación a través de máquinas diseñadas y dimensionadas al efecto, de forma que podemos pasar muchas horas trabajando -o sea: viviendo- en un ambiente controlado mecánicamente. Y rodeado de nuevos materiales. Plásticos en pavimentos y en el mobiliario y en el equipamiento. Metales y gomas. Con expresiones formales propias, con mamparas y falsos techos, donde la discontinuidad y la junta conforman una estética que contrasta con la propia de los materiales tradicionales que nos gusta exhibir en casa.

Esta dualidad en el concepto de habitabilidad que, en mayor o menor grado, todos vivimos en nuestra cotidianeidad, enfrenta dos modelos que podemos considerar como paradigmáticos de los cambios que ha padecido nuestra cultura hasta, finalmente, transformarse en otra. Entender la variación con la relación con el entorno que estos cambios han ocasionado puede ser leída a través de la comparación entre estos modelos de habitabilidad.

De una forma general, la diferencia básica entre ellos es la dependencia sistemática en el edificio moderno de un suministro continuo de energía, de una potencia instalada considerable en relación al edificio tradicional, que más que una diferencia cuantitativa expresa un cambio substancial en la relación con el medio y, por tanto, cultural: la independencia de las condiciones de habitabilidad interior respecto al entorno próximo mediante el recurso a unos sistemas mecánicos que necesitan recursos provenientes de entornos muy lejanos, no sólo en el espacio sino en el tiempo.

Si el edificio tradicional dispone de una estrategia de acoplamiento a las condiciones ambientales del entorno próximo, el edificio moderno pretende dispensarse de ellas hasta el punto de hacerse universal: el mismo edificio de oficinas puede levantarse en Nairobi que en Estocolmo o en Nueva Cork: es independiente de esas condiciones exteriores.

La lectura que hemos hecho para el funcionamiento general del edificio podemos rehacerla respecto a los materiales que los constituyen: independencia de las condiciones del entorno inmediato a cambio de un incremento substancial de la energía precisa para disponer de ellos.

Se aduce, frecuentemente, que el uso de esos materiales más intensivos en recursos permite aligerar el peso del edificio, con lo que se compensa el presumible mayor impacto ambiental. Aunque tal argumento es incierto puesto que no considera la ingente cantidad de residuos que los recursos minerales generan, vamos a comparar la inversión

energética necesaria para constituir los elementos constructivos de ambas habitabilidades, entendiendo que ambas son equivalentes en calidad en tanto ambientes socialmente aceptados.

Comparación de la energía invertida en las soluciones constructivas de los dos modelos de habitabilidad

VIVIENDA

**Fachada de fábrica**

LADRILLO	305 KG
POLIESTIRENO	1.3 KG
YESO	9 KG
PINTURA	0.2 KG

TOTAL 1,017 MJ/M2

**Techos de hormigón**

ACERO	7 KG
CERÁMICA	28 KG
HORMIGÓN	242 KG

TOTAL 621 MJ/M2

**Tabiques de ladrillo**

LADRILLO	60 KG
YESO	18 KG
PINTURA	0.4 KG

TOTAL 234 MJ/M2

**Cubierta de tejas**

LADRILLO	80 KG
TEJAS	30 KG
POLIETILENO	0.6 KG
POLIESTIRENO	1 KG

TOTAL 505 MJ/M2

OFICINA

**Muro cortina**

ALUMINIO	12 KG
VIDRIO	25 KG
POLIURETANO	1.4 KG
NEOPRENO	0.8 KG

TOTAL 2,589 MJ/M2

**Techos colaborantes**

ACERO	47 KG
HORMIGÓN	280 KG

TOTAL 1,825 MJ/M2

**Mamparas**

ALUMINIO	4 KG
VIDRIO	10 KG
TABLERO	4.4 KG
FIBRA DE VIDRIO	0.6 KG
NEOPRENO	0.5 KG

TOTAL 964 MJ/M2

**Cubierta de chapa**

ALUMINIO	9 KG
ACERO	11 KG
FIBRA DE VIDRIO	4.5 KG

TOTAL 1,960 MJ/M2

La tendencia hacia un mayor consumo de recursos para obtener prestaciones similares y sobre materiales cuya obtención y gestión produce una mayor apertura de ciclos, es un indicador de la tendencia hacia una mayor insostenibilidad de los sistemas técnicos con los que construimos nuestros edificios.

El retorno hacia materiales tradicionales, y más aún al tipo de estrategias de sostenibilidad que los amparaban; la eficiencia en el uso de recursos, comenzando por la cantidad de arquitectura que se precisa para resolver los programas y el uso que de esa arquitectura se hace; el reciclaje, comenzando por el de los propios edificios; el fomento de la durabilidad de los edificios y de las soluciones constructivas; son los caminos de difícil evaluación económica pero que inciden, de manera muy radical, en los planteamientos propios del ámbito de trabajo de los arquitectos.