

Előzmények

Az azt megelőző 3 évtized stagnálását követően a 70-es évek végén ismét emelkedésnek indult a földi légkör hőmérséklete (Swanson et al. 2009), mely hatással volt (és van) a pedosz- és a bioszférára egyaránt (Gálos et al., 2009, Melillo et al., 2011). A pedoszféra és a vegetáció együttesen nagyjából 3-szor annyi szén tartalmaz, mint a légkör (Field and Raupach, 2004). Az erdőségek a földi növényzetben tárolt szén mintegy 90%-át, az alattuk lévő talajokkal együtt mintegy 60-80%-át adják globálisan a szárazföldi növényzet és a talajok összes szén mennyiségének (FAO 2005). Ezen belül az északi félteke növekvő területű mérsékeltövi lombhullató erdői fontos szerepet játszanak a globális szén-ciklusban (Barr et al. 2002), mivel jelentős mennyiségű szén-dioxidot kötnek meg (Canadell et al. 2007). A klímaváltozás Földünk számos területén, így hazánkban is, együtt járt az időjárási extrémítások fokozódásával, így nyári hőségnapok számának növekedésével, továbbá a száraz időszakok mind gyakoribbá és hosszabbá válásával (Pieccka et al., 2011). Ezek a változások a természetes vegetáció struktúrájának megváltozását okozták több ökoszisztémában is. Számos tanulmány szerint a klímaváltozás a talajok és a növényzet szerves széntároló képességére is jelentős befolyással van. Az emelkedő CO₂ szint fokozhatja a növényzet növekedését (Pretzsch et al. 2014), így a szén megkötését is, ugyanakkor a hőmérséklet emelkedése a talaj szerves anyag tartalmának gyorsuló bomlását okozhatja, ami a talaj szerves szén tartalmának csökkenéséhez vezet (Lucas et al. 2016). Ezeket a hatásokat azonban, egyéb paraméterek jelentősen befolyásolhatják, akár el is fedhetik. A talajnedvesség csökkenése, a hosszabbodó és sűrűsödő szárazabb periódusok idején akadályozza a lebontó folyamatokat, lassítva ezzel a talajban lévő szerves anyagok bomlását. Ugyanakkor a klímaváltozással együtt járó extrémítások gyakoribbá válása hatással lehet az erdők nettó primer produkciójára, csökkentve ezzel a faanyagba beépülő szén mennyiségét egyes területeken. A pusztuló fák révén viszont több faanyag kerülhet a felszínre, illetve a gyökerek révén közvetlenül a talajba, mely időlegesen növelheti a talajok szén tartalmát, a csökkenő levél avar produkció ellenére is (Fekete et al. 2017). A klímaváltozás erdőségekre gyakorolt hatásai jelentős ökológiai és ökonómiai problémákat hozhatnak, hiszen az erdőségek nemcsak a bennük foglalt magas szintű biodiverzitás okán fontosak, de jelentős gazdasági értéket is jelentenek (Führer et al. 2013).

A pályázatban vállalt kutatás fő célja volt, hogy hazánk egymástól jelentősen eltérő éves csapadéku területein vizsgálja a tölgyerdők növekedési dinamikáját, talajainak szén megkötő képességét, továbbá néhány egyéb paraméterének változását.

A klímaváltozás eltérő módon hat a szárazabb és a nedvesebb erdőségek talajainak szénforgalmára. Így kutatásunk egyik célja az volt, hogy összehasonlítsuk a hazai humid tölgyesek és ezek talajainak szénforgalmát a száraz erdők szén forgalmával. Mivel a talajok tulajdonságait számos paraméter befolyásolja rendkívül komplex módon, kutatási projektünkbe olyan eltérő humiditású területeket választunk ki, melyeknél a klímán kívül az egyéb fontos talajt befolyásoló paraméterek hasonlóak. A vizsgálandó erdőterületek kijelölésekor törekedtünk arra, hogy a csapadék gradiens menti eltéréseken túl a főbb

földrajzi, ökológiai feltételek hasonlóak, sőt amiben csak lehetséges azonosak legyenek, ennek megfelelően klímazonális erdőket, illetve talajokat választottunk, ahol a közet-, vagy a vízhatás nem jelentkezik, mivel ezek elfedhetnék a klíma eltéréseiből adódó különbségeket.

Ennek megfelelően nagyjából sík területeket választunk a vizsgálati területeink helyszínéül, ahol nem befolyásolja a kapott eredményeket a terület kitettsége, illetve a lejtők dőlésszöge, valamint az erózió sem. Lösszel (vagy löszön kialakult vályoggal) borított területeken növekvő erdőségeket vontunk a vizsgálatba, kizárva ezzel az alapközetek eltéréséből adódó esetleges különbségeket és a Kelet - Közép Európában gyakori kocsánytalan tölgy által dominált társulásokat vizsgálunk, hogy az eltérő faji jelleg se befolyásolja eredményeinket. Így a talajok és erdőségek vizsgálatakor kapott különbségeket az éves csapadék értékek változásához tudtuk kötni, melyek szerepét a korrelációs vizsgálataink is megerősítették.

Kutatásainkban a nedves és a száraz erdők különbségeit vizsgáltuk többféle változó tekintetében. A két erdő típus jobb elkülönítése céljából használtuk egyfajta „lágy határként” a két típus mellett az átmeneti, vagy *meso erdők* fogalmát. Az erdőségeket botanikai és éghajlati alapon is lehet a fenti kategóriákba osztani. A két osztályozási rendszer természetesen jelentős átfedést mutat, azonban különösen a határterületek esetében akadhatnak olyan erdőterületek, melyek a két kategória alapján eltérnek. Kutatásaink során a talajok biológiai aktivitását, a fontosabb tápelemek mennyiségét, és különösen a szerves szén tartalmát vizsgáltuk. Ez utóbbiak mennyiségét az általunk meghatározott vizsgálati feltételek mellett leginkább az avar input mennyisége, a lebomlás és a kimosódás mértéke befolyásolta. Mivel a fő állományalkotó fafajok jobbára azonosak voltak a kiválasztott területeken így nem a botanikai, hanem az éghajlati paraméterek alapján soroltuk be a területeket a 3 kategória valamelyikébe. A *broken-stick regressziós modell* töréspontjai jelölték ki az egyes kategóriák határértékeit.

A kutatások előkészítése során 35, az ország különböző pontjain található erdő területet jelöltünk ki, melyek talajtani paramétereinek alakulását együtt vizsgáltuk két fontos éghajlati paraméterrel az éves átlagos csapadék értékekkel, illetve az Ellenberg indexel, mely a csapadék mellett a júliusi középhőmérsékletet is számításba veszi (1. táblázat).

Ez az összehasonlítás, mint hamis idősoros módszer – fenntartásokkal – szolgálhat arra is, hogy a szárazerdő ökoszisztémák – és ezen belül a talajok – jelenlegi szénforgalmi jellemzői előre jelezzék a ma még humid, vagy meso talajok jövőben várható átalakulása során a megváltozó szénforgalmi kapacitásokat. A fenntartások azért szükségesek, mert az eltérő klímán kialakult különböző típusú talajok szénforgalma eleve eltér valamennyire egymástól.

1. táblázat. A kutatási projektben használt erdőterületek nevei, és 3 típusa

(N: nedves erdők, M: mezo erdők, S: száraz erdők). Az éghajlati adatokat a CARPATCLIM adatbázisából nyertük (high-resolution database of the Carpathian Region - www.carpatclim-eu.org)

Erdő területek nevei	éves átlagos		
	területek típusai	csapadék értékek (mm)	Ellenberg index
Bajánsenye	N	722,1	28,16
Ispánk	N	703,4	29,14
Szilvág	N	718,9	26,80
Ortaháza	N	725,4	28,11
Bak-1	N	714,9	26,40
Bak-2	N	712,7	26,50
Bazita (Zalaegerszeg)	N	704,8	28,16
Felsőmarác	N	690,6	28,00
Zalalövő	N	720,8	26,10
Hagyárosbörönd	N	688,3	28,10
Aggtelek	N	651,4	29,32
Balatonendréd	M	639,6	31,90
Buják	M	594,6	33,80
Sirok	M	583,1	34,00
Alsópáhok	M	651,2	33,33
Lulla-1	M	639,6	32,98
Lulla-2	M	639,6	32,98
Kavicsostető	M	590,0	33,33
Bükkaranyos	M	556,1	36,19
Fulókércs	M	601,4	35,22
Szemere	M	605,8	33,60
Gagyvendégi	M	600,9	33,90
Zalalövő	M	591,5	31,90
Püspökszilágy	M	573,6	36,64
Síkfőkút	M	586,0	33,53
Bag	S	574,8	36,46
Hévízgyörk	S	574,8	36,46
Vécs	S	565,2	36,00
Füle-1	S	577,2	38,83
Demjén-Észak	S	552,8	38,09
Demjén-Dél	S	557,0	37,68
Kerecsend	S	554,4	37,40
Aszaló	S	556,2	37,58
Füle-3	S	577,2	37,73
Füzesabony	S	544,7	38,72

Az előrejelzés a száraz talajok szénforgalmi jellemzői alapján mégis megtehető, mert az adott vizsgálati szempontok mellett, a talajok jelenleg várható szénforgalomra vonatkozó változásai kevéssé függenek a talajtípust meghatározó (évszázadok és évezredek alatt kialakult) statikus, robusztus talajtulajdonságoktól (mésztartalom, kémhatás, stabil humuszfrakció), mint a gyorsan változó klíma és biomassza által meghatározott talajparamétereitől (talajhőmérséklet, talajnedvesség, avar mennyiség és minőség, beleértve a fák gyökérzetének változásait is, továbbá a mindezek által befolyásolt talaj biológiai feltételek, melyek a lebontó folyamatok sebességét szabályozzák).

A pályázatban vállalt és a megvalósult kutatások bemutatása

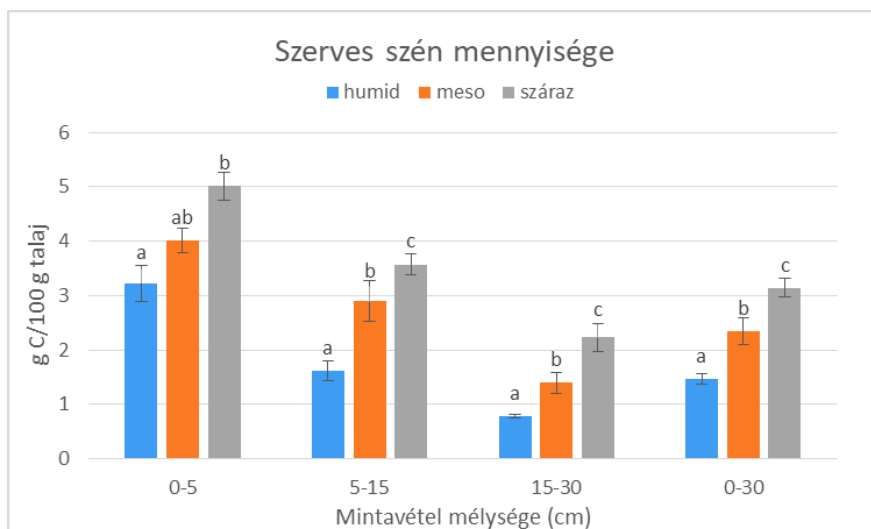
Pályázatunkban összesen 15 (5 nedves, 5 száraz és 5 mezo) erdő terület vizsgálatát vállaltuk. Ezzel szemben a szén forgalmi viszonyokra vonatkozó mennyiségi vizsgálatoknál 35 erdőterületet és a hozzájuk tartozó talajokat vizsgáltunk, mérve azok szén, nitrogén és kén tartalmát, valamint az erdőségek dendromasszáját, illetve az erdők avar produkcióját is és az avar bomlási sebességét. Ezek közül 18 területen végeztünk rendszeresen (évente háromszor) talajbiológiai vizsgálatokat. Ennek során talajenzim (β -glükózidáz, dehidrogenáz, proteáz, arylszulfatáz) és sejtszámlálásos mikrobiológiai (MPN), illetve ergoszterolos gomba biomassza vizsgálatokat végeztünk HPLC-vel, illetve mértük az erdők talajainak, pH-ját, térfogattömegét, vízkapacitását, nedvesség tartalmát, szemcseösszetételét egyéb tápelem tartalmát is (P, K, Ca, Mg, Mn, Zn, Cu, Fe). A kutatások elmélyítése érdekében neves külföldi intézetekkel is együttműködtünk, így a jénai Max Planck Institute-ban (Németország) ^{14}C vizsgálatokat végeztünk, hogy a kiválasztott erdőtalajok szén körforgalmának sebességét vizsgáljuk. A Torontói (Kanada) és Palermói Egyetemen (Olaszország) NMR, míg a Bolognai Egyetemen (Olaszország) termogravimetriás és IR vizsgálatokkal tanulmányoztuk a talajok szerves molekuláit, hogy a szerves vegyületek mennyiségi változásán kívül, azok minőségi paramétereit is felmérhessük, feltárva az eltérő klimatikus háttér feltételek szerves anyag készletre gyakorolt hatásait.

A pályázati vállalást túlteljesítve nemcsak 1 rétegből (0 - 15 cm) vettünk talajmintákat, hanem 0-5 cm, 5 – 15 cm, és 15 – 30 cm-es rétegekből. Így megháromszorozódott a minták száma, melyek vizsgálatokor többek között a pályázatban vállalt enzim aktivitások, elem tartalmak mérését végeztük el, továbbá 9 erdőterületen további talajrétegekből is vettünk mintákat (30-50, 50-70, 70-100 cm), hogy a szerves szén tartalmát a talajoknak egészen a C szintig, vagy annak közeléig megismerhessük. A vizsgált talajrétegek számának növelését azért tartottuk fontosnak, mert így betekintést nyerhettünk a különböző talajrétegekben jellemző biológiai folyamatok és tápelem felhalmozási viszonyok alakulásába, mely az egyes erdő típusoknál jelentős különbségeket mutatott.

Fontosabb eredményeink bemutatása az eddigi publikációink és bírálat alatt lévő kézirataink alapján

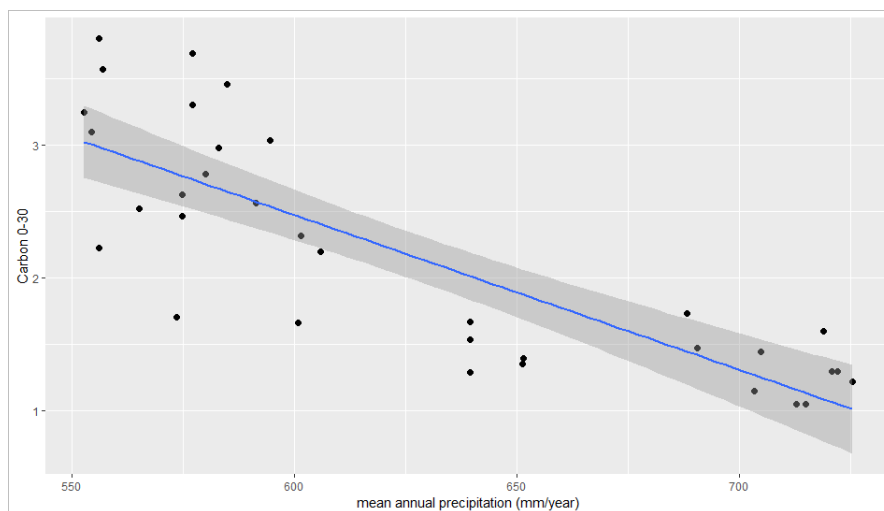
A száraz erdőségekben, mind a három talajszintben szignifikánsan magasabb széntartalmat mértünk, mint a nedves erdőkben (1. ábra) annak ellenére is, hogy az avar produkció

szignifikánsan, (mintegy 37 %-kal) magasabb volt a nedves erdők területén. A vizsgálatok azt mutatták, hogy minél mélyebb talajsintet vizsgáltunk annál nagyobb a különbség a nedves, mezo és száraz erdők talajainak szén tartalma között arányukat tekintve.



1. ábra. A vizsgált erdőterület-csoportok szerves szén mennyisége (g szén/100 g száraz talaj)

Az erdőségek dendromasszájának vizsgálata a talajokéval ellentétes tendenciákat mutatott, a nedves erdőségek dendromasszája szignifikánsan magasabb értékeket mutatott (327 ± 9 tonna szén/ha), míg a száraz erdőségek esetében ugyanez az érték $159 \pm 9,3$ tonna szén/ha volt. A száraz, mezo és humid erdőségek talajainak szén tartalma és az éves csapadék átlagok közötti összefüggéseket regresszió analízissel vizsgáltuk (2. ábra). Vizsgálataink azt mutatták, hogy minden talajrétegben erős korreláció tapasztalható a két változó között, melyet a magas R^2 (0,77 a 0-30 cm-es rétegben) és alacsony p (<0,001) értékek is mutattak. Mélyebb rétegekben erősebb korrelációt találtunk a két változó között.



2. ábra Az éves átlagos csapadék értékek és a talajok szerves szén készletének korreláció vizsgálata regresszió analízis segítségével a talaj felső 30 cm-es rétegében.

Nedvesebb környezetben, főleg ha a vegetációs időszakban is optimális a lebontó szervezetek számára a talaj nedvesség tartalma, felgyorsul a szerves maradványok lebomlása és emellett a talajokból történő kimosódási folyamatok is felerősödnek. Ez tetten érhető abban is, hogy az általunk vizsgált nedves erdőségek talajaiban a könnyebben kimosódó tápelemek, így pl. a Ca, vagy a K mennyisége is jelentős különbséget mutat a száraz erdők talajaiban mért értékekhez képest. Az oldható szerves vegyületek vélhetően hasonlóan viselkednek, még ha a kimosódás mértéke jelentős eltéréseket is mutathat. A száraz erdőségekben a kálium 225 %-kal, míg a kalcium 711 %-kal magasabb értéket mutatott, mint a nedves erdőkben, mutatva ezzel a kimosódás szignifikáns különbségeit a két erdőtípus talajai között. A talajok pH-ja szintén ezeknek a folyamatoknak megfelelően alakult. Az általunk vizsgált nedves erdőségek felső 5 cm-es rétegének átlag pH értéke $5,29 \pm 0,15$, míg a száraz erdőké csaknem semleges $6,85 \pm 0,16$, mely szignifikáns különbséget mutat a két típus között, a mélyebb rétegekben alacsonyabb pH értékeket mértünk, de az erdőterületek közötti különbségek hasonlóak voltak. A lebontó folyamatok intenzitását a talajok gomba biomasszája is jelentősen befolyásolja, mivel a savanyú erdőtalajok esetében a szaprofita gombák tevékenysége különösen jelentős szereppel bír. A szubsztrátként szereplő avar nedves erdőterületeken mért nagyobb mennyisége és a gombák gyorsabb szaporodásához és nagyobb aktivitásához nélkülözhetetlen magasabb talajnedvesség értékek valószínűsítették a humid erdők nagyobb gombabiomasszáját. Vizsgálataink alátámasztották mindezt, a nedves erdők talajaiban 61 % magasabb gomba biomassza értéket mértünk, mint a száraz erdőkében és az enzim aktivitás értékek is részben hasonló tendenciákat tükröztek.

Kutatásaink során megállapítottuk, hogy a változó klíma feltételek mellett is jelentős marad az erdők széntároló kapacitása, még akkor is, ha a jelentős csapadék csökkenés mellett csökken az erdők biomasszájában tárolt szén mennyiség, így az avar révén a felszínre jutó szerves anyag mennyisége is. Ennek a folyamatnak az okát a csökkenő kilúgzás és a lebontó folyamatok lassulása adhatja meg, aminek következményeként nő a talajokban tárolt szén mennyisége. A növekvő légköri szén-dioxid koncentráció, továbbá a vegetációs időszak hosszának megnyúlása a biomassza mennyiségét növeli jelentősen, ám ez a hatás csak ott tud igazán érvényesülni, ahol a csapadék csökkenése nem gátolja a növényzet növekedését. A meglévő erdő területek megtartása, lehetőség szerint növelése számos egyéb ok mellett, a területek stabil széntároló kapacitása miatt is fontos. Azonban fontos kérdés, hogy a száraz erdőkben felhalmozódó szerves anyag többlet milyen vegyületekből áll, mennyire tudnak felhalmozódni a lebomlásnak tartósan ellenálló molekulák, illetve a talajok ásványi összetevőivel kialakított komplexek mekkora védelmet biztosítanak a hozzájuk kötött szerves maradványoknak.

Az elmúlt két év publikációinak bemutatása

A pályázatban vállalt vizsgálatoknak nem volt közvetlen előzménye korábbi kutatási tevékenységünk folyamán. Ennek megfelelően a kutatások részeredményeit tudtuk csak publikálni a pályázati időszak első kb. 20 - 22 hónapjában, míg az átfogó összegzések, szakmai összefoglalások publikálását csak a pályázati időszak legvégén a begyűjtött összes

adat birtokában tudtuk megkezdeni. Ennek ellenére pályázatban vállalt publikációkat számszerűen már az első évben teljesítettük: 2 cikkünk jelent meg Q1-es folyóiratban (Science of the Total Environment, impact factor: 5,589 (2018)), továbbá 3 nemzetközi és 5 hazai konferencia anyagunk. 2019-ben további 5, rangos nemzetközi konferencia részvételünk volt. Ezen felül 4 beadott, ill. bírálattal látott kéziratunk van, ez utóbbiakból egy magyar nyelvű, míg a másik 3 angol nyelvű Q1-es nemzetközi folyóirathoz került beküldésre és további 2 kézirat áll előkészítés alatt.

Irodalomjegyzék

- Barr, A. G., Griffis, T. J., Black, T. A., Lee, X., Staebler, R. M., Fuentes, J. D., Morgenstern, K. (2002). Comparing the carbon budgets of boreal and temperate deciduous forest stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 32, 813–822.
- Canadell, J. G., Le Quere, C., Raupach, M. R., Field, C. B., Buitenhuis, E. T., Ciais, P., Marland, G. (2007). Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the national academy of sciences*, 104, 18866–18870.
- FAO (2005). *Global Forest Resource Assessment: Progress Towards Sustainable Forest Management*. FAO. FAO Forestry Paper, Rome, 147.
- Fekete, István, Kate Lajtha, ZsoltKotroczó, GáborVárbíró, CsabaVarga, János Attila Tóth, Ibolya Demeter, GáborVeperdi, ImreBerki(2017). Long term effects of climate change on carbon storage and tree species composition in a dry deciduous forest *Global Change Biol.* 23(8), 3154–3168.
- Field, C. B., &Raupach, M. R. (Eds.) (2004). *The global carbon cycle: Integrating humans, climate, and the natural world* (p. 52). Washington, DC: Island Press.
- Führer, E., Jagodics, A., Juhász, I., Marosi, G. Y., &Horváth, L. (2013). Ecological and economical impacts of climate change on Hungarian forestry practice. *Időjárás – Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 117, 159–174.
- Gálos, B., Goettel, H., Haensler, A., Preuschmann, S., Matyas, C., & Jacob, D. (2009). Do forest cover changes have any feedback on temperature and precipitation extremes over Hungary? *Geophysical Research Abstracts*, 11, 7687.
- Lucas, R. W., Sponseller, R. A., Gundale, M. J., Stendahl, J., Fridman, J., Högberg, P.,Laudon, H. (2016). Long-term declines in stream and river inorganic nitrogen (N) export correspond to forest change. *Ecological Applications*, 26, 545–556.
- Melillo, J. M., Butler, S., Johnson, J., Mohan, J., Steudler, P., Lux, H., Vario, C. (2011). Soil warming, carbon–nitrogen interactions, and forest carbon budgets. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 9508–9512.
- Pieczka, I., Pongrácz, R., &Bartholy, J. (2011). Comparison of simulated trends of regional climate change in the Carpathian basin for the 21st century using three different emission scenarios. *ActaSilvaticaetLignariaHungarica*, 7, 9–22.
- Pretzsch, H., Biber, P., Schütze, G., Uhl, E., &Rötzer, T. (2014). Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nature Communications*, 5, 4967.
- Swanson, K. L., Sugihara, G., &Tsonis, A. A. (2009). Long-term natural variability and 20th century climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 16120–16123.