



Η αναπνοή της Γης, η καμπύλη Keeling και η ανθρωπογενής επιρροή

Παναγιώτης Δημ. Βλάχος

1 Εισαγωγή

Η Γη είναι ο μοναδικός πλανήτης του Ηλιακού συστήματος επί του οποίου εκδηλώνεται και αναπτύσσεται το φαινόμενο της ζωής, αυτό καταλαμβάνει τον ευρύτερο σφαιρικό χώρο της βιόσφαιρας και γίνεται αισθητό παντού με μια εκτενή πολυμορφία.

Η ύπαρξη της ζωής, η λειτουργία της και η ανάπτυξη της, στηρίζεται σε ένα πολύπλοκο και πολυποίκιλο πλαίσιο ομογενών ή ετερόκλητων παραγόντων και των παραμέτρων αυτών, οι οποίοι συντίθενται συνεκτικά και δημιουργούν τις συνθήκες του κλίματος της Γης.

Εντός του ως άνω πλαισίου, συμπεριλαμβάνεται ένα ευρύ πλήθος παραγόντων και παραμέτρων, όπως η κατάλληλη απόσταση της Γης από τον Ήλιο, η περιφορά της γύρω από αυτόν, η περιστροφή της γύρω από τον άξονα της, ο ρόλος της Σελήνης, η αλληλεπίδραση και η συγκρουσιακή σχέση των μαγνητικών πεδίων του Ήλιου και της Γης, μέσω της οποίας προκύπτει η προστασία της Γης από τις ηλεκτρομαγνητικές καταιγίδες, ενώ διασφαλίζεται παράλληλα η εισροή της κατάλληλης ενέργειας για τις ανάγκες της ζωής στο πλανήτη μας.

Εκτός των ανωτέρω, ένας επιπλέον πολύ σημαντικός παράγοντας για το κλίμα της Γης μας, ο οποίος αποτελεί και τη βασική παράμετρό της, άμεσης και αδιάλειπτης ζωτικής σχέσης με την ύπαρξη μας, είναι η ατμόσφαιρα, η οποία ως ένα σφαιρικό περίβλημα μείγματος αερίων περικλείει τον πλανήτη μας.

Μια από τις πλέον ζωτικές λειτουργίες της ατμόσφαιρας, η οποία αποτελεί το επίκεντρο του ενδιαφέροντος της παρούσης μελέτης, είναι η αναπνοή της Γης. Η εν λόγω διεργασία αποτελεί τον πλέον βασικό ρυθμιστικό θερμοκρασιακό μηχανισμό, μέσω του οποίου εξισορροπείται η λειτουργία του κλίματος της ανά ημισφαίριο.

Η αρχή της λειτουργίας του εν λόγω ρυθμιστικού θερμοκρασιακού μηχανισμού, οφείλεται στη βλάστηση και στην πτώση των φυλλωμάτων των φυλλοβόλων δένδρων κατά τη διάρκεια της θερινής και της χειμερινής περιόδου και την επενέργεια της φωτοσύνθεσης και της αποσύνθεσης αντίστοιχα.

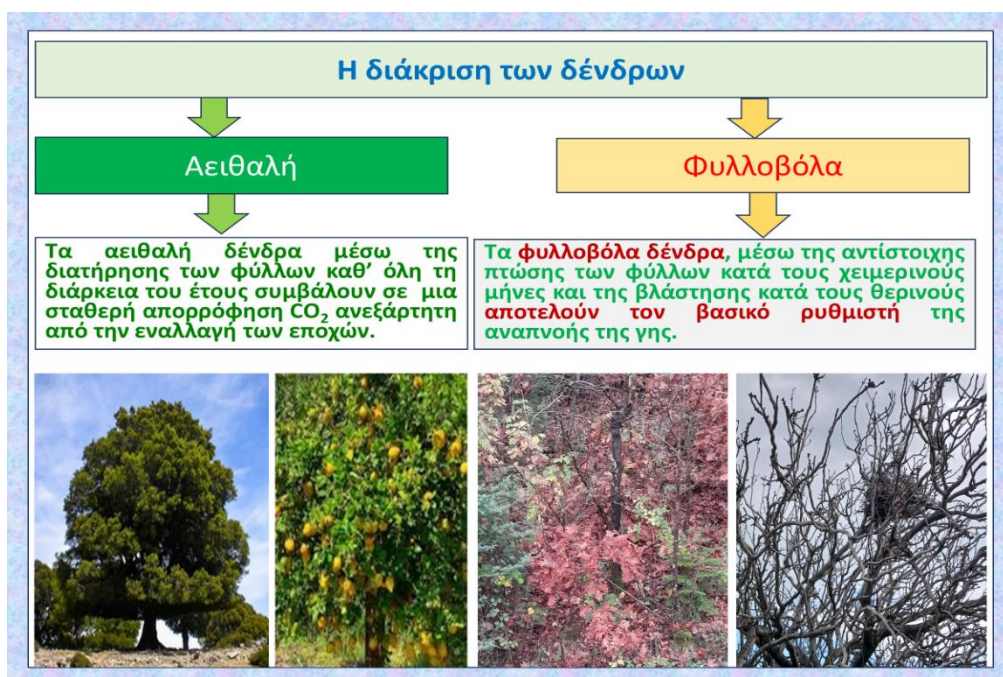
Η ως άνω ζωτική λειτουργία, η οποία λαμβάνει χώρα στη βιόσφαιρα της Γης μας, αποτελεί το θέμα του παρόντος σημειώματος.

2 Η αναπνοή της Γης μας

Περί τα μέσα του φθινοπώρου, παρατηρούμε τα φύλλα ενός μεγάλου μέρους των δένδρων να παίρνουν ένα κίτρινο χρώμα και προϊόντος του χρόνου, αρχίζουν να πέφτουν και τα κλαδιά τους να μένουν γυμνά, ενώ αντίθετα σε ένα άλλο μέρος των δένδρων τα φύλλα να παραμένουν καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Με βάση το φαινόμενο αυτό, τα δένδρα τα διακρίνουμε σε φυλλοβόλα (Deciduous trees) και αιθαλή (Evergreen trees).

Το εν λόγω φαινόμενο, θεωρείται φυσιολογικό και δεδομένο και δεν δίνουμε τη δέουσα σημασία επ' αυτού, γιατί εκ της συνήθειας το αποδεχόμαστε ως φυσιολογικό, εντούτοις, η συγκεκριμένη διεργασία αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς ρυθμιστές του θερμικού ισοζυγίου των δύο ημισφαιρίων του πλανήτη κατά την αντίστοιχη θερινή και χειμερινή περίοδο¹.



Εικόνα 1: Η διάκριση των δένδρων σε φυλλοβόλα και αιθαλή

Στην ως άνω σχηματική απεικόνιση γίνεται εμφανής η διάκριση των αιθαλών και των φυλλοβόλων δένδρων, καθώς και η αντίστοιχη περιγραφή του σημαντικού ρόλου των στη διαμόρφωση των κλιματικών συνθηκών της Γης μας. Η διατήρηση των φυλλωμάτων των αιθαλών δενδρωδών συστάδων παρέχουν την αναγκαία ανά περίοδο σταθερότητα στην απορρόφηση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), ενώ οι αντίστοιχες εναλλαγές των φυλλοβόλων συμβάλουν στην ανά περίοδο αναγκαία μεταβλητότητα.

¹ Με σκοπό την ευχερέστερη κατανόηση του ρόλου των φυλλοβόλων δένδρων και των φυλλωμάτων των στην παρούσα μελέτη, εισάγεται ο όρος της θερινής και της χειμερινής περιόδου. Οι εν λόγω περίοδοι ορίζονται από την εαρινή και τη φθινοπωρινή ισημερία.

Η έννοια της “αναπνοής της Γης” (Breathing of the Earth) ορίζεται ο ετήσιος περιοδικός κύκλος κατά τον οποίο η παγκόσμια βιόσφαιρα απορροφά-εισπνέει-και αντίθετα απελευθερώνει-εκπνέει-το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) μεταξύ της θερινής και της χειμερινής περιόδου σε κάθε ημισφαίριο.

Ο εν λόγω όρος εκφράζει τη φυσική αυξομείωση των ποσοτήτων του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) των δύο ημισφαιρίων καθώς το καθένα εναλλάσσει τις εποχές του.

Με βάση την ως άνω διεργασία, ο όρος “αναπνοή της Γης” εκφράζει την εποχική διακύμανση του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), η οποία δημιουργείται από τη βλάστηση και την πτώση των φυλλωμάτων των φυλλοβόλων δένδρων κατά τη διάρκεια της θερινής και της χειμερινής περιόδου, καθώς και με την επενέργεια της φωτοσύνθεσης και της αποσύνθεσης αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά, τα φυλλώματα των αιθαλών δένδρων, μέσω της αυξημένης απορρόφησης διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) κατά τη θερινή περίοδο και της μειωμένης κατά την χειμερινή, συμβάλλουν στη σχετική ισόρροπη διατήρηση των εισπνοών και των εκπνοών του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), μεταξύ της θερινής και της χειμερινής περιόδου, έτσι ώστε να διαμορφώνονται κατάλληλα οι συνθήκες του κλίματος, τις αντίστοιχες περιόδους.

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), όπως και όλα τα άλλα αέρια του θερμοκηπίου, έχει την ιδιότητα να επιτρέπει την εισχώρηση της θερμικής ενέργειας του Ήλιου προς τη Γη και να κατακρατεί στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, μέρος της αντανakλώμενης από την επιφάνεια της Γης θερμική ενέργεια, αποτρέποντας τη διαφυγή της προς τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας.

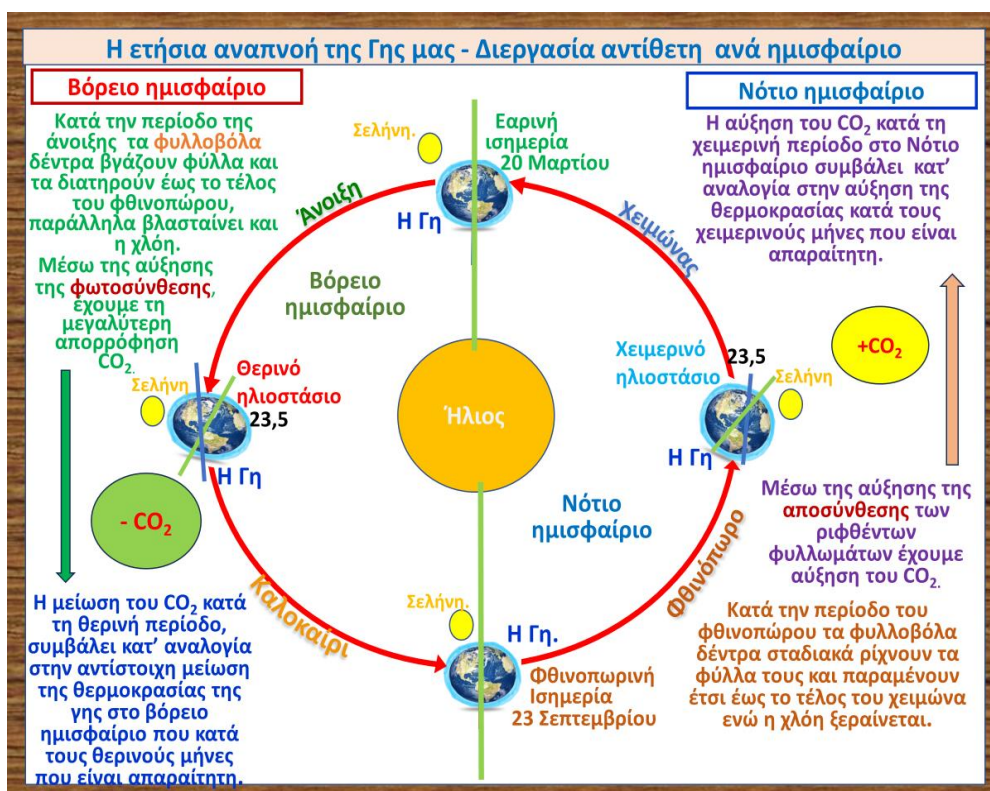
Η κατακράτηση της εν λόγω θερμικής ενέργειας προέρχεται κυρίως από την υπέρυθη ακτινοβολία του Ήλιου και ως φυσική διεργασία είναι κατάλληλα επωφελής για τη δημιουργία των γενικότερων συνθηκών του κλίματος της Γης, καθότι μέσω αυτής διαμορφώνεται η θερμοκρασία της, η οποία κατά μέσο όρο είναι στους 17°C .

Με βάση την εν λόγω ιδιότητα, το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) όταν αυτό υπάρχει στην ατμόσφαιρα στη φυσική του-κανονική-αναλογία, η διαχείριση του καθίσταται αναγκαία, ώστε η αύξηση του να συμβάλει στην αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της κρύας χειμερινής περιόδου και η αντίστοιχη μείωση του κατά τη διάρκεια της θερμής θερινής περιόδου, ώστε να συμβάλει στην αντίστοιχη μείωση της.

Η ως άνω διεργασία, η οποία αποτελεί το θεμελιώδη ρυθμιστικό μηχανισμό της κλιματικής ισορροπίας της Γης μας, γίνεται εφικτή μέσω ενός συνδυασμού πολύπλοκων, πολυμερών, συνεκτικών και συνθετικών λειτουργιών των αιθαλών και των φυλλοβόλων δένδρων αφενός, κυρίως των φυλλωμάτων αυτών, καθώς και της φωτοσύνθεσης και της αποσύνθεσης αφετέρου.

Συνεπώς, πίσω από τη συνήθη ετήσια διεργασία της πτώσης και της κατακράτησης των φυλλωμάτων των δένδρων, κρύβεται ένας άριστα δομημένος και τέλεια σχεδιασμένος ενεργειακός μηχανισμός, μέσω του οποίου εξισορροπείται κατ’ αναλογία η θερμική ισορροπία μεταξύ της θερινής και της χειμερινής περιόδου κάθε ημισφαιρίου.

Στην ακόλουθη σχηματική απεικόνιση παρουσιάζονται αναλυτικά οι εναλλακτικές ρυθμιστικές διεργασίες των αναγκαίων ανά αντίστοιχη χρονική περίοδο ποσοτήτων του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στα δύο ημισφαίρια της Γης, ανεξάρτητα το ένα από το άλλο.



Εικόνα 2: Η φωτοσύνθεση και η αποσύνθεση ανά ημισφαίριο

Στην ως άνω σχηματική απεικόνιση είναι φανερό ότι ο συνδυασμός των διεργασιών της φωτοσύνθεσης και της αποσύνθεσης της πράσινης βιομάζας, δημιουργεί μια αντίθετης μορφής ισόρροπη κανονικότητα σε ό,τι αφορά τις ποσότητες του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) κατά την εναλλαγή των εποχών, καθώς αυτές ορίζονται μέσω των ισημεριών.

Η εν λόγω αντιθέτου μορφής κανονικότητα γίνεται φανερή από την αντιστροφή των καταστάσεων των εποχών μεταξύ των δύο ημισφαιρίων καθώς διαπιστώνεται, ότι συμβαίνει το καλοκαίρι κατά τη θερμή θερινή περίοδο στο βόρειο ημισφαίριο, το αντίθετο συμβαίνει στη χειμερινή ψυχρή περίοδο του νοτίου ημισφαιρίου.

Η απώλεια του πράσινου χρώματος των φύλλων, καθώς έχει προαναφερθεί, οφείλεται στην αντίστοιχη απώλεια της χλωροφύλλης, η οποία δεν ανανεώνεται από το δένδρο με την έναρξη της χειμερινής περιόδου. Παράλληλα, η εναπομένουσα χλωροφύλλη, με την έναρξη της χειμερινής περιόδου, διασπάται σταδιακά από τα δομικά της συστατικά τα οποία απορροφώνται από το δέντρο, με σκοπό την ανακύκλωσή των.



Εικόνα 3: Η διεργασία των μεταβολών του διοξειδίου του άνθρακα(CO₂)

Με την πτώση των φύλλων των φυλλοβόλων δένδρων στο έδαφος, αρχίζει σταδιακά η αποσύνθεση της οργανικής των ύλης, η οποία συντελείται από τους μικροοργανισμούς του εδάφους, κυρίως από διαφόρους μύκητες και βακτήρια. Μέσω της ως άνω διεργασίας, μέρος του διοξειδίου του άνθρακα(CO₂) των φυλλωμάτων διαφεύγει στην ατμόσφαιρα.

Η εν λόγω διεργασία ονομάζεται εδαφική αναπνοή (Soil respiration) και διακρίνεται από την τάση εξισορρόπησης του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) μεταξύ της θερινής και της αντίστοιχης χειμερινής εποχικής περιόδου κάθε ημισφαιρίου.

Μέσω της διεργασίας αυτής, το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) υπόκειται σε έναν ατέρμονα διαχρονικό κύκλο αντίθετης φοράς ανά ημισφαίριο, αποσκοπώντας στην κατάλληλη εξισορρόπηση των θερμοκρασιών των κατά θερινή και τη χειμερινή περίοδο αντίστοιχα.

Τους θερινούς μήνες το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) απορροφάται μέσω της φωτοσύνθεσης από τα φυλλώματα των φυλλοβόλων δένδρων και παραμένει εκεί δεσμευμένο. Την περίοδο αυτή, λόγω της μείωσης του, η κατακράτηση της αντανακλώμενης ηλιακής ενέργειας, είναι μικρότερη και αντιστοίχως μικρότερη είναι και η θερμοκρασιακή της επίδραση, η οποία είναι αναγκαία κατά τους θερινούς μήνες.

Με την έναρξη της χειμερινής περιόδου, μέσω της πτώσης των φυλλωμάτων των φυλλοβόλων δένδρων, η διεργασία της φωτοσύνθεσης μειώνεται σταδιακά. Παράλληλα τα φυλλώματα των φυλλοβόλων δένδρων που έχουν πέσει στη Γη, αρχίζουν να αποσυντίθενται και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) που είχαν απορροφήσει μέσω της φωτοσύνθεσης, διαχέεται στην ατμόσφαιρα και μέσω της αύξησης των συγκεντρώσεων του, συμβάλλει στην κατακράτηση μεγαλύτερων ποσοτήτων της επανεκπεμπόμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας, συμβάλλοντας στην αύξηση της θερμοκρασίας κατά τους χειμερινούς μήνες, η οποία είναι προφανώς αναγκαία.

Κατά την ως άνω διεργασία, το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) παραμένει στην ατμόσφαιρα του αντίστοιχου ημισφαιρίου περιμένοντας την έναρξη των διεργασιών της φωτοσύνθεσης, ώστε να το απορροφήσει ξανά η αναγεννημένη βλάστηση των φυλλοβόλων δένδρων την ερχόμενη άνοιξη.

Η αντίστροφη διεργασία του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) έχει ως γενεσιουργό αρχή την αντίθετη επενέργεια της *φωτοσύνθεσης*, η οποία το απορροφά και της *αποσύνθεσης* η οποία το αποβάλλει.

Μια επί πλέον επωφελή δράση που ασκεί η πτώση των φυλλωμάτων των φυλλοβόλων δένδρων κατά τη χειμερινή περίοδο επιμερίζεται σε δύο τμήματα, τα οποία αποσκοπούν τη ρύθμιση της κατάλληλης θερμοκρασιακής ισορροπίας.

- a) Η πτώση των φυλλωμάτων των φυλλοβόλων δένδρων, διευκολύνει τις ακτίνες του Ήλιου να φτάσουν στο έδαφος, ώστε να ζεσταίνουν τόσο αυτό, όσο και τα πεσμένα φύλλα των εν λόγω δένδρων. Μέσω της διεργασίας αυτής γίνεται η προστασία των ριζικών συστημάτων των δενδρωδών συστάδων από το υπερβολικό κρύο αφενός και αφετέρου αυξάνεται σταδιακά η επιτάχυνση της αποσύνθεσης των φυλλωμάτων και ο εμπλουτισμός του έδαφος με θρεπτικά συστατικά.
- b) Στην περίπτωση των χιονισμένων περιοχών, λόγω της έλλειψης των φυλλωμάτων, οι ακτίνες του Ήλιου προσκρούουν στο χιονισμένο έδαφος το οποίο λόγω του λευκού χρώματος τις αντανακλά προς το διάστημα¹ διατηρώντας την κατάλληλη θερμοκρασία στην εν λόγω περιοχή.

Στη αντίθετη περίπτωση της θερινής περιόδου, με τη βλάστηση των φυλλοβόλων δένδρων, τα οποία εκτός της αύξησης της απορρόφησης του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) εκχέουν παράλληλα στην ατμόσφαιρα μέσω της διαπνοής μεγάλες ποσότητες υδρατμών συμβάλλοντας έτσι στη μείωση της θερμοκρασίας.

¹ Φαινόμενο αλβέδο (Albedo effect) είναι η ιδιότητα της ανακλαστικότητας μιας επιφάνειας ή ενός σώματος. Στα Ελληνικά ονομάζεται λευκαύγεια. Το εν λόγω φαινόμενο παίζει σημαντικό ρόλο στη θερμοκρασιακή ισορροπία της Γης. Ο όρος προέρχεται από το λατινικό *albus* (λευκός) και το καθιέρωσε ο Γιόχαν Χάινριχ Λάμπερτ το 1760.

3 Η ποσοτική αναλογία του διοξειδίου του άνθρακα κατά την αναπνοή της Γης μας

Η αναλογία του αριθμού των φυλλοβόλων και των αιθαλών δένδρων στα δάση, τόσο του βορείου όσο και του νοτίου ημισφαιρίου, παραμένει σχετικά σταθερή τουλάχιστον σε ετήσια βάση.

Με βάση την ως άνω αρχή, όση ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) η οποία είχε απορροφηθεί μέσω της φωτοσύνθεσης από τα φυλλώματα των φυλλοβόλων δένδρων την θερινή περίοδο, εξισορροπείται σε μεγάλο βαθμό με αυτή που διαφεύγει στην ατμόσφαιρα την χειμερινή περίοδο. Η εν λόγω ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) προέρχεται από την ίδια ποσότητα των φυλλωμάτων των φυλλοβόλων δένδρων που έπεσαν και τα οποία αποσυντιθέμενα την αποδίδουν στο βόρειο ημισφαίριο τους χειμερινούς μήνες. Επειδή η αποσύνθεση είναι μια αργή διεργασία και εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων, μεταξύ των οποίων η θερμοκρασία και η υγρασία, έρχεται την προς τούτο ως σχετική εξισορρόπηση η μειωμένη απορρόφηση διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) των αιθαλών δένδρων.

Στην ακόλουθη σχηματική απεικόνιση παρουσιάζεται το ίδιο δενδρώδες τμήμα φυλλοβόλων δένδρων μεταξύ των τεσσάρων εποχών από αυτό καθίσταται φανερή η εν λόγω προσεγγιστική ισότητα.



Εικόνα 4: Τα φυλλοβόλα δένδρα και η αναπνοή της Γης

Εκτός της συμβολής των φυλλοβόλων δένδρων στην αναπνοή της Γης τα φυλλώματα που έπεσαν προστατεύουν παράλληλα το ριζικό σύστημα των ίδιων δενδρωδών συστάδων από το κρύο της χειμερινής περιόδου και στη συνέχεια μετά την αποσύνθεση των, χρησιμεύουν ως λίπασμα για την περαιτέρω ανάπτυξη των δένδρων.

4 Η κατανομή των εδαφών και των δασών μεταξύ των δύο ημισφαιρίων

Η κατανομή τόσο των εδαφών όσο και των αντίστοιχων δασών της Γης μεταξύ των δύο ημισφαιρίων δεν είναι ισόποση.

Το βόρειο ημισφαίριο, καθώς φαίνεται και από τον παρατιθέμενο χάρτη, έχει το 68% του συνόλου του εδάφους της Γης και το 73% των δασών της. Ενώ το νότιο ημισφαίριο κατέχει το 32% του εδάφους και το 27% των δασών.



Εικόνα 5: Η κατανομή του εδάφους και των δασών μεταξύ των δύο ημισφαιρίων

Από τη σύνθεση των ως άνω ποσοστών διαφαίνεται ότι, στο νότιο ημισφαίριο η διεργασία της αναπνοής της Γης γίνεται σε μικρότερη αναλογία.

Με βάση τα ανωτέρω, ο πλανήτης μας μέσω της αρμονικής εναλλακτικής λειτουργίας των φυλλοβόλων δένδρων, εναλλάσσει επωφελώς ανά εποχή τις ποσότητες του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) κατ' αντιστροφή στα δύο ημισφαίρια της.

Μέσω της διεργασίας αυτής η Γη, κατά την περιστροφή της γύρω από τον εαυτό και κυρίως την περιφορά της γύρω από τον Ήλιο, κάνει μια ισομερή διαχείριση των ποσοτήτων του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) μεταξύ δέσμευσης μέσω της φωτοσύνθεσης και αποδέσμευσης μέσω της αποσύνθεσης και της κυτταρικής¹ αναπνοής.

Η ως άνω διεργασία, η οποία αποτελεί μέρος του κύκλου του άνθρακα αποκαλείται αναπνοή της Γης, καθότι αυτή αποτελεί την ετήσια ανανέωση της βιόσφαιράς της.

¹ Ως κυτταρική αναπνοή του δένδρου ορίζεται ο πολύπλοκος μηχανισμός μεταβολισμού του άνθρακα, μέσω του οποίου αυτό καλύπτει τις ενεργειακές του ανάγκες. Η εν λόγω διεργασία αποκαλείται αυτοτροφική αναπνοή (autotrophic respiration).

5 Η καμπύλη Keeling και η μέτρηση των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα

Οι αρχαίοι Έλληνες φιλόσοφοι, αν και είχαν ασχοληθεί με το ρόλο του αέρα, εννοώντας μέσω αυτού την ατμόσφαιρα, καθότι στην εποχή των δεν υπήρχε το πρόβλημα της ρύπανσης, ούτε ήταν γνωστή η ανάλυση του μείγματος των επί μέρους αερίων τα οποία συνθέτουν την ατμόσφαιρα, δεν έχουν κάνει καμία σχετική αναφορά για το εν λόγω θέμα.

Ο Ιπποκράτης στο βιβλίο του “Περί αέρων, υδάτων και τόπων” συσχετίζει τις νόσους των ανθρώπων με το κλίμα των περιοχών της διαμονής των και παράλληλα συνιστά στους γιατρούς της εποχής του να λαμβάνουν υπόψη τον εν λόγω παράγοντα.

Το πρόβλημα της ρύπανσης του πλανήτη, παρότι ξεκίνησε με την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης το 1750, οι πρώτοι μελετητές του φαινομένου εμφανίστηκαν τον 19^ο αιώνα, με πρωτοπόρο τον Γάλλο μαθηματικό και φυσικό Joseph Fourier ο οποίος το 1827 διατύπωσε την αρχή του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Στη συνέχεια ακολούθησε η Αμερικανίδα ακτιβίστρια και επιστήμων Eunice Newton Foote, η οποία το 1856 απέδειξε τη σχέση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και της κλιματικής αλλαγής. Τρία χρόνια μετά από την πειραματική απόδειξη της Foote, το 1859 ακολούθησε η μελέτη του Ιρλανδού φυσικού John Tyndall, ο οποίος μέσω μιας ειδικής συσκευής απέδειξε ότι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) απορροφά τη θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τη Γη μας.

Στα τέλη του 19^ο αιώνα ο Σουηδός χημικός Svante Arrhenius δημοσίευσε το 1896 την πρωτοποριακή εργασία του με τίτλο “*Σχετικά με την επίδραση του διοξειδίου του άνθρακα CO₂ της ατμόσφαιρας στη θερμοκρασία του εδάφους.*” Ενώ παράλληλα κατάρτισε ένα κλιματικό μοντέλο το οποίο προέβλεπε τη σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας της Γης, αν το διοξείδιο του άνθρακα¹ CO₂ αυξανόταν στο διπλάσιο.

Ο Svante Arrhenius είναι ο πρώτος που θεώρησε ως μοναδική αιτία της αύξησης της θερμοκρασίας της Γης τη χρήση -καύση- ορυκτών καυσίμων των παραγωγικών, καθώς και των λοιπών διεργασιών της βιομηχανικής επανάστασης.

¹Στην εποχή του Svante Arrhenius το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) αποκαλούνταν ανθρακικό οξύ. Παρατίθεται ο πλήρης τίτλος της μελέτης του. “On the influence of Carbonic Acid in the air upon the temperature of the Ground”

Οι απόψεις του Svante Arrhenius, αν και σήμερα έχουν επακριβώς επιβεβαιωθεί, στην εποχή του δεν ενέπνεαν τη δέουσα ανησυχία για τη λήψη μέτρων, καθότι στην εποχή του επικρατούσε η αντίληψη ότι το μεγαλύτερο μέρος του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) το απορροφούσαν οι ωκεανοί.

Ωστόσο, ήταν ιστορικά αναπόφευκτο η μέτρηση του εν λόγω αερίου να ξεκινήσει με πρωτοβουλία του ωκεανογράφου Ρότζερ Ρέβελ (Roger Revelle), ο οποίος μετά τη λήξη του Β' Παγκοσμίου πολέμου διέβλεψε την μεγάλη αύξηση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Η αύξηση αυτή θα προέρχονταν από την ταχύτατη ανάπτυξη της βιομηχανίας και της αντίστοιχης κάλυψης των ενεργειακών της αναγκών από τα ορυκτά καύσιμα, κυρίως το πετρέλαιο και τον άνθρακα.

Ο Ρότζερ Ρέβελ (Roger Revelle), από κοινού με τον Τσαρλς Κίλινγκ (Charles Keeling) ίδρυσαν το 1957 στο Μάουνα Λόα, την ψηλότερη κορυφή της Χαβάης, το ομώνυμο αστεροσκοπείο με σκοπό τη μέτρηση των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 6: Το αστεροσκοπείο στο Μάουνα Λόα της Χαβάης

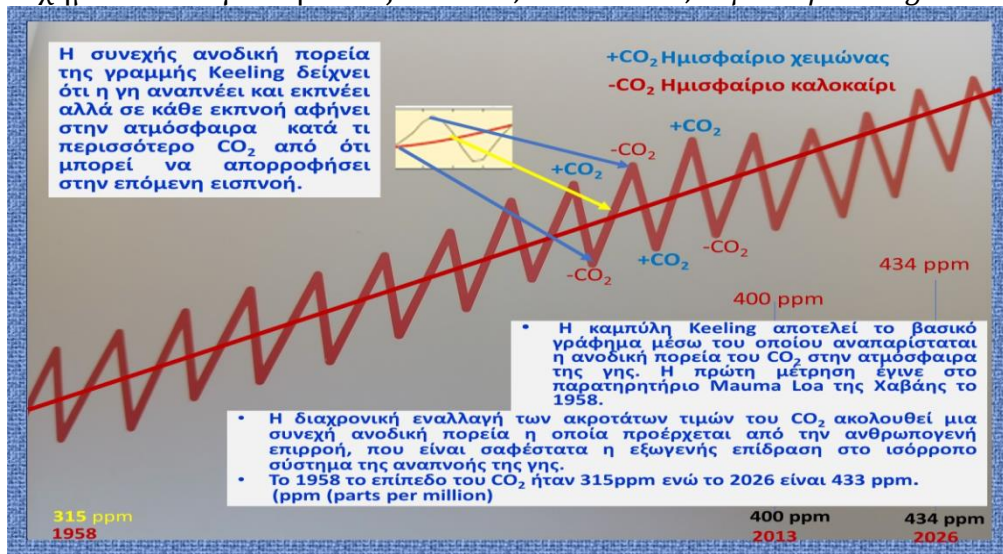
Η νήσος της Χαβάης επιλέχθηκε ως η πλέον κατάλληλη, καθότι αυτή βρίσκεται σχεδόν στο κέντρο του Ειρηνικού Ωκεανού και είναι απρόσβλητη από τις επιρροές του μείγματος της ατμόσφαιρας της, από τις εκπομπές των βιομηχανιών και των λοιπών παραγωγικών δραστηριοτήτων.

Επί πλέον το ύψος των 4.300 μέτρων του ηφαιστειογενούς βουνού Μάουνα Λόα, είναι ένα ακόμη θετικό στοιχείο, καθότι αυτό διευκολύνει τις αντίστοιχες μετρήσεις και την εκτόξευση των μετεωρολογικών αερόστατων.

6 Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο Μάουνα Λόα

Οι μετρήσεις στο Μάουνα Λόα¹ ξεκίνησαν το Μάρτιο του 1958 από τον Τσαρλς Κίλινγκ (Charles Keeling) και τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα μέσω τη γνωστής, τιμής ένεκεν, καμπύλης Keeling.

Σχήμα 1. Οι συγκεντρώσεις του CO₂, 1958–2026, καμπύλη Keeling



Source: Scripps Institution of Oceanography (2026)

Στην προηγούμενη ενότητα έγινε ανάλυση του ετήσιου εποχιακού κύκλου του ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Ο εν λόγω κύκλος παρουσιάζει μια αντίστροφη, αλλά αναγκαία επενέργεια, η οποία λαμβάνει χώρα διακριτά σε κάθε ημισφαίριο. Η ως άνω αντίστροφη επενέργεια, καθορίζεται από την δυναμική ισορροπία μεταξύ της φωτοσυνθετικής δράσης των φυλλοβόλων δένδρων κατά τη θερινή περίοδο και την αποσύνθεση των πεσμένων φυλλωμάτων των φυλλοβόλων δένδρων, η οποία μαζί με τις υπόλοιπες συναφείς δράσεις της αποσύνθεσης διαμορφώνει το σύνολο της οικοσυστημικής διαπνοής τη χειμερινή περίοδο.

1Εκτός από το παρατηρητήριο στο Μάουνα Λόα της Χαβάης, η Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας των ΗΠΑ (National Oceanic Atmospheric Administration-NOAA) έχει ακόμη τρεις αντίστοιχους σταθμούς ειδικού σκοπού.

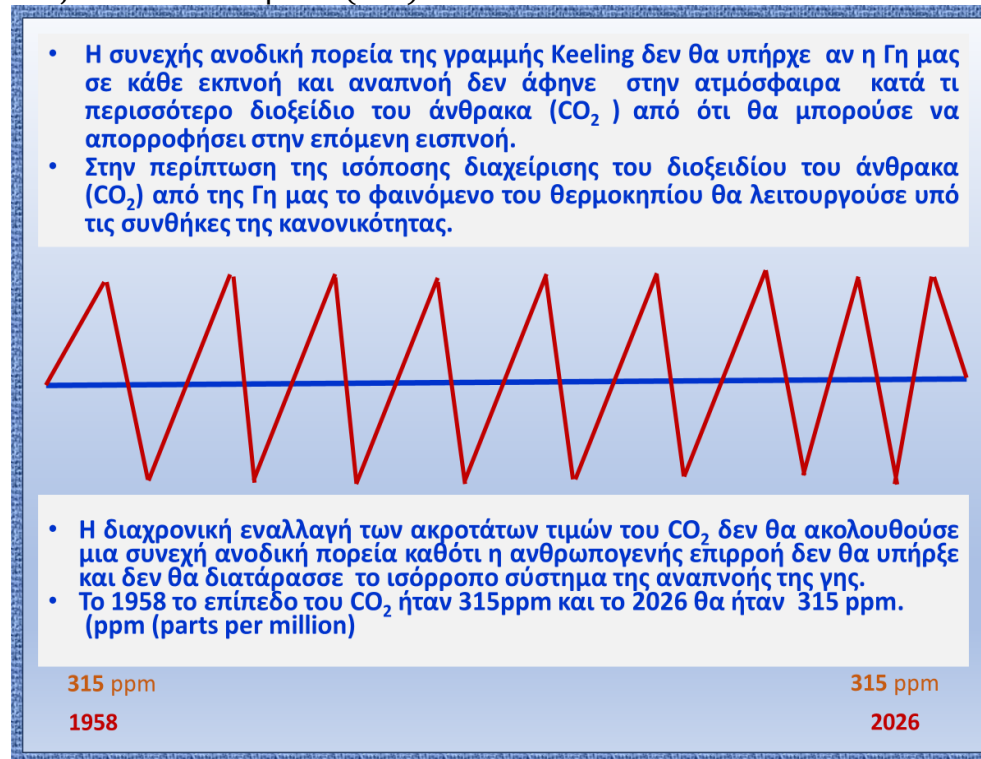
α) Στην Αλάσκα για την παρακολούθηση των εποχικών διακυμάνσεων του CO₂ του Αρκτικού κύκλου. β) Στην Αμερικανική Σαμόα του νοτίου Ειρηνικού για την παρακολούθηση της ατμόσφαιρας των τροπικών περιοχών του νοτίου ημισφαιρίου και στην Ανταρκτική -Νότιος Πόλος-για την εκτίμηση της παγκόσμιας τάσης του CO₂.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση για την παρακολούθηση των εκπομπών του CO₂ έχει: α) Το Ολοκληρωμένο Σύστημα παρακολούθησης του Άνθρακα (Integrated Carbon Observation System) το εν λόγω σύστημα αποτελείται από 170 μετεωρολογικούς σταθμούς οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι σε 16 χώρες. β) Διαθέτει επίσης το Ατμοσφαιρικό Παρατηρητήριο της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (The European Commission Atmospheric Observatory) που είναι εγκατεστημένο στην Ιταλία και γ) Την Υπηρεσία Παρακολούθησης της Ατμόσφαιρας (Copernicus Atmosphere Monitoring Service CAMS).

Με την υπόθεση ότι κατά τη διεργασία της εισπνοής και της εκπνοής της Γης, οποία αποτελεί μια αντίστροφη διαχρονική μεταβολή μεταξύ της θερινής και της χειμερινής περιόδου, οι ποσότητες του εισπνεόμενου και του εκπνεόμενου διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) ήταν ισόποσες, η διαχρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων του ανά ημισφαίριο, δεν θα είχε ανοδική τάση.

Στην περίπτωση αυτή, η μορφή της καμπύλης Keeling θα είχε τη γνωστή μορφή ζικ-ζακ, λόγω των εποχιακών εναλλαγών της φωτοσύνθεσης και της αποσύνθεσης, αλλά η διαχρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) θα έδειχνε οριζόντια σταθερή ευθύγραμμη τάση, καθώς αυτή περιγράφεται στην ακόλουθη σχηματική απεικόνιση.

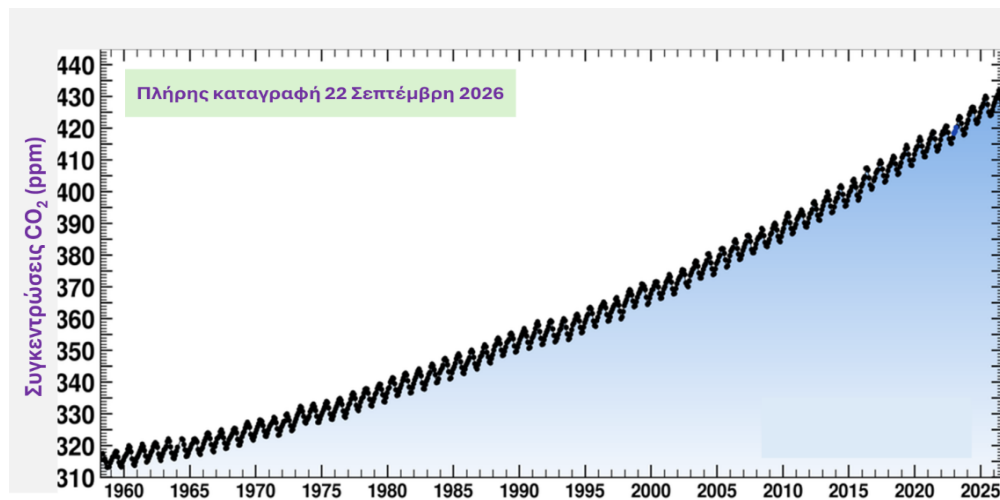
Σχήμα 2: Η απεικόνιση της ισόποσης μεταβολής των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2)



7 Η καμπύλη Keeling και οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂)

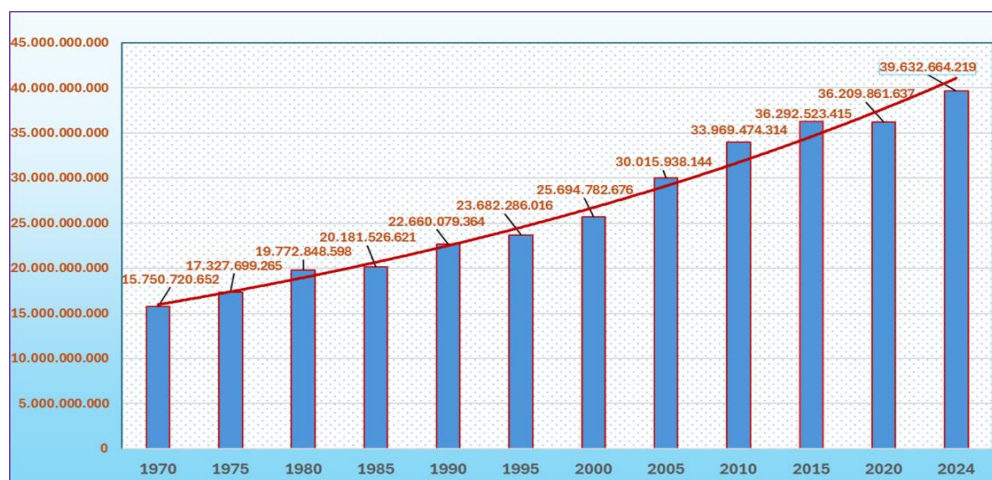
Η καμπύλη Keeling, καθώς έχει προαναφερθεί, καταγράφει τις μετρήσεις των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα σε ppm (Parts per million). Οι ελαφρές εποχιακές διακυμάνσεις των εν λόγω μετρήσεων αποτυπώνονται στο ζικ-ζακ σχήμα της, ενώ η ανοδική της τάση προέρχεται από τη διαχειριστική αδυναμία του οικοσυστήματος της βιόσφαιρας να απορροφήσει τις ανθρωπογενείς εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂).

Διάγραμμα 3: Οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) Παρατηρητήριο Μάουνα Λόα. 1960-2025 (ppm)



Source: NOAA-Global Monitoring Laboratory

Διάγραμμα 4: Οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε παγκόσμιο επίπεδο, 1970-2024, (Μετρικοί τόνοι)



Source: WordOmeter-CO₂ Emission by year. 1970-2024

Στο διάγραμμα 4 απεικονίζονται οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε παγκόσμιο επίπεδο. Από την συγκριτική συσχέτιση των καμπυλών των δύο διαγραμμάτων, προκύπτει ότι οι κλίσεις τους για την ίδια χρονική περίοδο παρουσιάζουν πανομοιότυπη τάση. Αυτό σημαίνει ότι η διαχρονική πορεία των μετρήσεων των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα, συμπίπτει με τις ποσότητες των ανθρωπογενών εκπομπών του εν λόγω αερίου.

Οι ανθρωπογενείς εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) συσσωρεύονται στην ατμόσφαιρα και αποτελούν ένα καθαρό πλεόνασμα το οποίο υπερβαίνει τις δυνατότητες της φυσικής απορρόφησης του οικοσυστήματος της βιόσφαιρας του πλανήτη.

Επομένως, το μέρος του ανθρωπογενούς διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), ως επιπρόσθετο τμήμα επί της φυσικής συγκέντρωσης του εν λόγω αερίου, έχει άμεση συνέπεια στη δημιουργία ενός συνόλου συγκεντρώσεων που υπερβαίνει την ετήσια απορροφητική δυνατότητα της Γης, η οποία από την άλλη πλευρά, μέσω της αποψίλωσης των δασών, μειώνεται συνεχώς.

Το ανθρωπογενές τμήμα του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), καθώς προκύπτει από τη σύγκριση των καμπυλών των δύο διαγραμμάτων, μαζί με τα υπόλοιπα αέρια του θερμοκηπίου, διαταράσσουν από κοινού την αρχέγονη ισορροπία των αερίων της ατμόσφαιρας του πλανήτη μας εντείνοντας με συνεχώς αυξανόμενη δυναμική την κλιματική αλλαγή, τα αποτελέσματα της οποίας είναι πλέον οφθαλμοφανή σήμερα.

Συμπέρασμα

Από τη συγκριτική διαχρονική πορεία, τόσο των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα (καμπύλη Keeling), όσο και της αντίστοιχης των συνόλων των εκπομπών του σε παγκόσμιο επίπεδο, προκύπτει ότι το εν λόγω αέριο, ένεκεν του μεγέθους των εκπομπών του, είναι ο βασικός συντελεστής του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Η μείωση των εκπομπών του από την παγκόσμια κοινότητα είναι επιβεβλημένη για τη διατήρηση των συνθηκών του κλίματος του πλανήτη μας.

Οι αρχές του θεσμικού πλαισίου έχουν διατυπωθεί στη Συμφωνία του Παρισιού το 2015 (COP¹-21) και έχουν γίνει αποδεκτές και νομικά δεσμευτικές από 196 χώρες μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα. Η τήρησή των και κυρίως η εφαρμογή των κατευθυντήριων πρακτικών της εν λόγω συμφωνίας, θα συμβάλει στη επίτευξη των στόχων της, οι οποίοι αποτελούν το υπόβαθρο για την αποτροπή της κλιματικής κατάρρευσης.

1 COP Conference of Parties. (Συνδιάσκεψη των μερών.)

Βιβλιογραφία

Birhan G. Tikuye, Ram L. Ray (2026). *Monitoring Carbon Fluxes Using Eddy Covariance Flux Tower and Satellite Data in Southern Texas, USA*. Water-Energy Nexus. DOI 10.1016/j.wen.2026.07.002

GORE, A., 2006. *An Inconvenient Truth: The planetary emergency of global warming and what we can do about it*. London: Bloomsbury.

Delive C & Loustau D. (2010) *Forests, Carbon Cycle and climate change*. (A highly cited, authoritative scientific text. Published by Éditions Quae).

Keeling C.D. (2001) *Exchanges of atmospheric CO₂ and 13CO₂ with terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000*. Scripps Institution of Oceanography (SIO).

NASA JET PROPULSION LABORATORY, 2019. *Watching Earth breathe: The seasonal vegetation cycle and atmospheric carbon dioxide*. [online]. Available from: nasa.gov [Accessed 4 October 2026].

Zhang, Y. et al. (2024) '*Deciduous forests use carbon more efficiently than evergreen forests*,' Research Square [Preprint]. doi: 10.21203/rs.3.rs-3989566/v1.