

BENEFICIOS AMBIENTALES DEL USO DE PAJA DE CEREAL PARA MUROS EN EDIFICIOS DE LA PATAGONIA ANDINA

Alejandro D. González¹⁾, Conrado Tognetti²⁾, Simon Van den Heede²⁾

¹⁾ Instituto de Investigaciones en Biodiversidad y Medioambiente (INIBIOMA), CONICET y UNCOMA, Centro Regional Universitario Bariloche, 8400 Bariloche, Río Negro. E-mail: gonzalezad@comahue-conicet.gob.ar

²⁾ Chacra Van den Heede, Golondrinas, Lago Puelo, Chubut. E-mail: congo1981@yahoo.com ; maquinasvdh@yahoo.com.ar

RESUMEN: En este trabajo se estudia la energía necesaria y los gases de efecto invernadero (GEI) emitidos en la producción de fardos y bloques para envoltorios fabricados con paja de cereal. Este es un recurso renovable y de producción local. La fabricación de bloques es en serie, se amalgaman con arcilla, y se destinan a viviendas y otros edificios de la Patagonia Andina. El uso del bloque, en lugar de fardos, tiene por objetivo utilizar menor cantidad del recurso agrícola, cuya sustentabilidad está limitada al uso del rastrojo como cobertura. Para cubrir 100 m² de pared con fardos se necesitan 2 ha, lo que con bloques se reduce a 0,8 ha. Se hicieron inventarios de ciclo de vida para ambos materiales, y se comparan la energía incluida y los GEI emitidos con valores para ladrillos y bloques de concreto. Estos dos últimos son los más usados en la construcción convencional de la zona. Se obtuvo que tanto los fardos como los bloques de paja y arcilla requieren menor energía y menores emisiones de GEI que cualquiera de los otros materiales.

Palabras clave: Materiales de construcción, Energía, Gases de efecto invernadero, Sustentabilidad

INTRODUCCIÓN

El sector edificación es uno de los principales usuarios de energía, y por lo tanto es también un sector con importantes aportes a la emisión de gases de efecto invernadero (Rosenfeld et al., 2007). El cemento, los ladrillos, la cal, y el acero constituyen los materiales con mayor uso de energía indirecta incluida en la construcción (Venkatarama y Jagadish, 2003; Arena et al., 2002).

De acuerdo a la región geográfica del país en donde se construye, al requerimiento energético de la fabricación hay que agregar el transporte. La región de interés para este trabajo está localizada en la Patagonia Andina, entre las ciudades de Bariloche y Esquel. En cuanto a las vías de transporte, esta región se caracteriza por un acceso en carretera de montaña desde la ciudad de Piedra del Águila por la Ruta Nacional 40. No existe en la zona fabricación de cemento, cal y ladrillos. Estos materiales provienen en su mayoría de Mendoza, norte de Río Negro y Neuquén, y Buenos Aires. Las distancias a transportar se encuentran entre 500km y 2000 km, de los cuales entre 300 y 600 km corresponden a carretera de montaña, lo cual incrementa el consumo de combustible en transporte. Esta situación, entre otras, hace particularmente interesante la fabricación de materiales de construcción con recursos locales.

La región Andino Patagónica de interés en este trabajo, latitudes entre 40°S y 44°S, se caracteriza por clima frío cordillerano. Las temperaturas medias anuales oscilan entre 6°C y 9°C en los sectores más poblados, con una necesidad de calefacción entre 3000 y 5000 grado-día por año (base 18°C). A estos valores debe sumarse el efecto del viento, que por ejemplo en Bariloche tiene promedios mensuales no menores a 20 km/h (SMN, 2011). Dadas estas características, la fabricación de materiales para cerramientos debe buscar un buen índice térmico. Al presente, la mayoría de los materiales usados en envoltorios en la región Andino Patagónica no son buenos aislantes térmicos, y cuando se utiliza la madera no es habitual la inclusión de aislante en los paneles. En estudios previos, en más del 95% de las viviendas unifamiliares no se observó aislación térmica alguna (González, 2009a; 2008). Por ejemplo, dada la entrega subsidiada de líneas de gas en el noroeste de Chubut, el tipo de construcción predominante de la última década es la estructura de hormigón armado declarado en fachada, con cerramiento de ladrillos comunes, y en menor medida de bloques de concreto o de ladrillos huecos. Se observa preferencia por el hormigón declarado en fachada pintado de color verde, y los ladrillos pintados de color rojo. Los pisos son en general de cerámica sobre platea sin aislaciones térmicas. El confort en al menos 8 meses de época fría al año se logra con muy alto consumo de gas natural, el cual en la zona es altamente subsidiado (González, 2009b). Esta preferencia en la construcción local ha llevado a un parque edificación muy ineficiente, tanto en la fase operativa como en la de construcción.

Por otro lado, la región de estudio es muy apta para el cultivo de cereales de secano. En particular, el trigo, el centeno, la avena, y la cebada han sido históricamente los cultivos de mayor peso, tanto para el consumo humano directo como para la alimentación animal. Desde 1900, en la zona de Trevelin y Esquel se cultivó trigo de excelente calidad a gran escala, obteniendo premios en concursos internacionales. Existieron diversos molinos harineros, y la región fue sustentable en producción de cereales y harinas, al punto tal que en la década de 1940 comenzaron industrias fideeras. Por razones que no discutiremos en este trabajo, una decisión gubernamental de 1949 declaró zona no triguera al sur del Río Colorado (definición geográfica de Patagonia), y subsidió el trigo de la zona pampeana y litoral que a bajo precio terminó quebrando a los productores y molinos regionales del Chubut. En la actualidad existen algunos productores de cereales en la región, en su mayoría en las localidades de El Bolsón, El Hoyo, Trevelin, y Epuyén, y molinos harineros en cada localidad. El clima frío cordillerano y la humedad concentrada en la época fría favorecen el cultivo de cereales de invierno. Además, y tal vez sea la

principal ventaja de esta zona para el cultivo de cereales, las condiciones climáticas son óptimas para minimizar el uso de pesticidas. Los cereales y harinas de la zona se comercializan principalmente en un mercado restringido de productos integrales y de preferencia libres de pesticidas. La cantidad actual de cereales producidos no cubre la demanda local.

La paja de cereal es un subproducto de la producción de grano. Como veremos en detalle, tanto por su valor como mejorador de suelo como de material para construcción, este subproducto no puede considerarse un residuo. La paja de cereal enfardada tiene una conductividad cercana a $0,07 \text{ W/m}^2\text{C}$, lo que significa que con doble espesor iguala a la aislación obtenida con lana de vidrio o poliestireno expandido (Crycit, 2011; Goodhew y Griffiths, 2005). El uso del fardo de paja tradicional conduce a muros de 50 cm de espesor, que si bien presentan transmitancias óptimas para la región fría, tienen desventajas por el uso excesivo del recurso y por exigencias de diseño. En particular, la rehabilitación térmica de viviendas existentes se dificulta con espesores grandes.

En condiciones constructivas que garanticen mínima humedad de los muros y buen sellado al ataque de insectos, la paja de cereal es un material muy durable. Entonces, su uso en muros es también una forma de secuestrar dióxido de carbono atmosférico que el cultivo capturó en la fotosíntesis (Carfrae et al., 2011). El cultivo de cereal y el uso de la paja es renovable; sin embargo, como veremos, el cultivo requiere uso de recursos fósiles, y para la sustentabilidad del suelo es también importante retornar al mismo una proporción de al menos 50% de la paja (Lal, 2011; Crovetto, 1999). Entonces, las soluciones que utilizan este material que naturalmente es buen aislante térmico deben buscar el aprovechamiento del recurso en distintas formas.

En el presente trabajo se analiza la producción y características de bloques de paja y arcilla fabricados en la zona del paraje Las Golondrinas, municipalidad de Lago Puelo, Provincia de Chubut. Los bloques están constituidos por paja de cereal de producción local y arcilla de extracción local. La fabricación involucra mano de obra intensiva y el uso de una mezcladora con motor a explosión. Los bloques han sido usados con éxito en diversas viviendas unifamiliares, y está incluido su uso en el proyecto de un complejo de atención médica y Spa que está actualmente en construcción en la zona céntrica de la localidad de El Bolsón, Provincia de Río Negro. Los morteros y las terminaciones se realizan con mezclas de arcilla, arena, y paja. Las estructuras más usadas son de madera y/o de metal. En este trabajo nos concentraremos en los elementos prefabricados para el cerramiento de la envolvente, y queda para futuros estudios la inclusión de estructuras, morteros, y revoques.

DESCRIPCIÓN DE LOS FARDOS Y BLOQUES DE PAJA Y ARCILLA

Fabricación de bloques

La Figura 1a muestra el armado de los bloques de paja y arcilla. La paja de cereal se transporta en forma más eficiente como fardos, y estos se desarman en el lugar de la construcción. Se disuelve la arcilla en agua en una máquina mezcladora con motor a explosión (1,2 litros de nafta en 10 horas de trabajo), y en una lona en el suelo se mezcla la paja con la arcilla líquida hasta la consistencia apropiada. La mezcla lista se transporta a la zona de moldes en carretilla. Se arman los bloques con un molde de madera que, una vez compactada la mezcla, puede ser retirado inmediatamente y usado en el siguiente bloque. Luego los bloques se dejan secar al sol (Figura 1b). La dimensión de los bloques es de $0,50\text{m} \times 0,25\text{m} \times 0,21\text{m}$, lo que conduce a una pared terminada de 0,25 m con revoque en arena y arcilla en las dos caras. Según los operarios, el manejo de arcilla no daña las manos pero es necesario el uso de guantes por el contacto continuo con humedad y con superficies que pueden ser cortantes en la paja de cereal. Si bien el proceso usado al presente es manual y artesanal, la cantidad necesaria para la envolvente de una vivienda unifamiliar de 65 m^2 (500 bloques) se produce en 5 días con 3 personas trabajando 8 horas por día. En promedio una persona produce cerca de 35 bloques por día, y se necesitan 7 bloques por m^2 de pared. Los 500 bloques se fabrican con 4 m^3 de arcilla y 90 fardos de paja, los cuales pesan 900 kg y requieren una superficie de cultivo de 0,60 Ha en las condiciones locales que detallaremos más abajo.

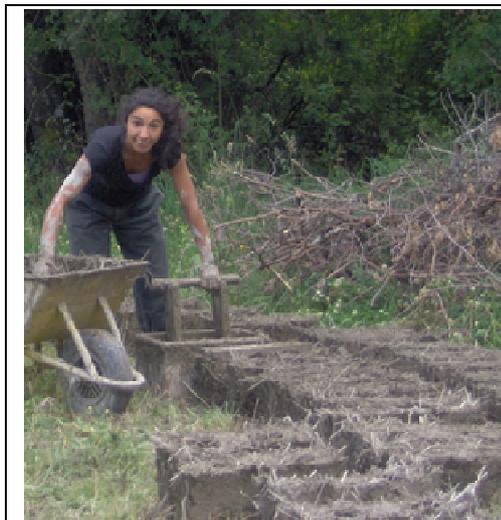


Figura 1a: fabricación de bloques en moldes



Figura 2b: secado de bloques

En la Figura 2a se muestra el detalle de la base de un muro con bloques para el cerramiento de una estructura de madera. En este caso se trató de una vivienda unifamiliar de madera que fue rehabilitada térmicamente con pared de quincha en el lado interno y con bloques de paja y arcilla en el lado externo. El mortero se realizó en arcilla y arena en una proporción 1:4, y contiene paja de cereal. La base sobre la cual se asientan los primeros bloques es de piedra bocha mediana, y se aplica aislante de poliestireno expandido de 5 cm de espesor y 40 cm de inserción vertical en la tierra para evitar el puente térmico lateral. La Figura 2b muestra el muro terminado sin revocar. Para el revoque grueso se utiliza la misma mezcla que para el mortero. El peso del muro como muestra la Figura 2b se estima en 400 kg/m^3 .



Figura 2a: rehabilitación térmica de una cabaña de madera con bloques externos, sobre base de piedra aislada con poliestireno expandido.



Figura 2b: Pared terminada lista para revocar

Al presente no se han realizado mediciones de conductividad térmica de este muro. De todos modos, se puede asumir una conductividad similar a la obtenida por Goodhew and Griffiths (2005) para bloques de paja y arcilla de características similares y densidad 440 kg/m^3 . Estos autores midieron conductividades del orden de $0,18 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Para un muro de $0,21 \text{ m}$ esto implica una transmitancia aproximada de $0,85 \text{ W/m}^2\text{C}$. Estos valores son mucho menores a los que se obtienen con muros de ladrillos comunes, de conductividad $0,9 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ y transmitancia en espesor de $0,21 \text{ m}$ de $4,3 \text{ W/m}^2\text{C}$ (Crycit, 2011). Aunque por el momento no se tengan datos precisos de las propiedades térmicas de estos bloques de paja, es posible estimar que el ahorro de energía en calefacción sea muy significativo respecto de las variantes de ladrillos y bloques de concreto más usadas actualmente en la construcción local.

En las Figuras 3a y 3b se muestran dos viviendas unifamiliares de 120 m^2 en las que se utilizaron bloques de arcilla y paja en las envolventes y en las divisiones interiores. La terminación puede realizarse en distinto tipo de revocos o en soluciones de revestimiento en seco. En las figuras 3a y 3b se muestran dos ejemplos de revoque, a la cal, y de arena y arcilla.



Figura 3a: vivienda unifamiliar con envoltente de bloques de arcilla y paja revocada con arena y cal.



Figura 3b: vivienda unifamiliar con envoltente de bloques de arcilla y paja revocada con arena y arcilla.

Cuando el cerramiento se realiza con fardos enteros se necesitan 3 fardos por m² de pared. Los fardos no necesitan preparación previa para aplicarlos en el muro. Para cubrir la superficie de pared de una vivienda unifamiliar de 65 m² y 72 m² de muro se necesitan 216 fardos. Como veremos más abajo, esta cantidad de fardos se produce en 1,44 Ha en las condiciones de cultivo locales. Nótese que esta superficie de suelo agrícola es mucho mayor a los 0,60 Ha necesarios en el caso de bloques. Sin embargo, el muro de fardos tiene una conductividad cercana a 0,07 W/m°C y con 0,45 cm de espesor una transmitancia de 0,15 W/m²°C, la cual permitiría un ahorro de energía en calefacción mayor al del caso de bloques. Sin embargo, la extracción de proporciones inadecuadas de rastrojo puede convertir el proceso en no sustentable (Lal, 2005; Crovetto, 1999). Se trata, entonces, de obtener resultados científicos que abarquen los aspectos tanto energéticos como de sustentabilidad, para identificar una elección adecuada de aislación térmica que se corresponda con la mejor utilización del recurso del cultivo de cereal y paja. En las secciones siguientes se darán los detalles de los impactos en energía y GEI para cada caso, y su comparación con los materiales de construcción convencionales que se fabrican con recursos en su mayoría no renovables.

ENERGÍA Y GEI EN PRODUCCIÓN DE FARDOS Y BLOQUES

Estimación del impacto de la mano de obra

En inventarios de ciclo de vida en donde el uso de maquinaria, combustibles e insumos industriales es predominante, puede asumirse que la mano de obra involucrada implica impactos pequeños, y por lo tanto habitualmente no se tiene en cuenta. Esto es una buena aproximación en la producción de cereal y paja, y en la fabricación de ladrillos comunes horneados (Venkatarama y Jagadish, 2003). Sin embargo, como se explicó más arriba, la producción de bloques de paja y arcilla es una actividad manual artesanal que demanda muy poca maquinaria y combustibles pero a la vez mucha mano de obra. Entonces, en este caso debemos considerar la energía y GEI implicados en la mano de obra, porque ésta puede contribuir en el mismo orden de magnitud que los materiales de bajo impacto involucrados y que el bajo insumo de combustibles usados.

En trabajos previos, otros autores estimaron la mano de obra considerando la energía per cápita total que se utiliza en el país (Pimentel, 2009). Este criterio supone que toda la energía se usa en la manutención de la capacidad de trabajo que tiene el país, y por lo tanto puede asumirse como contribuyendo a la capacidad laboral. En el caso de Argentina, para el cual una parte considerable de la energía y GEI se requieren en producciones que se exportan, el criterio anterior da resultados que pueden estar sobrevaluados. Sin embargo, puede también argumentarse que los bienes exportables son intercambiados por otros importados que contribuyen a la producción local. Entonces, a los fines de una primera estimación de la mano de obra, en este trabajo asumiremos este criterio adoptado en la literatura (Pimentel, 2009).

El consumo de energía fósil per cápita en Argentina en 2008 fue de 1,91 tep/cap.año (toneladas equivalente de petróleo), y el de electricidad de 2800 kWh/cap.año (AIE, 2010). Cada tep equivale a 41870 MJ de energía (AIE, 2005). Para adicionar las dos partes debe sustraerse de la electricidad la parte que corresponde a combustibles fósiles y que ya se incluyó en la energía primaria, lo cual es aproximadamente un 60%. Entonces resultan 230 MJ/cap.día y 9,6 MJ/cap.hora considerando 24 horas por día para distribuir la energía usada en todas las actividades humanas.

De la misma forma pueden estimarse los GEI generados en la hora de mano de obra. El total per cápita por año para Argentina es 4,36 Mg CO₂ (AIE, 2010), el cual corresponde a 11,9 kg CO₂/día y a 0,5 kg CO₂/hora.

A modo de verificación, estas estimaciones dan resultados similares a un tratamiento individual considerando una dieta de 3000 kcal/día (González, 2010), el consumo promedio para energía en el hogar en la Provincia de Chubut (Rosenfeld et al., 2007), y en transporte un estimado de 1000 L/año de diesel para una familia. Con este criterio individual el valor de energía para mano de obra resulta de 8,1 MJ/cap.hora, y las emisiones de GEI de 0,56 kg CO₂/cap.hora. Consideraremos aquí los valores dados por el criterio anterior que tiene en cuenta los consumos per cápita del país.

Producción de paja de cereal

Para los inventarios de ciclo de vida (ICV) de la producción de cereal, paja, y de bloques de paja y arcilla se usaron datos primarios de energía y GEI por unidad de combustible y fertilizantes de PICC (2006), Carlsson-Kanyama and Faist (2001), González y Carlsson-Kanyama (2007), y González (2010). El consumo de energía en transporte de carga de larga distancia es de 0,63 MJ/ton.km. Este es el dato promedio informado por Carlsson-Kanyama y Faist (2001) para transporte en Europa, y se corresponde con un consumo de combustible diesel de 0,49 L/km. Este consumo es muy similar al informado por una compañía de transporte de Bariloche (IMAZ, 2011) para camiones de 45 toneladas de peso bruto, la cual también estima una diferencia de 22% entre el consumo en la llanura (0,43 L/km) y en montaña (0,55 L/km). La Tabla 1 resume los impactos para energía y GEI de los insumos que se necesitan en los cálculos y las comparaciones posteriores.

Se analiza la producción de trigo en una extensión de 60 Ha en el paraje Las Golondrinas, Municipalidad de Lago Puelo, Chubut. La producción de cereal y paja es mecanizada usando el método de siembra directa (Aapresid, 2011), también denominado de labranza cero. Este método busca perturbar lo menos posible la estructura física y biológica del suelo, y por lo tanto no utiliza el arado. El control de malezas se realiza con herbicidas. En la Tabla 2 se muestra la necesidad de insumos por ha cultivada, el rendimiento para producción de trigo, la energía y los GEI por ha y por unidad de cosecha, así como los porcentajes de impacto de cada insumo o recurso sobre el total. La semilla proviene de los mismos productores.

Tabla 1: Energía y GEI para insumos y elementos manufacturados de acuerdo a referencias previas

	Unidad de medida	Energía / unidad	GEI / unidad	Referencias
Mano de obra	hora (h)	9,6 MJ/h	0,5 kg CO ₂ /h	Sección anterior
Diesel	Litro (L)	40 MJ/L ¹⁾	0,075 kg CO ₂ /MJ	PICC (2006)
Herbicida	kg sustancia activa	418 MJ/kg herb.	23 CO ₂ /kg herb.	Pimentel / Lal (2004)
Fertilizante N manufactura	kg N	41 MJ/kg N	7,2 kg CO ₂ /kg N ²⁾	Carlsson-Kanyama (2001) / Williams
Fertilizante N emisión en suelo	kg N		4,2 kgCO ₂ /kg N ³⁾	González y Carlsson-Kanyama (2007)
Fertilizante P manufactura	kg P	19 MJ/kg P	1,2 CO ₂ /kg P	Carlsson-Kanyama (2001) / Williams
Transporte de carga larga distancia 40 ton	ton.km	0,63 MJ/ton.km	0,047 kgCO ₂ /ton.km	Carlsson-Kanyama (2001)
Transporte de carga corta distancia 10 ton	ton.km	2,2 MJ/ton.km	0,17 kgCO ₂ /ton.km	Carlsson-Kanyama (2001) / PICC
Bloques de cemento y arena 0,2x0,2x0,4m	unidad	13,5 MJ/unidad	1,1 kgCO ₂ /unidad	Venkatarama y Jagadish (2003)
Ladrillos cocidos 0,23mx0,11mx0,07m	unidad	4,2 MJ/unidad	0,31 kgCO ₂ /unidad	Venkatarama y Jagadish (2003)

1) Incluye transporte a boca de expendio; 2) Incluye emisiones de N₂O y CH₄ en manufactura; 3) Emisiones de N₂O de suelos agrícolas fertilizados

La cosechadora de grano corta la paja a una altura regulable. Se elige cortar aproximadamente a la mitad de altura para dejar en campo una parte de la paja. Luego de la cosecha de grano se vuelve al campo con la enfardadora, que colecta la paja cortada y arma fardos, en este caso de 0,35m x 0,45m x 0,90m. La porción de paja y residuos pequeños que queda en el suelo se degrada paulatinamente, a la vez que sirve de cobertura protectora contra el calentamiento excesivo, la evaporación, las heladas, y la erosión eólica (Crovetto, 1999). En las condiciones descriptas aquí, se cosechan 150 fardos por ha, de 10 kg cada uno, constituyendo 1500 kg de paja seca cosechada, y queda en el suelo una cantidad similar. La experiencia de una década de cultivo en el mismo predio muestra que esta tasa de extracción es apropiada para la sustentabilidad del suelo en las condiciones de clima y suelo del lugar. Esta observación coincide con las estimaciones de otros autores (Lal, 2005).

Tabla 2: Energía y GEI por el uso de maquinaria e insumos en la producción de grano y paja de trigo

		Energía usada (MJ/ ha)	Porcentaje energía/ total	GEI emitidos (CO ₂ eq./ ha)	Porcentaje GEI /total
Semilla	130 kg/ha	99	3,2 %	9,1	3,0 %
Diesel: sembradora/cosechadora	5,5 hs /ha	1467	47 %	110	37 %
Herbicida	0,5 kg /ha	209	6,7 %	11,5	3,9 %
Fertilizante Nitrógeno	9 kg N /ha	369	12 %	103 ¹⁾	34 %
Fósforo	10 kg P /ha	437	14 %	28	9,2 %
Mano de obra ²⁾	13 hs/ha	125	4,0 %	6,5	2,2 %
Diesel: enfardadora	1,5 hs/ ha	400	12 %	30	9,6 %
Mano de obra fardos ³⁾	2,5 hs/ ha	24	0,8 %	1,2	0,4 %
Total por ha grano+paja		3426		314	
Producción de grano	3000 kg / ha	0,90 MJ/ kg grano ⁴⁾		0,089 kg CO ₂ /kg grano ⁴⁾	
Grano + paja	4500 kg/ha	0,70 MJ/kg grano+paja ⁵⁾		0,066 kg CO ₂ /kg grano + paja ⁵⁾	
Por cada fardo de paja de 0,35x0,45x0,90m, ⁶⁾	150 fardos /ha	7,0 MJ /fardo		0,66 kg CO ₂ /fardo	

1) incluye la emisión en suelos agrícolas (Tabla 1); 2) mano de obra desde siembra a cosecha de grano; 3) mano de obra para enfardar y levantar los fardos; 4) excluye el enfardado y supone que el 100% de rastrojo se deja en el suelo; 5) situación real con el 50% de rastrojo enfardado; 6) 10 kg de paja por fardo

En la Tabla 2 puede observarse que los principales impactos en energía corresponden al combustible (59%), seguido de los agroquímicos (32,7%), y de la mano de obra (4,8%). En cuanto a GEI la contribución más importante proviene por igual del combustible (47%) y de los agroquímicos (46,1%), seguida de la provisión de semilla (3%) y de la mano de obra (2,6%). La contribución relativa es distinta para energía y GEI porque en el suelo hay emisiones de gases que son distintos del CO₂ (González y Carlsson-Kanyama, 2007). Como se infirió más arriba, en este caso la mano de obra tiene un impacto menor. Se muestran también en la Tabla 2 los valores de energía y GEI por kg de grano y por kg de grano más paja. Los valores por kg de grano son muy similares a los obtenidos previamente por varios autores en sistemas productivos diversos (González et al., 2009).

Al considerar el grano y la paja se distribuyeron los impactos por igual en unidades de masa (4500 kg/ha de ambos), y éstos son los valores que se usarán para evaluar los bloques y los fardos como materiales de construcción en la sección siguiente. En la última fila de la Tabla 2 se resumen los impactos en energía y GEI por fardo.

Producción de bloques de paja y arcilla

En las secciones anteriores se describió la fabricación manual de bloques de paja y arcilla y su utilización para muros. La Tabla 3 muestra los detalles de insumos, mano de obra, y el resultado de la energía y GEI por bloque. Para la fabricación de 840 bloques de 0,50mx0,21mx0,25m se necesitan 1500 kg de paja (extracción de 1 ha), 4000 kg de arcilla, 8,4 litros de nafta, y 202 horas de trabajo. Para la fabricación de bloques los operarios reciben los mismos fardos armados que también pueden ser usados en cerramientos, lo cual se debe a la conveniencia de la logística de almacenamiento y transporte. Se considera que la arcilla se transporta 40 km desde la zona rural de El Hoyo y los fardos una distancia de 20 km, ambos en camiones medianos de transporte local de carga máxima 10 ton.

Tabla 3: Insumos e impactos en la fabricación de bloques de paja y arcilla

	Insumos para 840 bloques	Energía (MJ)	Porcentaje del total energía	GEI (kg CO ₂)	Porcentaje del total GEI
Paja de cereal	1500 kg	1109	29 %	105	40 %
Arcilla, transporte	4000 kg	352	9,2 %	27	10 %
Nafta	8,4 L	412	11 %	29	11 %
Mano de obra	202 hs	1933	51 %	100	38 %
	Total	3806		261	
Por cada bloque de paja y arcilla		4,53 MJ / bloque		0,31 kg CO ₂ / bloque	

En este caso se obtiene que, en energía usada la mano de obra genera el impacto principal, seguido de la provisión de paja de cereal; mientras que en emisiones de GEI el peso es el mismo para la mano de obra y la provisión de paja. El insumo de la nafta usada en la mezcladora contribuye en forma similar a la arcilla, para la cual sólo se consideró el impacto del transporte. Al presente no disponemos de datos sobre la hora-máquina necesaria para cargar un camión de arcilla, pero puede asumirse un impacto mucho menor al del transporte porque el cargador es utilizado en diversas tareas de la cantera. En un análisis completo de sustentabilidad, que escapa a los alcances de este trabajo, debería considerarse que la arcilla no es un recurso renovable. De esta disponibilidad dependerá el desarrollo futuro de muchas técnicas de construcción de bajo impacto que la utilizan como material aglutinante.

Comparación de impactos entre ladrillos, bloques de concreto, fardos y bloques de paja

En las Tablas 1, 2 y 3 se resumieron los valores de energía y GEI para ladrillos comunes, bloques de cemento y arena, fardos de paja, y bloques de paja y arcilla. Como por el momento no disponemos de datos de producción regional para ladrillos comunes y bloques de cemento, en la comparación usaremos los valores que informan Venkatarama y Jagadish (2003), los cuales se refieren al material puesto en el lugar de producción. La mayoría de los ladrillos que se usan en la región de estudio del presente trabajo provienen del valle del Río Negro, de localidades entre Cipolletti y Río Colorado. Por lo tanto, se transportan entre 700 km y 1000 km. Consideramos para la comparación siguiente 700 km de transporte que se reparte igualmente en tramos de llanura y montaña, lo que agrega por cada ladrillo una energía de 1,4 MJ y emisión de GEI de 0,10 kg CO₂/ladrillo. Los bloques de cemento y arena son de producción local, y entonces al dato de Venkatarama y Jagadish (2003) se agrega el transporte de cemento desde 700 km en el 10% de peso del bloque. En la Tabla 4 se comparan estos materiales teniendo en cuenta la cantidad necesaria por m² de pared. Para ladrillos y bloques se considera una pared de 0,20m de espesor, y en fardos de 0,45 m. En todos los casos no se incluyen morteros ni revoques, es decir, se considera la cantidad de material necesaria de ladrillos o bloques para realizar 1 m² de pared.

Tabla 4: Características de ladrillos comunes, bloques de concreto, bloques de paja, y fardos.

	Cantidad por m ² de pared	Peso por m ² sin mortero (kg)	Conductividad térmica (W/m°C)	Energía incluida /m ² (MJ/m ²)	Emisiones de GEI /m ² (kg CO ₂ /m ²)
Ladrillos comunes	85	270	0,90 ¹⁾	481 ²⁾	38
Bloque de concreto	10	135	0,64 ¹⁾	141 ³⁾	11
Bloques de paja y arcilla	7	46	0,18 ⁴⁾	32	2,2
Fardos	3	30	0,07 ⁴⁾	21	2,0

1) Crycit (2011); 2) con transporte de 700 km; 3) con transporte de 700 km en 10% del peso en cemento; 4) Goodhew y Griffiths (2005)

Por unidad de cerramiento, las dos soluciones que utilizan paja de cereal tienen valores de energía usada y GEI emitidos mucho menores a los correspondientes a ladrillos horneados y bloques de concreto. Esto determina que el impacto en la etapa de construcción será menor cuando se utilizan estos materiales locales. Sin embargo, dadas las mejores prestaciones en conductividad térmica, también en la etapa operativa del edificio los fardos y bloques de paja contribuirán significativamente a la reducción de impactos con respecto a las soluciones más usadas en la construcción actual en la región. Es interesante notar que los mayores impactos tanto en ladrillos como en bloques de concreto se deben al uso de combustibles fósiles, en horneado, elaboración de cemento, y transporte.

SUSTENTABILIDAD DEL SUELO Y CAPTURA DE CARBONO

Como se mencionó, la devolución al suelo de una parte significativa del rastrojo es esencial para mantener el contenido de materia orgánica y la fertilidad. En el caso estudiado aquí los productores han observado estabilidad o mejora del suelo en los últimos 10 años. Esta conclusión concuerda con trabajos de otros autores (Lal, 2011 y 2005; Crovetto, 1999). Por otro lado, una contribución importante a la materia orgánica del suelo lo constituyen las raíces. Un estudio detallado que tomó 54 años

de observaciones en la escuela agronómica de Uppsala, Suecia, llegó a la conclusión de que las raíces de los cereales aportan tanta o más materia orgánica al suelo como el rastrojo (Kätterer et al., 2011). Entonces, es importante que el corte de la paja sea aéreo y no extraiga la raíz del suelo. Esta es la forma en que se cosecha el 50% de la paja para fardos estudiada en este trabajo. Otros autores recomiendan que no menos del 70% de la materia orgánica debe dejarse en el suelo para la sustentabilidad (Lal, 2005). Aquí se considera el uso del 50% de la parte aérea del rastrojo, por lo cual, si se agregan las raíces es probable que se esté dentro de la generalidad de las recomendaciones. Esto está de acuerdo con las observaciones de los productores.

La cantidad de paja extraída está relacionada con el método de cultivo en siembra directa. En sistemas de producción con labranza del suelo hay mayor liberación de C por la degradación acelerada de la materia orgánica. Por lo tanto, en sistemas donde intervenga la labranza la necesidad de rastrojo es tal que para mantener un balance positivo de C en el suelo no se debería extraer la paja, ni para fines constructivos ni para cualquier otro fin. En esta zona de estudio se ha observado que en tres años continuos de labranza los suelos sufren degradación significativa, y los cuadros con cereales en labranza han tenido que dejarse en pastura. Para mantenerlos en producción se necesitaría el uso intensivo de fertilizantes, y por la pérdida de humedad en la labranza del suelo también se haría necesario el riego. El sistema de siembra directa empleado conduce a rendimientos razonables con mínimo uso de fertilizantes, sin riego, y con la posibilidad de extraer 50% del rastrojo.

En la comparación con ladrillos de la Tabla 4 no se incluyó la captura atmosférica de CO₂ que hace la planta en fotosíntesis. Parte de esta captura se almacenaría en las paredes, constituyendo un sumidero de carbono atmosférico. Es muy complejo determinar esta cantidad por las variantes de cultivos, climas, suelos, fertilización, y agua. Existen algunas investigaciones de otros autores que usaremos para estimar la captura de CO₂ al usar fardos o bloques de paja en la construcción. Lal (2011) realizó una revisión bibliográfica y concluye que un cultivo capta en promedio 825 kg C/ha. Por otro lado, Aubinet et al. (2009) estudiaron la captura de carbono en 4 años, con rotación de trigo en 2 años, y papa y remolacha en los otros dos. Concluyen que la captación es del orden de 5250 kg C/ha. El valor más bajo dado por Lal (2011) se refiere a promedios de producciones, en cambio el valor de Aubinet et al. (2009) corresponde a un caso particular en Bélgica donde el rendimiento de trigo fue de 8000 kg /ha. El resultado de Aubinet et al. (2009) se puede aplicar a las condiciones locales de este trabajo normalizando a la producción de 3000 kg/ha, con lo que resulta en una captura de 1970 kg C/ha.

En la Tabla 5 se analiza la captación de carbono en fardos y bloques teniendo en cuenta el rango de valores entre 825 y 1970 kg C/ha. Estos valores corresponden al total de la captación de C debida al cultivo, lo cual debe distribuirse entre grano, paja extraída y rastrojo que queda en el suelo. Como la parte de paja que se utiliza es un cuarto de la masa total de cultivo más rastrojo, entonces la captación de los fardos por ha resulta una cuarta parte de la captación. Al rastrojo le corresponde otra cuarta parte pero que se considera devuelta en su descomposición. Al grano le corresponde la mitad de la captación de C, pero no se considera un sumidero por tener un ciclo de devolución en los procesos como alimento y residuos. El carbono captado, si no se recicla nuevamente en los procesos de degradación, queda fijado en el elemento que se extraiga. La cantidad de CO₂ mitigada se calcula con la relación molecular 32/12, con lo que se obtiene la cantidad de GEI extraídos de la atmósfera.

Tabla 5: Captación de CO₂ en 1 m² de pared de fardos y bloques según rango de valores publicado por otros autores (ver texto), emisiones netas de GEI y comparación con ladrillos y bloques de concreto

	Captación de CO ₂ por m ² pared, valores de captación Lal (2011) (kg CO ₂ /m ²)	Captación de CO ₂ por m ² pared, valores de captación Aubinet (2009) (kg CO ₂ /m ²)	Emisiones netas por m ² de pared, con valores según Lal (2011) (kg CO ₂ /m ²)	Emisiones netas por m ² de pared, con valores según Aubinet (2009) (kg CO ₂ /m ²)
Fardos	10,9	27	□ 8,9	□ 25
Bloques de paja y arcilla	4,5	11	□ 2,3	□ 9,2
Ladrillos comunes			38	38
Bloques de concreto			11	11

Al incluir el secuestro de carbono, las dos soluciones constructivas que utilizan paja de cereal resultan con emisiones netas negativas de CO₂. En la Tabla 4, sin considerar captación de CO₂, se obtuvo que las emisiones en ladrillos y bloques de concreto son mucho mayores a las de fardos y bloques de paja. En la Tabla 5 se observa que, al considerar el secuestro de carbono las diferencias son aún mayores. Un caso similar ocurre con soluciones constructivas que utilizan la madera, las emisiones netas son mucho menores que en el caso de utilizar cemento y ladrillos (Venkatarama y Jagadish, 2003). En la Tabla 5 se tiene también la diferencia entre fardos y bloques de paja. Como puede observarse en la Tabla 3, esa diferencia se debe al impacto de la mano de obra en la fabricación de los bloques, ya que los rubros combustibles y transporte son de menor importancia. Cabe recordar que los valores de energía incluida y GEI emitidos en la hora de mano de obra se calcularon con un criterio que considera toda la energía y emisiones que se producen en Argentina. Por lo tanto, es posible que los valores reales para mano de obra sean algo inferiores a los usados aquí. En trabajos futuros se dedicará el esfuerzo para establecer criterios con detalle de consumo local para evaluar con mayor precisión el impacto de la mano de obra. De todos modos, como las diferencias obtenidas en las tablas 4 y 5 son muy grandes, las comparaciones entre soluciones con paja de cereal y ladrillos y bloques de concreto seguirán la misma tendencia aun con otros valores de la incidencia de la mano de obra.

MEJORAS DEL MÉTODO Y ESTUDIOS FUTUROS

A través del estudio de caso se identificaron posibles mitigaciones en el uso de energía y emisiones de GEI:

1) hacer siembra directa sin usar agroquímicos bajaría las emisiones por uso y aplicación de herbicidas y fertilizantes, además de probables beneficios ecológicos. Esto es posible, y la forma de sustituir el herbicida es desmalezando con dispositivos mecanizados o con trabajo manual. Si bien la cantidad de fertilizante usada es muy pequeña comparada con producciones de la pampa húmeda (60 kg N/ha), puede usarse abono animal en reemplazo del fertilizante sintético. La mitigación en este caso no es completa porque el abono deriva en emisiones algo mayores de N₂O en suelos agrícolas (González y Carlsson-Kanyama, 2007). El uso de N en la proporción adecuada es importante y no debe evitarse. La fertilización contribuye a una mayor captación de CO₂ por aumento de masa vegetal aérea y raíces (Lal, 2011), y los mayores rendimientos de cosecha conducen a impactos específicos menores.

2) En experiencias futuras de fabricación de bloques pueden incorporarse reciclados excedentes de la industria maderera, y así disminuir el impacto del uso de paja de cereal. Por ejemplo, es interesante experimentar con mezclas de paja y arcilla que incluyan un porcentaje de aserrín, viruta y chipiado de ramas. Es posible que pueda reemplazarse hasta un 50% el volumen de paja en los bloques. Esta variante también tendría las ventajas de la incorporación de C capturado en fotosíntesis en la madera. Estas soluciones alternativas requieren de experimentación y observación del uso de los materiales obtenidos.

3) Pueden ensayarse formas de fabricación de bloques con pasto lignificado, en particular cortado del mismo lote donde se construiría la casa, o de la vera de los caminos cercanos. Esto evitaría el uso de fardos y el transporte local. De todos modos, es importante investigar la estabilidad del pasto porque contiene nitrógeno y puede contribuir a la degradación de la materia orgánica incorporada en la pared. Esto no ocurre con el uso de reciclados de madera, los cuales son compuestos celulósicos sin nitrógeno. Por este motivo el fardo para paredes se prefiere de paja de cereal. El estudio del uso de pasto es interesante porque puede simplificar el método, contribuir a la sustentabilidad, y generar respuestas rápidas a cerramientos eficientes.

CONCLUSIONES

Se investigó la energía usada y los gases de efecto invernadero (GEI) para la producción de fardos y bloques para construcción utilizando paja de cereal, y se los comparó con los valores de estos impactos para ladrillos y bloques de concreto. Se estudiaron además las condiciones de sustentabilidad del cultivo en la región noroeste de la Provincia de Chubut, para determinar la cantidad de paja de cereal por ha y el secuestro de carbono atmosférico que esta comprende. Se encontró que utilizando el método de siembra directa es posible extraer 1500 kg/ha de paja de cereal en la zona, y que esta cantidad no compromete las condiciones para la fertilidad del suelo. Esta cantidad de paja corresponde a 150 fardos que pueden utilizarse para cubrir 21 m² de pared. Mientras que, a través de la fabricación de bloques de paja y arcilla, con la misma cantidad de paja de 1 ha es posible manufacturar 840 bloques para cubrir 120 m² de pared.

Los fardos tienen espesor cercano al doble que los bloques y una transmitancia térmica mucho menor, lo cual conduce a uso de energía operativa menor en los edificios. Sin embargo, los bloques elaborados con paja y arcilla tienen transmitancias entre 3 y 4 veces inferiores a los bloques de concreto y a los ladrillos, y constituyen una solución intermedia entre la mejora térmica y la sustentabilidad en la obtención del elemento constructivo. Para su elaboración, los fardos y bloques de paja y arcilla requieren de 21 MJ y 31 MJ respectivamente por m² de pared, y resultan en emisiones de GEI de 2,0 y 2,2 kg CO₂/m² de pared respectivamente. Estos valores son mucho menores a los que corresponden a ladrillos macizos (481 MJ/m² y 38 kg CO₂/m²) y a bloques de concreto (141 MJ/m² y 11 kg CO₂/m²). Cuando se considera la captura de carbono en la fotosíntesis, esta conlleva un secuestro de CO₂ entre 11 y 27 kg CO₂/m² para fardos, y de 4 a 11 kg CO₂/m² secuestrados por m² de pared de bloques de paja y arcilla. Estos valores conducen a que ambas soluciones de cerramientos que usan paja de cereal presenten emisiones negativas de GEI.

Al presente, la mayoría de las viviendas rurales y de los periurbanos de la región carecen de aislamiento térmico, necesitando entre 8 y 12 toneladas de leña por año y por vivienda unifamiliar. Como se mostró aquí, las soluciones con materiales locales pueden mejorar sustancialmente la termicidad y reducir el uso de combustibles. La generalización de este método para la utilización simultánea de los productos como alimento y elementos constructivos sería un paso importante para mejorar suelos y condiciones de vida de la población rural y periurbana.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado en parte por el proyecto PIP 114 200801 00107 del CONICET, y por una colaboración con Division of Industrial Ecology, Royal Institute of Technology, Suecia, que permitió el uso de la biblioteca electrónica de esa universidad.

REFERENCIAS

- Aapresid (2011). Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa. <http://www.aapresid.org.ar/siembradirecta.asp>
- AIE (2010). Agencia Internacional de la Energía. Key world energy statistics 2010. Acceso libre 28/6/2011 en http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2010/key_stats_2010.pdf
- AIE (2005). Agencia Internacional de la Energía. Energy statistics manual. Acceso libre el 28/6/2011 en http://www.iea.org/stats/docs/statistics_manual.pdf
- Arena A.P., Correa E.N., de Rosa C. (2002). Perfil ambiental del cemento portland producido en la región oeste Argentina, según la metodología del IPCC. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 6, 01.47-01.52

- Aubinet M., Moureaux C., Bodson B., Dufranne D., Heinesch B., Suleau M., Vancutsem F., Vilret A. (2009). Carbon sequestration by a crop over a 4-year sugar beet/winter wheat/seed potato/winter wheat rotation cycle. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 407-418
- Carfrae J., De Wilde P., Littlewood J., Goodhew S., Walker P. (2011). Development of a cost effective probe for the long term monitoring of straw bale buildings. *Building and Environment* 46, 156-164
- Carlsson-Kanyama A., Faist M., (2001). Energy use in the food sector: a data survey. FMS report. Acceso libre 28/6/2011, <http://www.infra.kth.se/fms/pdf/energyuse.pdf>
- Crovetto Lamarca C. (1999). Agricultura de conservación: el grano para el hombre, la paja para la tierra. Eumedia, Madrid.
- Crycit (2011). Cálculo de transmitancia térmica de sistemas constructivos. Libre acceso herramienta online, en <http://www.cricyt.edu.ar/lahv/pruebas/conductancia/principal.htm>
- González A.D. (2010). Contribución de la producción y transporte de alimentos al cambio climático: eficiencia calórica y proteica de distintos grupos de alimentos. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 25, 29-37
- González A.D. (2009a). Energy subsidies in Argentina lead to inequalities and low thermal efficiency. *Energies* 2, 769-788
- González A.D. (2009b). Consumo de gas en viviendas unifamiliares de Bariloche: análisis de criterios para fijar aumentos de tarifa. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 13, 7.17-7.23
- González A.D., Frostell B., Assefa G., Kutter R., Strogon L. (2009). Energía y gases de efecto invernadero en la producción de distintos grupos de alimentos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 13, 01.63-01.70
- González A.D. (2008). Aumento de eficiencia térmica en la ciudad de Bariloche: propuesta de plan de mejoras con dirección de subsidios a la inversión, y no al consumo. *AVERMA* 12, 7.57-7.64
- González A.D., Carlsson-Kanyama A. (2007). Emisiones de gases de efecto invernadero con alto potencial de calentamiento global: el sector agropecuario. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 11, 01.07-01.14
- Goodhew S., Griffiths R. (2005). Sustainable earth walls to meet the building regulation. *Energy & Buildings* 37, 451-459
- IMAZ (2011). Comunicación privada via e-mail de Transporte Imaz de Bariloche.
- Kätterer T., Bolinder M.A., Andrén O., Kirchmann H., Menichetti L. (2011). Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*
- Lal R. (2004). Carbon emission from farm operations. *Environment International* 30, 981-990
- Lal R. (2005). World crop residues production and implications of its use as a biofuel. *Environment International* 31, 575-584
- Lal R. (2011). Sequestering carbon in soils of agro-ecosystems. *Food Policy* 36, S33-S39
- PICC, (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible en <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.htm>
- Pimentel D. (2009). Energy inputs in crop production. *Energies* 2, 1-24
- SMN, 2011. Servicio Meteorológico Nacional, www.smn.gov.ar
- Rosenfeld E. et al. (2007). Ahorro de energía en el sector residencial. Su contribución a la disminución de gases de efecto invernadero. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 11, 07.31-07.38
- Venkatarama Reddy B.V., Jagadish K.S. (2003). Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. *Energy & Buildings* 35, 129-137
- Williams, A.G., Audsley, E., Sandars, D.L., (2010), "Environmental burdens of producing bread wheat, oilseed rape, and potatoes in England and Wales using simulation and system modelling", *Int. J. Life Cycle Assessment* Vol. 15, issue 1, pag. 855-868

ABSTRACT: The aim of this work is to study the energy used and the greenhouse gas (GHG) emissions associated with the production of straw bales and straw blocks intended as walling elements. The resource is renewable and the production local. The manufacturing of blocks is local, and requires the use of local clay. The blocks are currently used in one-family dwellings and in other buildings in the areas of El Bolsón and El Hoyo, in Patagonia. To wall a surface of 100 m² a production of straw of 2 ha are required, and with the use of blocks it suffices with 0,8 ha. Life cycle inventories were assessed for both elements to obtain embodied energy and GHGs, and the values were compared with fired bricks and concrete blocks reported previously. Bricks and concrete blocks are the most commonly used wall elements in the region studied. Both straw solutions, bales and blocks, presented much less embodied energy and GHGs than the other materials.

Keywords: Building materials – Energy – Greenhouse gases –Sustainability