

# ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΔΑΦΟΣ-ΦΥΤΟ

Στο πλαίσιο του προγράμματος:  
«Ευφυής Γεωργία και Κυκλική Βιοοικονομία – SmartBIC»



**Πακέτο Εργασίας 3:** Ανάπτυξη ολοκληρωμένων παρεμβάσεων κυκλικής οικονομίας και αξιοποίησης των υποπροϊόντων του γεωργικού και αγροβιομηχανικού τομέα

## Επιμορφωτές:

Δρ. Ιορδάνης Χατζηπαυλίδης<sup>1</sup>, Δρ. Κωνσταντίνος Οιχαλιώτης<sup>2</sup>, Δρ. Ηώ  
Κεφαλογιάννη<sup>1</sup>, Δρ. Βασιλική Τσάγκου<sup>1</sup>, Δρ. Μυρτώ Τσικνιά<sup>2</sup>, Δημήτρης Τσιγωνάκης<sup>1</sup>,  
Γιάννης Ζαφειρίου<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Εργαστήριο Γενικής & Γεωργικής Μικροβιολογίας, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

<sup>2</sup>Εργαστήριο Εδαφολογίας, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών



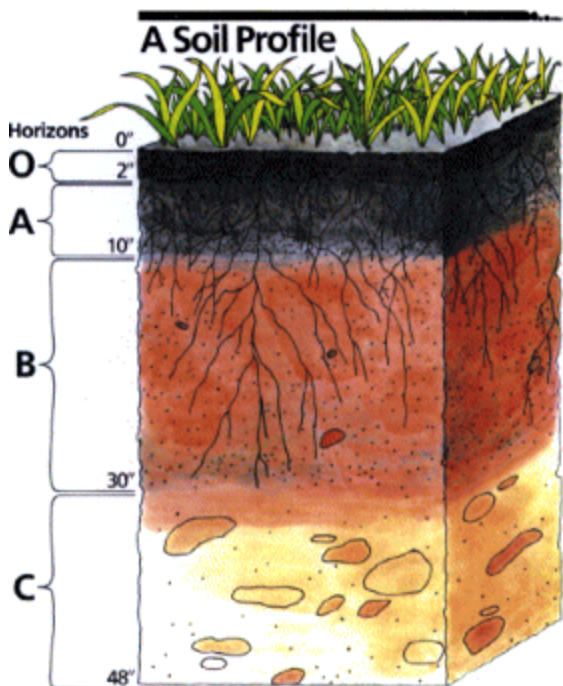
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

## ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΑΦΟΣ-ΦΥΤΟ

Οι εισροές οργανικών υλών στο έδαφος είναι κυρίως φυτικά υπολείμματα, ριζικές αποθέσεις, κοπριές και οργανικά υπολείμματα / απόβλητα που συνήθως έχουν υποστεί προ-επεξεργασία “κομποστοποίησης” (composting).

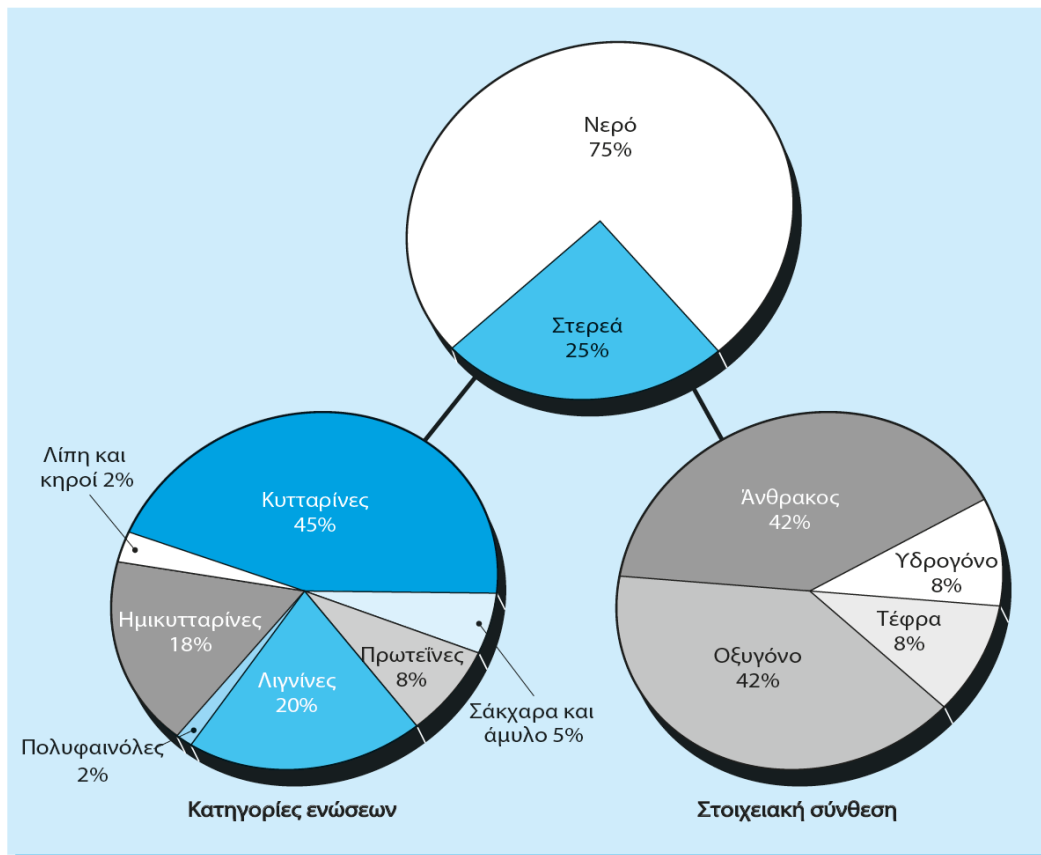
Τα φυτικά υπολείμματα και οι ριζικές αποθέσεις (ριζικές εκκρίσεις και νεκρά ριζικά κύτταρα) οδηγούν στο **σχηματισμό του οργανικού επιφανειακού εδαφικού ορίζοντα (O, A)**.

Ο ορίζοντας αυτός διαταράσσεται συστηματικά και τελικά καταστρέφεται (ταχεία αποδόμηση και οξείδωση) με τη συνεχή εδαφοκαλλιέργεια και την καύση ή απομάκρυνση των φυτικών υπολειμμάτων των καλλιεργειών.



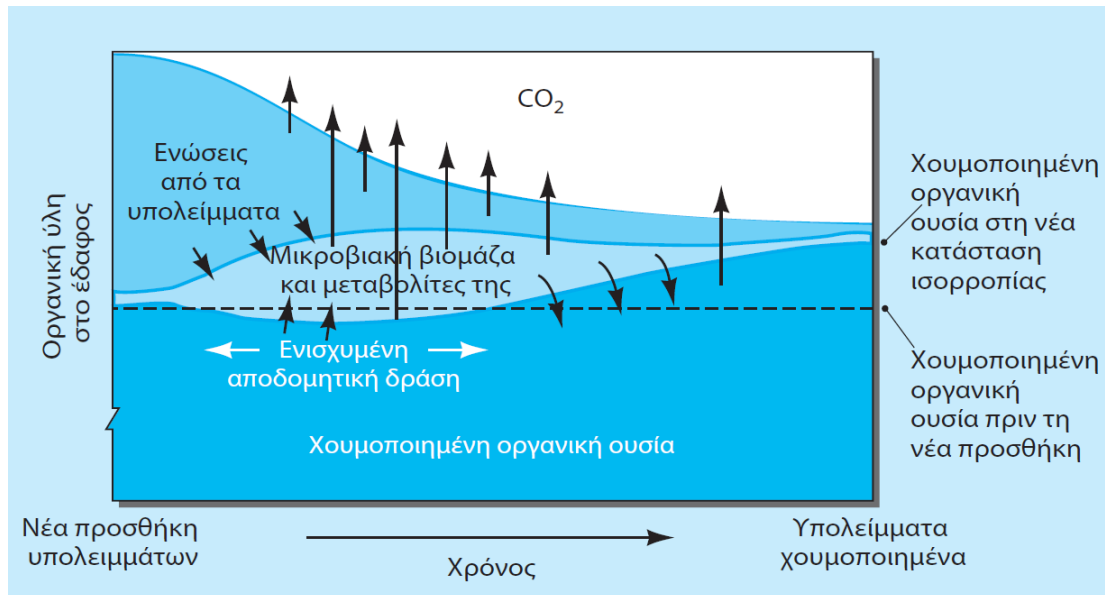
*Ο κύκλος του άνθρακα που οδηγεί στην παραγωγή και την φυσικοχημική σταθεροποίηση της οργανικής ουσίας στα εδάφη βασίζεται σε βιολογικές διαδικασίες:*

Διοξείδιο του άνθρακα → Φωτοσύνθεση → Παραγωγή ιστών → Νέκρωση ιστών → οργανικά υλικά-υποστρώματα → οργανισμοί του εδάφους → Οργανική ουσία εδάφους και απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα



**ΕΙΚΟΝΑ 12.4** Χαρακτηριστική σύνθεση αντιπροσωπευτικών φυτικών υλικών. Οι βασικοί τύποι των οργανικών ενώσεων δηλώνονται αριστερά και η στοιχειακή σύνθεση δεξιά. Η τέφρα θεωρείται ότι περιλαμβάνει όλα τα συστατικά στοιχεία πέραν των άνθρακα, οξυγόνου και υδρογόνου (άζωτο, θείο, ασβέστιο κ.λπ.). (Brady )&Weil 2013)

Η διαδικασία της βιοαποδόμησης και ο σχηματισμός του χούμου, παρουσιάζονται σχηματικά για τα φυτικά υπολείμματα στα δύο παρακάτω διάγραμματα (Brady & Weill 2011):



Το πλείστον του άνθρακα που αποδεσμεύεται κατά την αρχική, ταχεία αποδόμηση των υπολειμμάτων μετατρέπεται σε διοξείδιο του άνθρακα, ενώ μικρότερη ποσότητα άνθρακα μετατρέπεται σε μικροβιακή βιομάζα (και προϊόντα σύνθεσης) και τελικά σε εδαφικό χούμο.

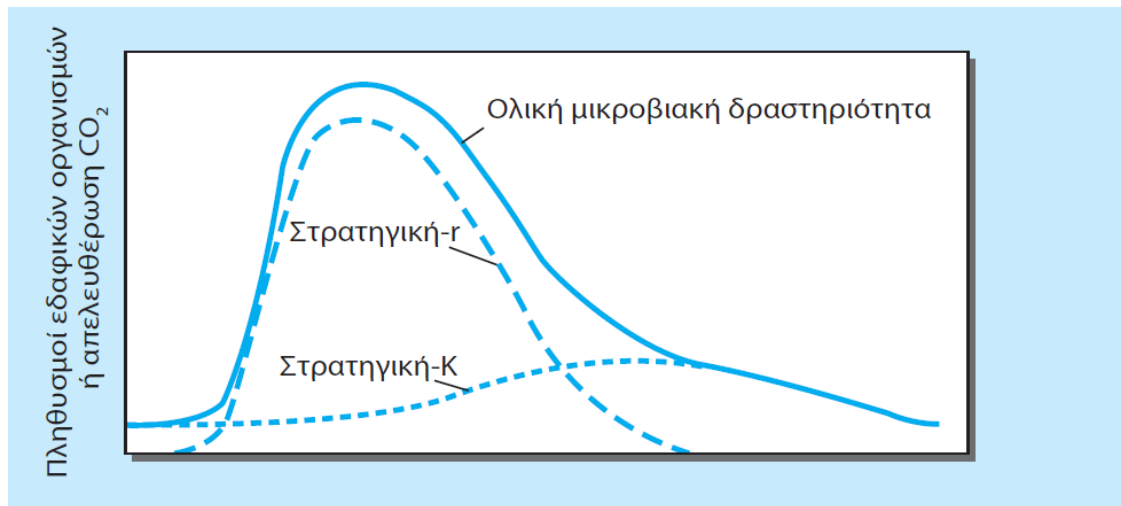
Η μεγιστοποιημένη μικροβιακή δραστηριότητα επιταχύνει και την αποδόμηση εδαφικού χούμου (πέραν των υπολειμμάτων), φαινόμενο που είναι γνωστό ως ενισχυτική δράση (priming effect). Εντούτοις, η περιεκτικότητα του εδάφους σε χούμο έχει αυξηθεί με το τέλος της διεργασίας.

Όπου η βλάστηση, το περιβάλλον και η διαχείριση παραμένουν σταθερά για μακρό χρονικό διάστημα, ο εδαφικός χούμος περιέρχεται τελικά σε κατάσταση ισορροπίας, στην οποία ο άνθρακας που προστίθεται στη «δεξαμενή» του χούμου μέσω της αποδόμησης των φυτικών υπολειμμάτων εξισορροπείται από την απώλεια άνθρακα μέσω της αποδόμησης του υπάρχοντος εδαφικού χούμου.

Στόχος της αειφορικής διαχείρισης των εδαφών είναι να μεγιστοποιήσουμε την περιεκτικότητα των εδαφών σε εδαφικό χούμο (οργανική ύλη) στην κατάσταση ισορροπίας.

Τα βέλη δηλώνουν τη μεταφορά άνθρακα από διαφορετικά τμήματα.

Ο απαιτούμενος χρόνος για τη διεργασία εξαρτάται από τη φύση των υπολειμμάτων (την ευ-αποδομησιμότητά τους) και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του εδάφους.



Το άνω σχεδιάγραμμα παρουσιάζει τη σχετική αύξηση της δραστηριότητας των μικροοργανισμών που ακολουθούν τη στρατηγική "r" ("οπορτουμιστών" που αναπαράγονται ταχέως και αποδομούν ευαποδομήσιμα οργανικά υποστρώματα), αυτών που ακολουθούν τη στρατηγική "K" (βραδέως αναπαραγόμενων και πιο εξειδικευμένων στα οργανικά υποστρώματα που αποδομούν) και τη συνολική δραστηριότητα αυτών των δύο ομάδων μικροοργανισμών.

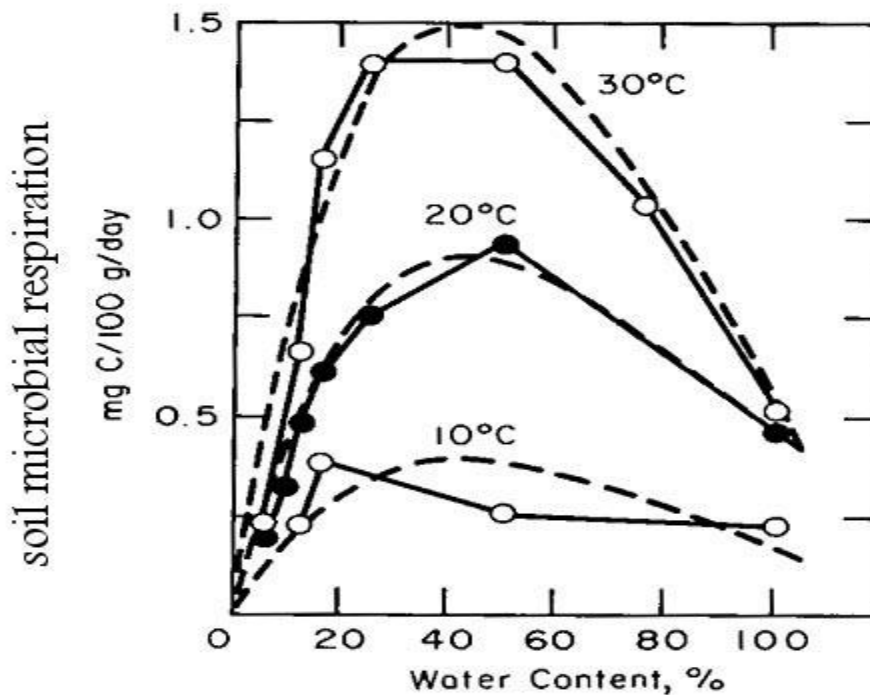
**Η διαδικασία της βιοαποδόμησης μπορεί να διαχωριστεί σε τρεις αλληλοεπικαλυπτόμενες φάσεις:**

- Τη **φάση βιοχημικής αποσύνθεσης** κατά τη νέκρωση των κυττάρων όπου παρατηρούνται φαινόμενα υδρόλυσης και οξείδωσης ενώσεων υψηλού πολυμερισμού και αυτόλυση των κυττάρων
- Τη **φάση μηχανικής αποδόμησης** όπου οι διαφοροποιημένοι οργανικοί ιστοί τεμαχίζονται, και διαχωρίζονται με το μάσημα και την πέψη από την πανίδα του εδάφους (κυρίως αρθρόποδα και γαιοσκώληκες) και αναμιγνύονται με το υπόλοιπο έδαφος
- Τη **φάση μικροβιακής αποδόμησης** όπου οι μικροοργανισμοί του εδάφους (κυρίως η ετερότροφη και σαπροφυτική εδαφική μικροχλωρίδα, αλλά και μικροοργανισμοί του πεπτικού συστήματος της πανίδας) διασπών με εξωκυτταρικά κυρίως ένζυμα σύνθετες οργανικές ενώσεις, για να καλύψουν τις ανάγκες τους σε ενέργεια και δομικό άνθρακα. Παρατηρείται **αλληλοδιαδοχή διαφορετικών ταξινομικών ομάδων μικροοργανισμών** (microbial succession) που συνήθως καθορίζει και τα διαφορετικά στάδια αποδόμησης σχετικά σύνθετων οργανικών ενώσεων στο έδαφος

Κατά τη διαδικασία αυτή (και κυρίως το τρίτο στάδιο) απελευθερώνονται θρεπτικά στοιχεία για τα φυτά (N, P, S, ιχνοστοιχεία)

### Παράγοντες που επηρεάζουν την αποδόμηση οργανικών υλικών:

1. Θερμοκρασία (βέλτιστη μεταξύ 30-50 °C)
2. Υγρασία (βέλτιστη μεταξύ 35-65% της υδατοϊκανότητας)



3. Ποιότητα-σύνθεση των οργανικών υλικών

#### Άμεσα αποδομήσιμες ενώσεις:

Απλά **σάκχαρα**, τα **οργανικά οξέα**, το **άμυλο** (περιέχει δύο πολυμερή γλυκόζης, αμυλόζη και αμυλοπηκτίνη) και οι **πρωτεΐνες**.

Όλες είναι υδατοδιαλυτές.

Πολυσακχαρίτες: απαρτίζουν περί το 75% του βάρους του ξηρού φυτικού ιστού. Είναι κυρίως κυτταρίνες και ημικυτταρίνες (15-60% και 10-30% αντίστοιχα).

Και οι δύο είναι δομικά συστατικά των κυτταρικών τοιχωμάτων.

Οι **κυτταρίνες** αποτελούνται από αλυσίδες μορίων γλυκόζης ενωμένων με β(1-4) γλυκοσιδικούς δεσμούς οι οποίες συγκρατούνται μεταξύ τους με υδρογονικούς δεσμούς.

Οι **ημικυτταρίνες** αποτελούνται από εξόζες, πεντόζες και ενίοτε πολυμερή του ουρονικού οξέος.

Οι Κυτταρίνες και οι ημικυτταρίνες δεν είναι υδατοδιαλυτές.

Ο αποπολυμερισμός τους επιτυγχάνεται με ενζυματική υδρόλυση των γλυκοσιδικών δεσμών τους.

Τα κυτταρινολυτικά ένζυμα είναι εξατομικευμένα ως προς τον τύπο γλυκοσιδικού δεσμού που διασπούν, αλλά παράγονται από μεγάλη ποικιλία μικροοργανισμών.

Η διακλάδωση πολυσακχαριτικών αλυσίδων και η διαπλοκή τους με λιγνίνες μπορεί να επιβραδύνει την αποδόμησή τους.

Υπάρχουν επίσης μικρές ποσότητες υδατοδιαλυτών, φυτικών πολυσακχαριτών, που περιέχουν μεγάλες ποσότητες πολυγαλακτουρονικού οξέος.

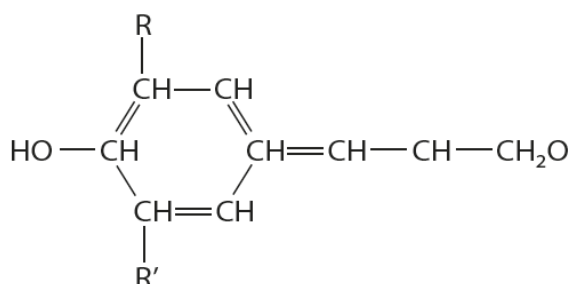
**Λιγνίνες:** είναι ετεροπολυμερή που βασίζονται στη φαινυλοπροπανοϊκή μονάδα (ο αρωματικός δακτύλιος του βενζολίου με προσθετικές ομάδες μια υδροξυλική ομάδα και ένα προπάνιο).

Είναι **αδιάλυτες στο νερό** και **ανθίστανται στην υδρόλυση**.

Είναι **πολύ ανθεκτικές στην αποδόμηση**.

**Οι μύκητες λευκής σήψης είναι οι κύριοι αποδομητές των λιγνινών.**

Όμως και οι μύκητες φαιάς σήψης μπορούν να απομακρύνουν εξωτερικές ομάδες και πλευρικές αλυσίδες από τις λιγνίνες, και ορισμένα βακτήρια μπορούν να μειώνουν το μοριακό βάρος τους.



**Οι Φαινολικές ενώσεις:** φυτικής προέλευσης (έχουν ως χαρακτηριστική ομάδα έναν αρωματικό βενζοϊκό δακτύλιο με μια πλευρική υδροξυλική ομάδα).

Σχηματίζουν πολυμερείς ενώσεις (υδρολύσιμες και συμπυκνωμένες τανίνες) είναι κυρίως υδατοδιαλυτές αλλά **αντιστέκονται στην αποδόμηση**.

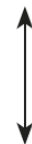
Ο κυριότερος ρόλος τους στις διαδικασίες αποδόμησης είναι ότι μπορούν να δεσμεύουν πρωτεΐνες, σχηματίζοντας σχετικά αδιάλυτες, αζωτούχες ενώσεις, ή να προστατεύουν κυτταρίνη από αποδόμηση.

Ορισμένες παρουσιάζουν και βιοτοξικές ιδιότητες.

Στα εδάφη στα οποία αποδομούνται φυτικά υπολείμματα η υδρολυτική & πρωτεολυτική ενζυμική δράση φαίνεται να μειώνεται με το χρόνο, ενώ η δράση των ενζύμων, που σχετίζεται με την αποδόμηση κυτταρίνης και λιγνινών αυξάνεται.

1. Σάκχαρα, άμυλα και απλές πρωτεΐνες
2. Πρωτεΐνες
3. Ημικυτταρίνη
4. Κυτταρίνη
5. Λίπη και κηροί
6. Λιγνίνες και φαινολικές ενώσεις

Ταχεία αποδόμηση



Πολύ βραδεία αποδόμηση









Η θερμοκρασία, η υγρασία και η ποιότητα των οργανικών φυτικών υπολειμμάτων καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τις τεράστιες διαφορές που παρατηρούνται στο ρυθμό ανακύκλωσης του άνθρακα στα διάφορα εδαφικά οικοσυστήματα του πλανήτη (Πίνακας 6.7, Paul and Clark, 1996):

TABLE 6.7 Estimated Turnover Time of Soil Carbon Based on Mean Carbon Pools and Mean Soil Respiration Rates<sup>a</sup>

<i>Vegetation type</i>	<i>Soil C</i> (t ha <sup>-1</sup> )	<i>Soil respiration</i> (t ha <sup>-1</sup> )	<i>Turnover<sup>b</sup></i> (years)
Tundra	204	0.6	490
Boreal forests	206	3.2	91
Temperate grasslands	189	4.4	61
Temperate forests	134	6.6	29
Woodlands	69	7.1	14
Cultivated lands	79	5.4	21
Desert scrub	58	2.2	37
Tropical grasslands	42	6.3	10
Tropical lowland forests	287	10.9	38
Swamps and marshes	723	2.0	520
Global total	15 × 10 <sup>8</sup>	5.0 × 10 <sup>7</sup>	32

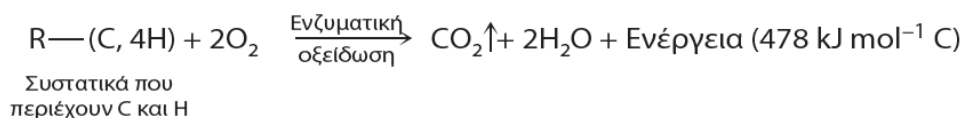
<sup>a</sup>Adapted from Raich and Schlesinger (1992).

<sup>b</sup>Turnover time is estimated based on the assumption that 30% of soil respiration is derived from root respiration.

## Αεροβική αποδόμηση

Σε ένα καλά αεριζόμενο έδαφος, όλες οι οργανικές ενώσεις που βρίσκονται στα φυτικά υπολείμματα υπόκεινται σε οξείδωση.

Καθώς το οργανικό τμήμα των φυτικών υλικών αποτελείται κυρίως από άνθρακα και υδρογόνο, η οξείδωση των οργανικών ενώσεων στο έδαφος μπορεί να παρασταθεί ως εξής:



Δείκτες ταχύτητας αεροβικής αποδόμησης:

**Η αποδόμηση οργανικών υλών με αναλογία C / N μικρότερη του 20 συνήθως οδηγεί σε καθαρή έκλυση ανόργανου N,**

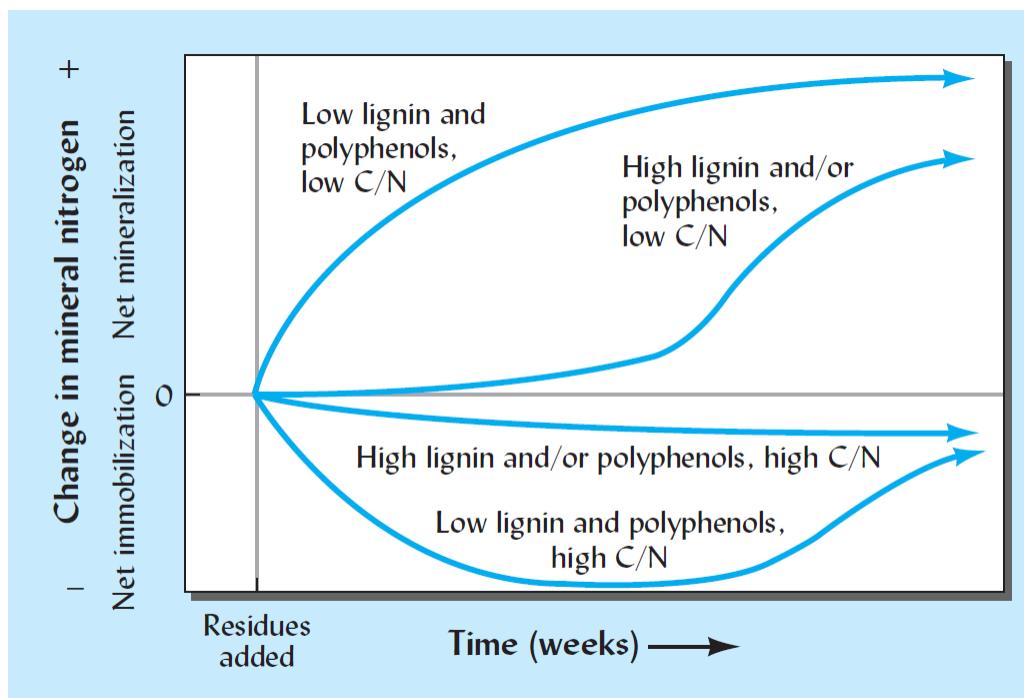
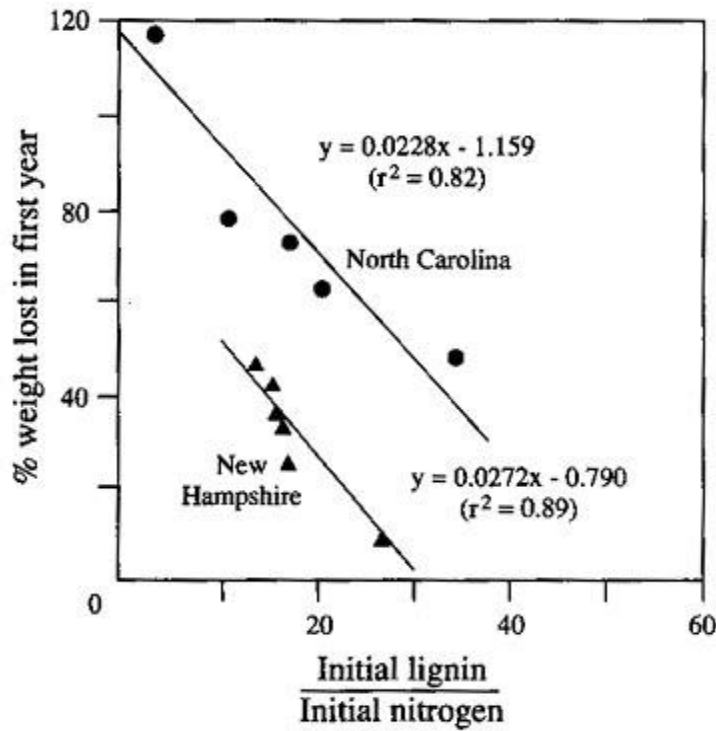
**διότι η ανοργανοποίηση N από τις αποδομούμενες ύλες θα υπερκαλύψει τις ανάγκες της αυξανόμενης μικροβιακής βιομάζας σε N.**

Αντίθετα, αποδόμηση υλών με αναλογία C / N μεγαλύτερη του 25-30 οδηγεί σε αρχική καθαρή ακινητοποίηση N (από άλλες διαθέσιμες πηγές, όπως το εδαφικό ανόργανο N ή ίσως και πιθανές λιπαντικές εισροές) για να καλυφθούν οι ανάγκες σε N της αυξανόμενης μικροβιακής βιομάζας.

**Υλικά πλούσια σε λιγνίνες αποδομούνται πολύ αργά.** Αυτό συμβαίνει όχι μόνον επειδή οι λιγνίνες είναι ιδιαίτερα ανθεκτικές στη αποδόμηση αλλά και διότι μπορεί να σχηματίζουν ένα δικτύωμα προστασίας άλλων πιο ευαποδομήσιμων μορφών C (όπως των κυτταρινών ή ακόμα και σακχάρων σχετικά μικρού μοριακού βάρους). Αργός ρυθμός αποδόμησης σημαίνει όμως αργή ανοργανοποίηση N ακόμα και αν ο λόγος C / N των φυτικών υπολειμμάτων είναι μικρός.

Συνήθως ο πλούσιος σε λιγνίνες φυτικός ιστός έχει και υψηλό λόγο C / N. Η αργή αποδόμησή του, σημαίνει και μικρές απώλειες C με τη μορφή CO<sub>2</sub>, άρα και καθυστέρηση της πτώσης αυτού του λόγου C/N σε επίπεδα που οδηγούν σε καθαρή ανοργανοποίηση N.

Η περιεκτικότητα των φυτικών ιστών σε λιγνίνες αυξάνεται κατά τη διάρκεια του βιολογικού τους κύκλου και ο λόγος C / N συνήθως αυξάνεται.



Η πορεία της αποδέσμευσης αζώτου από οργανικά υπολείμματα διαφορετικής ποιότητας βάσει του λόγου τους C/N και της περιεκτικότητάς τους σε λιγνίνη και πολυφαινόλες. Τιμές περιεκτικότητας σε λιγνίνη άνω του 20 %, σε πολυφαινόλες άνω του 3 % και λόγος C/N κάτω του 25 οδηγούν σε βραδεία μικροβιακή αποδόμηση, δέσμευση πρωτεϊνικού αζώτου, και μικροβιακή ακινητοποίηση αζώτου αντίστοιχα.



*Για κάθε οργανικό υλικό, μπορούμε να εύκολα να υπολογίσουμε τους παρακάτω δείκτες αποδόμησης:*

- **Λόγος C/N:**

Γενικός αλλά αρκετά αξιόπιστος όταν δεν αντιμετωπίζουμε ακραίες καταστάσεις στην ποιότητα του οργανικού υλικού, την σύνθεση της κοινότητας αποδομητών και τις περιβαλλοντικές συνθήκες

Δεν είναι ευαίσθητος σε ζητήματα ποιότητας και δομικής προστασίας του άνθρακα μέσα στο οργανικό υλικό.

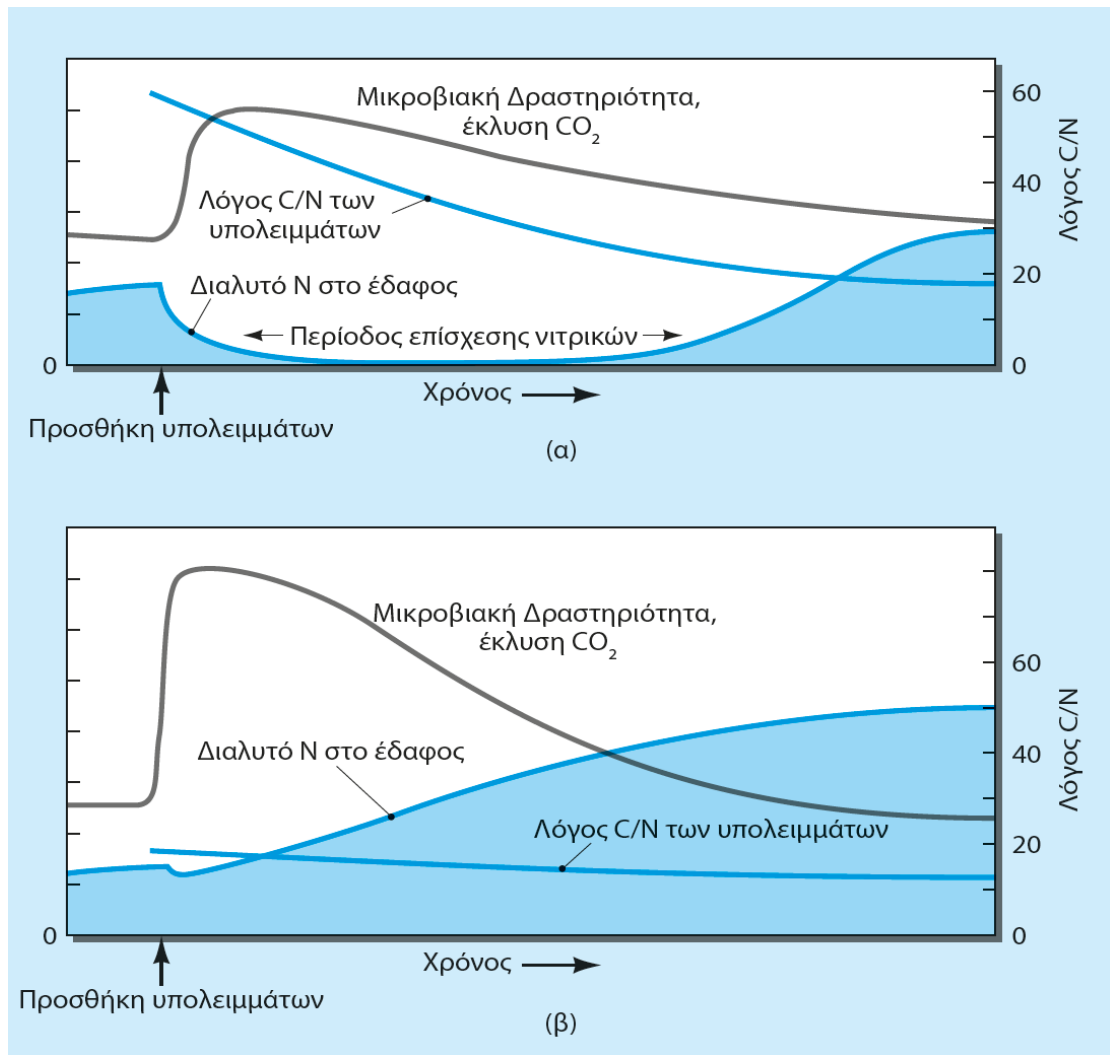
- **Λόγος C/N + % λιγνίνης:**

Ικανοποιητικός σε εύκρατα οικοσυστήματα

- **Λόγος C/N + % λιγνίνης + % πολυφαινολικών:**

Ευαίσθητος και σε τροπικά οικοσυστήματα όπου συναντώνται αρκετά φυτά πλούσια σε πολυφαινολικές ενώσεις





Οι αλλαγές στη μικροβιακή δραστηριότητα και την περιεκτικότητα του εδάφους σε διαλυτό άζωτο μετά την προσθήκη στο έδαφος οργανικών υλικών είτε υψηλού (α) είτε χαμηλού (β) λόγου C/N.

Όταν ο λόγος C/N των προστιθέμενων υπολειμμάτων υπερβαίνει το 25, τα μικρόβια που αποδομούν τα υπολείμματα πρέπει να συμπληρώσουν το άζωτο που χρειάζονται με διαλυτό άζωτο από το έδαφος. Κατά την περίοδο της ύφεσης των νιτρικών που προκύπτει, ο ανταγωνισμός μεταξύ των ανώτερων φυτών και των μικροβίων είναι αρκετά έντονος ώστε να προκαλέσει ανεπάρκεια αζώτου στα φυτά. Σημειωτέον ότι και στις δύο περιπτώσεις το διαλυτό N στο έδαφος υπερβαίνει τελικά το αρχικό του επίπεδο με την ολοκλήρωση της αποδόμησης.

## Αναεροβική αποδόμηση

Τα προϊόντα της αναεροβικής αποδόμησης περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα μερικώς οξειδωμένων οργανικών ενώσεων, όπως οργανικά οξέα, αλκοόλες και μεθάνιο.

Η αναεροβική αποδόμηση εκλύει σχετικά μικρή ποσότητα ενέργειας για τους οργανισμούς που συμμετέχουν κατά συνέπεια τα τελικά προϊόντα περιέχουν ακόμη πολλή ενέργεια (αυτός είναι ο λόγος που η αλκοόλη και το μεθάνιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα).

Μερικά από τα προϊόντα της αναεροβικής αναδίδουν δυσάρεστη οσμή ή αναστέλλουν την ανάπτυξη των φυτών. Το μεθάνιο που παράγεται σε υγρά εδάφη είναι επιπλέον σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Οι ακόλουθες αντιδράσεις είναι χαρακτηριστικές αυτών που συμβαίνουν σε υγρά εδάφη από διάφορα μεθανιογόνα βακτήρια και αρχαία:

