

Artículo basado en el trabajo:

**Tardío, G., Mickovski, S. B., 2016.** Implementation of eco-engineering design into existing slope stability design practices. *J. Ecol. Eng.* **92**, 138–147.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.03.036>.

## TÍTULO: **METODOLOGÍA DE DISEÑO Y CÁLCULO DE LAS OBRAS DE BIOINGENIERÍA DEL PAISAJE**

AUTOR: Guillermo Tardío Cerrillo. Doctor Ingeniero de Montes. Asociación Española de Ingeniería del Paisaje (AEIP). [gtarcer@gmail.com](mailto:gtarcer@gmail.com)

### **RESUMEN**

Se propone una metodología de cálculo de las obras de bioingeniería del paisaje, en la que se reflejan las principales particularidades de este tipo de intervenciones. La naturaleza dinámica de las obras de bioingeniería del paisaje, sus cambios más importantes y los posibles escenarios críticos quedan recogidos en la metodología propuesta. Así mismo, las conexiones con la fase de seguimiento y las posibilidades de mejora continua se incorporan como una característica esencial del enfoque de este tipo de intervenciones.

**Palabras clave:** soluciones basadas en la naturaleza, estabilización laderas, refuerzo raíces, seguimiento obras, deterioro madera.

### **INTRODUCCIÓN**

La bioingeniería del paisaje comprende una serie de técnicas que utilizan material vegetal vivo como material de construcción, solo o combinado con materiales inertes, dentro del campo de la restauración ambiental (Schiechtl, 1980). La bioingeniería fluvial y del suelo son herramientas sostenibles para mejorar la resiliencia contra la pérdida y degradación del suelo (Schiechtl&Stern, 1996).

De acuerdo a la estrategia y filosofía de las obras de bioingeniería del paisaje, los materiales que inicialmente aportan rigidez y estabilidad a la ladera o ribera irán paulatinamente cediendo su función estabilizadora a la vegetación en desarrollo. El objetivo final perseguido es que la vegetación sea el principal y/o único agente responsable de la estabilidad y refuerzo de la zona de intervención. Los materiales biodegradables en esta última fase ya se habrán deteriorado y cumplirán exclusivamente una función de aporte de nutrientes (por ejemplo, madera deteriorada, manta orgánica deteriorada).

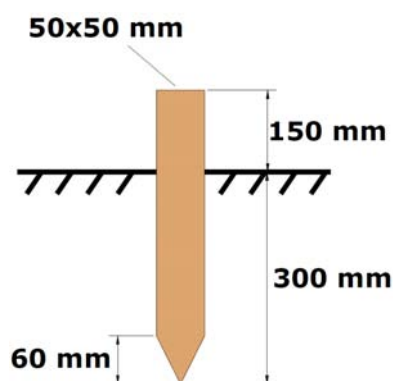
Durante la vida de servicio de una obra de bioingeniería del paisaje, los principales cambios se deben sobre todo a dos razones. Por un lado, los materiales vegetales inertes que se emplean en la obra suelen ser biodegradables (madera, troncos, mantas orgánicas, mallas orgánicas, biorrollos, etc.) con lo que sus propiedades van cambiando con el paso del tiempo (la resistencia mecánica de estos materiales disminuye). Por otro lado, la vegetación va desarrollando su parte aérea y subterránea aumentando paulatinamente sus capacidades de refuerzo y estabilización del terreno. Por tanto, incorporar y reflejar la componente temporal en el análisis y diseño de una obra de bioingeniería del paisaje permite generar metodologías de cálculo más realistas y ajustadas a este tipo de obras.

En los siguientes epígrafes se explica una metodología para incorporar las anteriores particularidades en el diseño de las obras de bioingeniería del paisaje.

## DISCUSIÓN

### Procesos de deterioro de la madera

La mejor manera de poder incorporar el avance de los procesos de deterioro de la madera es a partir de la disponibilidad de datos experimentales que podamos extrapolar a nuestra situación. Algunos organismos de investigación cuentan con datos sobre la durabilidad natural de distintos tipos de madera (por ejemplo, AITIM) y para distintas condiciones de servicio. Aparte, existen experimentos (Fig. 1) e información sobre la vida de servicio de algunas estructuras de madera expuestas a la intemperie (por ejemplo, pérgolas, postes telefónicos, vallados, etc.).



*Figura 1 Dimensiones de estacas utilizadas en experimentos para analizar los procesos de deterioro y pudrición de la madera en contacto directo con el suelo (adaptado de Leicester et al., 2003)*

En el caso de las obras de bioingeniería del paisaje, la madera está en contacto directo con el suelo y, en general, no suele estar tratada con compuestos químicos que mejoren su durabilidad. En caso de no disponer de datos experimentales o de datos disponibles en instituciones u organismos públicos o privados, un posible método para caracterizar la evolución de los procesos de deterioro de la madera es el modelo de Leicester et al (2003). Por la experiencia acumulada, este método arroja resultados conservadores lo cual permite diseños del lado de la seguridad. En este modelo, la ecuación que expresa la tasa de avance de los procesos de deterioro de la madera es la siguiente:

$$r = k_{MADERA} \cdot k_{CLIMA}$$

Donde:

$r$  = tasa de avance de los procesos de deterioro de la madera (mm/año)

$K_{MADERA}$  = coeficiente que depende del tipo de madera (albura o duramen) y la durabilidad natural de la especie arbórea de la que procede la madera.

$K_{CLIMA}$  = coeficiente que depende de la precipitación anual media y la temperatura anual media de la zona donde se vaya a utilizar la madera.

Para los anteriores coeficientes, en Leicester et al (2003), existen datos tabulados y un mayor detalle de su determinación y cálculo.

Cabe señalar que la madera de albura se deteriora más rápidamente que la de duramen debido a su mayor contenido en humedad. Dado el rango de los diámetros utilizados en las obras de bioingeniería (entre 10-30 cm), la presencia de madera juvenil será importante lo cual implica también una mayor presencia de la madera de albura. Debido a esta situación, el valor de  $r$  (mm/año) utilizado debe corresponder a la madera de albura (de esta manera, además, los resultados estarán del lado de la seguridad).

Por otro lado, los procesos de deterioro no comienzan en el momento justo de colocar la madera en obra. El tiempo transcurrido hasta que los procesos de deterioro comienzan se denomina tiempo de retardo ( $t_0$ ). En el modelo de Leicester et al (2003), el tiempo de retardo ( $t_0$ ) se estima a partir de la siguiente fórmula (Wang et al., 2007):

$$t_0 = 5.5 \cdot r^{-0.95}$$

En este método se supone que la sección no afectada por los procesos de deterioro mantiene el valor original de sus propiedades mecánicas. La pérdida de sección, desde el punto de vista mecánico, se puede calcular a partir de la estimación del valor de la parte del diámetro total afectado por los procesos de deterioro.

$$d_t = r \cdot (t - t_0)$$

$d_t$  = profundidad (parte del radio) afectada por los procesos de deterioro (mm) tras  $t$  años (tras la finalización de las obras). La parte del diámetro afectada será igual a  $2d_L$ .

A partir del valor de  $d_t$  se puede obtener la resistencia residual de la pieza a partir de (Wang et al., 2007):

$$R = \frac{\pi}{32} (D - 2d_t)^3 f_d$$

Donde  $R$  es la resistencia residual,  $D$  es el diámetro inicial del elemento de madera y  $f_d$  es el valor de resistencia a flexión (la cual depende de la especie de madera).

En este modelo se supone que la vida de servicio de la pieza de madera (como elemento estructural) se alcanza cuando la resistencia se reduce hasta el 70% de su valor inicial. De acuerdo a la anterior premisa, en el caso de una pieza de sección circular de diámetro inicial  $D$  (mm) sometida a esfuerzos de flexión, la profundidad ( $d_L$ ) de la pieza afectada por los procesos de deterioro al final de su vida de servicio será:

$$d_L = \frac{1}{2} (1 - 0.7^{1/3}) \cdot D$$

Donde:

$d_L$  = profundidad afectada por los procesos de deterioro al final de la vida de servicio de la pieza (mm)

$D$  = diámetro original de la pieza (mm)

La vida de servicio será calculada de acuerdo a (Fig. 2):

$$L = t_0 + \frac{d_L}{r}$$

Donde:

$L$  = vida de servicio de la pieza de madera (años)

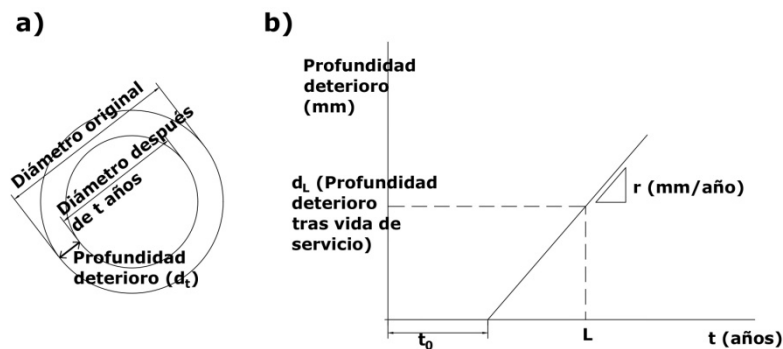


Figura 2 a) cambios en el diámetro y profundidad de deterioro; b) avance de los procesos de deterioro mostrando el significado de las variables del modelo (adaptado de Tardío&Mickovski, 2016)

El anterior modelo puede ajustarse y alcanzar niveles de mayor complejidad. Por ejemplo, se puede obtener una gráfica de la variación de la tasa de deterioro para cada tipo de madera (albura y duramen) y comprobar si la profundidad afectada tras la vida de servicio se mantiene dentro de la zona de albura o, por el contrario, entra en la zona de duramen. Como se ha comentado, dado que la madera utilizada en las obras de bioingeniería del paisaje suele contener un porcentaje alto de madera juvenil, el anterior caso es menos frecuente.

Como ya se ha comentado, el anterior modelo arroja valores conservadores en términos de diseño de la obra de bioingeniería del paisaje. En el trabajo de Tardío & Mickovski (2016) se muestra una metodología de diseño de las obras de bioingeniería del paisaje incorporando tanto los procesos de deterioro de la madera (de acuerdo al modelo de Leicester et al., 2003) como el desarrollo del material vivo utilizado. El refuerzo conseguido a partir de este último se podrá estimar a partir de los distintos métodos disponibles (e.g., Wu et al., 1979; Gray and Leiser, 1983; Schwarz et al., 2010; Tardío & Mickovski, 2015). Una explicación de estos modelos se puede encontrar en Norris et al (2008). La explicación de estos métodos excede el alcance del presente artículo.

### **Metodología de diseño incorporando el desarrollo de la vegetación y los procesos de deterioro de los materiales utilizados en la obra: el método Tardío & Mickovski.**

Una metodología realista de diseño y cálculo de una obra de bioingeniería del paisaje debe ser capaz de incluir los procesos de cambio de los materiales utilizados (vivos e inertes) a lo largo de su vida de servicio.

Existen tres momentos bien diferenciados en el funcionamiento conjunto de una obra de bioingeniería del paisaje:

FASE 1: durante la cual las labores de refuerzo y estabilización están desarrolladas principalmente por los materiales inertes (naturales y/o manufacturados) empleados en la obra.

FASE 2: durante la cual la vegetación ya ha alcanzado un cierto desarrollo, pero todavía no es capaz de desarrollar por sí sola las funciones de estabilización y refuerzo del terreno. En esta fase, los materiales inertes deben ser capaces todavía de asegurar la estabilidad global del sistema. Existe, por tanto, una colaboración en las labores de estabilización entre los materiales inertes y la vegetación en desarrollo. En esta fase, se propone que los efectos de refuerzo de la vegetación se tengan en cuenta en las comprobaciones de estabilidad externa y global pero no se tengan en cuenta en las comprobaciones de estabilidad interna. El no incluir los efectos de refuerzo en ninguna de las anteriores comprobaciones estará del lado de la seguridad, pero impedirá reflejar la evolución del papel de refuerzo de la vegetación.

FASE 3: durante la cual la vegetación es ya el principal agente estabilizador de la zona de intervención. Los materiales inertes pueden seguir desarrollando alguna función residual de refuerzo aun cuando en esta fase ya no sea necesaria.

La información necesaria para evaluar la estabilidad del sistema en cada una de las anteriores fases se indica a continuación:

Fase de la vida de servicio de la obra de bioingeniería	Información necesaria para evaluar la estabilidad del sistema
FASE 1	- Propiedades mecánicas originales de los materiales inertes (naturales y manufacturados)
FASE 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estimación de las pérdidas de resistencia mecánica de los materiales inertes utilizados.</li> <li>- Estimación de las pérdidas de sección mecánica de los elementos de madera de las estructuras de bioingeniería.</li> <li>- Estimación de posibles pérdidas de peso del conjunto suelo-estructura.</li> <li>- Estimación del crecimiento del aparato radical de la vegetación.</li> <li>- Estimación del aumento de las propiedades resistentes del terreno (estimación del valor de la cohesión adicional debida a la vegetación)</li> </ul>

FASE 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estimación del crecimiento radical de la vegetación.</li> <li>- Estimación de las nuevas propiedades resistentes del terreno (estimación del valor de la cohesión adicional debida a la vegetación)</li> </ul>
--------	---

*TABLA 1 Fases de la vida de servicio de una obra de bioingeniería y parámetros a tener en cuenta en cada una de ellas a la hora de realizar las comprobaciones de estabilidad.*

Se ha de conseguir que los materiales inertes (vegetales y manufacturados) mantengan el sistema estable hasta la Fase 3. La profundidad del aparato radical (necesaria para la estimación del refuerzo debido a la vegetación) se podrá estimar a partir de trabajos de campo (Böhm, 1979), de los modelos teóricos de distribución de raíces (Laio et al., 2006; Preti et al., 2010; Tardio et al., 2019) o a partir de la alometría y parámetros sintéticos de las distintas especies (Cornellini et al., 2008).

La anterior metodología necesita de la definición de un marco temporal que permita calcular las pérdidas de sección y las pérdidas de propiedades mecánicas de los elementos de madera (o del elemento de refuerzo que haya sido utilizado). Se propone el siguiente esquema de hitos temporales (según Tardio & Mickovski, 2016):

FASE 1: Momento 0. Momento justo después de la finalización de las obras.

FASE 2: Hitos temporales dentro de la vida de servicio (L) de los elementos de madera calculados según la metodología de Leicester et al (2003) y Tardio & Mickovski (2016). Ejemplos de este tipo de hitos de comprobación son: (L/3, 2L/3) o L/2. En el caso de utilizar otros materiales inertes de refuerzo (e.g., tierra reforzada), los hitos temporales se definirán en función de la información suministrada por los fabricantes. Las comprobaciones de estabilidad se realizarán en todos y cada uno de los hitos temporales definidos.

FASE 3: En el caso de los elementos de madera, esta fase corresponderá al momento en el que dichos elementos hayan perdido el 30% de su resistencia mecánica. Es decir, que hayan alcanzado el final de su vida de servicio (L años). En el resto de los casos corresponderá al momento en el que los distintos materiales no mantengan sus propiedades resistentes de acuerdo a la información y coeficientes de seguridad de los distintos fabricantes.

La anterior metodología (Fig. 3) aporta un marco general a la hora de estructurar el diseño de la obra de bioingeniería del paisaje por lo que se tendrá que adaptar a cada caso. En general, en el caso de las obras de estabilización y sostenimiento del terreno, asegurar la estabilidad de la zona de intervención durante los primeros 5 a 10 años será suficiente para dar porvenir a la vegetación arbustiva y arbórea.

De acuerdo al anterior esquema, las obras de contención serán calculadas como obras permanentes (no como temporales). En el caso de las obras de cubrición, con asegurar un periodo de dos a tres años se permitirá un buen desarrollo de la vegetación herbácea y/o arbustiva.



*Figura 3 Método Tardío & Mickovski. Metodología de diseño de las obras de bioingeniería incluyendo procesos de deterioro de los materiales y efectos de refuerzo de la vegetación. En el ejemplo de la figura se ha definido un hito temporal en L/2. Dentro de la FASE 2, se pueden definir otros hitos del tipo L/3 y 2L/3.*

Las comprobaciones de estabilidad interna se pueden realizar de acuerdo a Menegazzi & Palmeri (2013). Las comprobaciones de estabilidad externa y global se pueden realizar de acuerdo a Gray y Sotir (1996) o Tardio & Mickovski (2016). Los coeficientes de mayoración de fuerzas y minoración de las propiedades resistentes se realizarán de acuerdo a las distintas normativas existentes (por ejemplo, Eurocódigo 5).

A este esquema de diseño hay que añadir unas labores de mantenimiento y seguimiento que acompañen y recopilen información a lo largo de la vida de servicio de la obra (Tardio et al., 2019). La información recogida, no solo servirá para calibrar o corregir algunos aspectos que sean detectados sino también permitirá mejores diseños en las futuras obras (permitirá procesos de mejora permanente y una gestión adaptativa de la información). Ejemplos de protocolos de seguimiento de obras se pueden encontrar y descargar en <http://ecomedbio.eu/protocols> (Zaimes et al., 2019).



## CONCLUSIONES

La naturaleza dinámica de las obras de bioingeniería del paisaje debe ser reflejada e incorporada en las metodologías de diseño de este tipo de intervenciones.

Factores tales como los procesos de deterioro de los materiales biodegradables utilizados y la evolución de los efectos de refuerzo de la vegetación deben estar integrados en el cálculo de este tipo de obras.

La metodología propuesta recoge los momentos críticos y asegura un efectivo desarrollo y trasvase de las funciones estabilizadoras entre los elementos inertes y el material vivo en desarrollo. También permite reflejar la evolución del papel estabilizador de la vegetación.

Con la aplicación de la metodología propuesta se asegura dar a la vegetación el tiempo necesario para acabar transformándose en la principal fuente de estabilidad en la zona de intervención. También se posibilita la generación de procesos de mejora continua, la calibración del método y la utilización de la información generada durante la fase de seguimiento de la obra.

## BIBLIOGRAFÍA

- BÖHM, W., 1979. *Methods of Studying Root Systems*. Springer Verlag, Berlin, pp.275. Böll, A., Burri,
- CORNELINI, P.; FEDERICO, C.; PIRRERA, G., 2008. Arbusti autoctoni mediterranei per l'ingegneria naturalistica. Primo contributo alla morfometria degli apparati radicali, Azienda Regionale Foreste Demaniali Regione Siciliana, Collana Sicilia Foreste, n. 48.
- GRAY, D.H., LEISER, A.T., 1982. *Biotechnical Slope Protection and Erosion Control*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- GRAY, D.H., SOTIR, R.B., 1996. *Biotechnical and Eco-engineering Slope Stabilization*. Wiley, New York, p. 276.
- LAIO, F., D'ODORICO, P., RIDOLFI, L., 2006. An analytical model to relate the vertical root distribution to climate and soil properties. *Geophys. Res. Lett.* 33, L18401.
- LEICESTER, R. H., WANG, C-H, NGYEN, M. N., THORNTON, J. D., JOHNSON, G., GARDNER, D., FOLIENSTE, G. C., MACKENZIE, C., 2003. An engineering model for the decay in wood in ground contact. Document No IRGWP 03- 20260. International Research Group on Wood Protection, Stockholm.
- MENEGAZZI, G., & PALMERI, F., 2013. Il dimensionamento delle opere di Ingegneria Naturalistica. Direzione Infrastrutture, Ambiente e Politiche Abitative. Regione Lazio.
- NORRIS, J.E.; STOKES, A.; MICKOVSKI, S.B.; CAMMERAAT, E.; VAN BEEK, R.; NICOLL, B.C.; ACHIM, A. (Eds.) *Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions*. 2008, VI, 290 p., Hardcover. Springer.
- PRETI, F., DANI, A., LAIO, F., 2010. Root profile assessment by means of hydrological, pedological and above-ground vegetation information for bio-engineering purposes. *Ecol. Eng.* 36, 305–316. R Core Development Team, 2014. R: A

- SCHIECHTL, H.M. 1980. Bioengineering for land reclamation and conservation. Univ. of Alberta Press. Edmonton/Alberta.
- SCHIECHTL, H. M., STERN, R. 1996. Ground Bioengineering Techniques: For Slope Protection and Erosion Control. Wiley-Blackwell, ISBN 10: 0632040610, ISBN 13: 9780632040612.
- SCHWARZ, M., COHEN, D., OR, D., 2010. Root–soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles. *J. Geophys. Res.* 115
- TARDIO, G., MICKOVSKI, S.B., SANGALLI, P., 2019. Incorporating the particularities of soil and water bioengineering works into a design methodology with monitoring feedback loops. In: Proceedings of the seventh International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation (SMEC).
- TARDÍO, G., MICKOVSKI, S. B., 2016. Implementation of eco-engineering design into existing slope stability design practices. *J. Ecol. Eng.* 92, 138–147.
- TARDÍO, G., GONZÁLEZ-OLLAURI, A., MICKOVSKI, S. B., 2016. A non-invasive preferential root distribution analysis methodology from a slope stability approach. *J. Ecol. Eng.* 97, 46–57.
- TARDIO, G., MICKOVSKI, S.B., 2015. Method for synchronisation of soil and root behaviour for assessment of stability of vegetated slopes. *J. Ecol. Eng.* 82,222–230.
- TRON, S., DANI, A., LAIO, F., PRETI, F., RIDOLFI, L., 2014. Geophysical Research Abstract, Vol. 14. EGU General Assembly, pp. 2012 (EGU2012-10739).
- WANG, C. H., LEICESTER, R. H., FOLIENTE, G. C., NGUYEN, M. N., 2007. Wood service life design guide. Forest and Wood Products Australia Limited. 115 pp.
- WU, T.H., 1976. Investigation of landslides on Prince of Wales Island. Geotechnical Engineering Report 5, Civil Engineering Department, Ohio State University, Columbus, Ohio, USA.
- ZAIMES, G.N., TARDIO, G., IAKOVOGLOU, V., GIMENEZ, M., GARCIA-RODRIGUEZ, J.L., 2019. New tools and approaches to promote soil and water bioengineering in the Mediterranean. *Science of the Total Environment* 693 (2019) 133677.