

Kvantitatívne vyjadrenie fyziologického sucha

Physiological drought and its quantification

Viliam Novák

Ústav hydrológie SAV, Račianska 75, 83201 Bratislava

Abstrakt

Fyziologické sucho je taký stav porastu (rastliny), kedy je produkcia biomasy v dôsledku dehydratácie rastliny nižšia ako maximálne možná v daných meteorologických, nutričných a iných staničných podmienkach. V tejto práci sú analyzované tri spôsoby identifikácie fyziologického sucha: identifikácia sucha pomocou vlhkosti pôdy zodpovedajúcej bodu trvalého vädnutia, pomocou identifikácie sucha určením vlhkosti bodu zníženej dostupnosti pôdnej vody pre rastliny a pomocou koncepcie kritickej vlhkosti pôdy kedy sa začína znižovať dostupnosť vody pre rastliny. Posledná možnosť je založená na identifikácii vlhkosti koreňovej oblasti pôdy, keď sa začína znižovať produkcia biomasy.

Kľúčové slová: fyziologické sucho, produkcia biomasy, evapotranspirácia, transpirácia, vlhkosť pôdy

Abstract

Physiological drought can be defined as a state of plant (canopy) dehydration decreasing biomass production rate below maximum possible under given environmental conditions. This work contains three basic methods of physiological drought identification: First one is based on evaluation of wilting point (soil water content related to wilting point), the second is based on identification of the point of limited availability of water to plants and the third, original one is based on identification of soil water content of limited availability to plants, at which biomass production is starting to be below its maximum under given conditions.

Key words: physiological drought, biomass production, evapotranspiration, transpiration, soil water content

Úvod

Sucho je všeobecne definované ako nedostatok vody. Tento termín sa používa často a jeho význam nie je jednoznačný. Hore uvedená definícia je toho dobrou ilustráciou. Preto, definície sucha sú kvalitatívneho charakteru a miera sucha sa vyjadruje slovami ako

„nedostatok vody“, málo vody“ „nízky úhrn zrážok“. Napríklad internetová encyklopédia Wikipédia označuje sucho ako „sucho je dlhé obdobie viacerých mesiacov, alebo rokov, kedy región pociťuje nedostatok vody“. Slovník Multilingual Technical Dictionary (1996) definuje sucho ako “spojitý interval času s nedostatočnými zrážkami“. Prvá vec, čo nás môže zarazit je, že sucho je definované ako interval času a nie ako stav určitej časti hydrosféry. Možno je to dané tým, že v anglosaských krajinách používajú výraz „dry spell“, čo znamená suché obdobie, alebo slovo „drought“ čo v podstate znamená to isté.

V Meteorologickom slovníku (1993) je možné nájsť definície rôznych druhov sucha: meteorologické sucho, agronomické sucho, hydrologické sucho. Samozrejeme, každé z nich sa definuje ináč, na spoločného menovateľa sa nedajú dať. Šútor et al., 2005, Šútor, 2006, Kandra, 2006) a mnohí iní sa pokúsili definovať pôdne sucho ako taký stav vody v pôde, keď je priemerný obsah vody v koreňovej oblasti pôdy pod vlhkosťou bodu trvalého vädnutia. Podľa Wikipédie, je „pôdohospodárske sucho“ (agricultural drought) definované ako nedostatok vody, ktorý negatívne ovplyvňuje produkciu biomasy. Toto je prijateľná definícia a môže byť stotožnená s definíciou fyziologického sucha uverejnenej v Meteorologickom slovníku (1993) ako stav pôdy (a následne vody v rastline), ktorá limituje rast rastlín a produkciu biomasy. Táto ostatne uvedená definícia je akceptovateľná, nehovorí však nič o tom, ako tento stav identifikovať a kvantifikovať ho.

Predmetom tejto práce je definovať fyziologické sucho a kvantitatívne ho vyjadriť.

Vlhkosť pôdy korešpondujúca trvalému vädnutiu rastlín a definícia sucha založená na vlhkosti pôdy zodpovedajúcej trvalému vädnutiu (rastlín)

Vlhkosť bodu trvalého vädnutia θ_v (wilting point) je definovaná ako vlhkosť, zodpovedajúca vlhkosťnému potenciálu pôdy $p_w = -1,5$ MPa, najčastejšie sa vlhkosťný (matričný) potenciál pôdnej vody vyjadruje v jednotkách tlakovej výšky, teda $h_w = -15000$ cm. Aby sme lepšie pochopili význam tohto termínu, bude vhodné, ak sa oboznámime so spôsobom jeho identifikácie. Briggs a Shantz (1912) (University of Davis, California) boli prví, ktorí zaviedli pojem súčiniteľ vädnutia (wilting coefficient), čo malo označovať vlhkosť pôdy, pri ktorej rastlina ešte nevädne. Veihmeyer a Hendrickson (1928) zistili, že je to charakteristika pôdy (je teda pre každú pôdu iná) a nezávisí od vlastností prostredia. Pomenovali ho bodom trvalého vädnutia. Neskôr, Richards (1931) z USSL, Riverside, California priradil tejto vlhkosti trvalého vädnutia hodnotu vlhkosťného potenciálu pôdy.

Ako vlastne prišli k tejto hodnote ? Takto definovaná vlhkosť pôdy zodpovedá situácii, keď rastlina (alebo porast) pestovaný v ideálnych podmienkach nádobového pokusu je dostatočne zásobený vodou, t.j. voda nie je limitujúcim faktorom rastu. Transpirácia porastu je teda maximálna (potenciálna), povrch pôdy je zakrytý. V určitom (bližšie nedefinovanom) štádiu vývoja porastu sa zavlažovanie ukončí, transpiráciou sa pôda začne vysušovať, intenzita transpirácie sústavne klesá, až sa na rastline objavia viditeľné znaky vädnutia (ovisnutie a skrúcanie listov, zmena farby listov). Ak sa dosiahne takéto štádium vädnutia, určí sa priemerná vlhkosť koreňovej oblasti pôdy; je to vlhkosť trvalého vädnutia. Prečo trvalého ? Preto, lebo ak prejde porast (rastlina) opísanou procedúrou, vädnutie sa stane nezvratným; to znamená ani pri následnej závlaha sa rastliny nezregenerujú.

Aby som sa uistil, že je to naozaj tak, zopakoval som (je to dávno) pokusy Briggsa a Shantza, dostal som podobné výsledky. Zdá sa, že pri hore uvedenej procedúre je hodnota vlhkosťného potenciálu $h_v = - 15000$ cm hodnotou pokrývajúcou široké spektrum plodín, ktoré sú pestované v identických hydratačných podmienkach. Samozrejme, korešpondujúce vlhkosti θ_v sú pre každú pôdu iné.

Zaujímavé je, že vlhkosťný potenciál pôdy $h_v = - 15000$ cm neznamena vädnutie pre iné podmienky rastu rastlín. Jordan a Ritchie, (1971) publikovali informácie, že porasty nejavili znaky vädnutia ani pri vlhkosťnom potenciáli $h_w = - 32\ 000$ cm, čo je viac ako o polovicu nižšia hodnota vlhkosťného potenciálu vody v pôde zodpovedajúceho potenciálu trvalého vädnutia rastlín. Okrem toho, hore uvedené tvrdenia platia len pre väčšinu plodín.

Prečo je to tak ?

Je to jednoduché. Rastlina ako nekonzervatívny prvok je schopná naadaptovať sa na nízku úroveň hydratácie rastliny, ak tento proces prebieha pozvoľna. Preto, je bod (vlhkosť) trvalého vädnutia hodnota relatívna a význam tohto hydrolimitu musí byť interpretovaný vzhľadom na podmienky pre ktoré bol tento hydrolimit určený. Je teda vidieť, že ak priemerná vlhkosť koreňovej oblasti pôdy dosiahne vlhkosť bodu trvalého vädnutia, to ešte neznamena, že porast naozaj zvädne. To záleží na histórii vlhkostí v predchádzajúcom období, ale aj na vlastnostiach porastu. Každá rastlina reaguje na dehydratáciu odlišne. Nesporne však, identifikovaná vlhkosť „bodu vädnutia“ je signálom, že porast je dehydratovaný a že sa blíži do kritickej oblasti vlhkostí pôdy, kedy je ohrozená existencia porastu. Určenie „bodu vädnutia“ je stále predmetom výskumu. Czyz a Dexter (2013) analýzou priebehu vlhkosťných retenčných čiar 52 vzoriek pôdy stanovili hodnotu

vlhkostného potenciálu $p_w = -1.03$ MPa ako „bod vädnutia“, ktorý korešponduje s potenciálom „prerušenia hydraulického spojenia“ v pôde. Je to však oveľa zložitejšie.

Vlhkosť pôdy kedy je dostupnosť vody pre rastliny znížená

(vlhkosť zníženej dostupnosti vody pre rastliny)

Dlhoročné skúsenosti ukázali, že rast porastov a produkcia biomasy sa znižujú už pred dosiahnutím hydrolimitu vlhkosti trvalého vädnutia (Richards, Waldleigh, 1952). Všimnime si, že stále hovoríme o vlastnostiach pôdy, a nie o vlastnostiach rastliny, predpokladajúc, že ak je dosť vody v pôde, bude jej dosť aj pre porasty. Toto je pravda, ale neplatí to pre tzv. kritické oblasti vlhkostí pôdy, teda pre extrémne nízke a extrémne vysoké vlhkosti, kde prichádzajú do úvahy adaptačné mechanizmy rastliny a tie sú rozdielne pre rôzne rastliny a – ako bolo povedané – závisia na histórii rastu rastlín.

Váša a Drbal (1975) zaviedli pojem bod zníženej dostupnosti vody pre rastliny (alebo vlhkosť zníženej dostupnosti vody pre rastliny), ako vlhkosť v intervale hydrolimitov vlhkosti trvalého vädnutia (θ_v) a vlhkosti zodpovedajúcej poľnej vodnej kapacite (θ_{pk}), kedy sa začína znižovať produkcia biomasy. Je ho možné vyjadriť rovnicou:

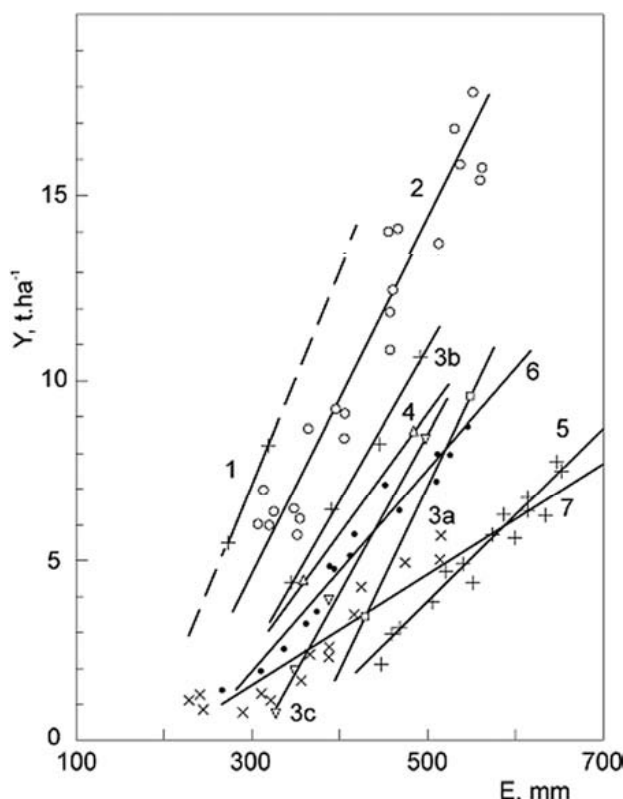
$$\theta_{zd} = p (\theta_{pk} - \theta_v) \quad (1)$$

Súčiniteľ p môže mať hodnoty v intervale (0,1), Váša a Drbal (1975) navrhli $p = 0.6$. Vychádzajúc zo súčasných znalostí vieme, že parameter p je predovšetkým funkciou rýchlosti transpirácie porastu. Pri extrémne vysokých rýchlostiach transpirácie, sa hodnota p blíži k jednej, naopak, pri intenzite transpirácie blízkej nule sa hodnota p blíži k nule. To znamená, že pri vysokej transpirácii sa začne znižovať produkcia biomasy aj pri vysokých vlhkostiach pôdy, naopak, pri malých intenzitách transpirácie je transpirácia potenciálna aj pri relatívne malých vlhkostiach pôdy. Hore uvedený vzorec s hodnotou parametra $p = 0.6$ sa používal v Československu na riadenie závlah.

Koncepcia kritickej vlhkosti pôdy kedy sa začína znižovať dostupnosť vody pre rastliny (Critical soil water content of limited water availability)

Kritická vlhkosť pôdy kedy sa znižuje dostupnosť vody pre rastliny skráteno kritická vlhkosť pôdy (θ_{la}), je charakterizovaná priemernou vlhkosťou koreňovej oblasti pôdy, kedy sa začne

rýchlost' transpirácie znižovať, sprevádzaná znižovaním produkcie biomasy. Je spravidla postačujúce uvažovať hornú, metrovú vrstvu pôdy, kde sú lokalizované korene väčšiny kultúrnych plodín. Početnými meraniami bola zistená lineárna závislosť medzi intenzitou fotosyntézy a intenzitou transpirácie konkrétneho porastu, ak sú ostatné podmienky (výživa, agrotechnika) nemenné. Ďalšie informácie je možné nájsť v práci Hanksa a Hilla (1980), Vidoviča a Nováka (1987) a Nováka a Havrilu ,(2006), Kool, et al. (2014). Dostupné informácie sú na obr.1.



Obr.1. Empirická závislosť hmotností suchých zŕn kukurice Y vo vzťahu k sumárnej evapotranspirácii E , za vegetačné obdobie. 1 – Trnava (1981 – 1982), 2 – Logan, USA,(1975), 3a,3b,3c –Gilat, Izrael, (1968,1969,1970), 4 – Cherson, Ukrajina, (1974 – 1978), 5 – Greenville, USA, (1978), 6 –Farmington, USA, (1978), 7 - Evans, USA, (1978).

Princíp metódy určovania kritickej vlhkosti pôdy (θ_{la}), je založený na využití známej, empirickej závislosti medzi intenzitou transpirácie E_t a objemovej vlhkosti pôdy θ , (obr.2).

Princíp určovania kritickej vlhkosti pôdy θ_{la} možno objasniť pomocou obrázku 2. Z predchádzajúcich úvah je zrejmé, že maximálna produkcia biomasy sa dosiahne, ak je úhrn transpirácie za vegetačné obdobie príslušného porastu maximálny, t.j. transpirácia bola vždy

potenciálna. Z toho tiež vyplýva, že ak je transpirácia nižšia ako je potenciálna, už sa znižuje aj produkcia biomasy. Zníženie priemernej vlhkosti v koreňovej oblasti pôdy pod θ_{la} teda spôsobuje zníženie intenzity transpirácie a aj produkcie biomasy. Teda, ak je vlhkosť pôdy (priemerná) v koreňovej oblasti pôdy nižšia ako je kritická vlhkosť θ_{la} , tento stav je možné charakterizovať ako stav „fyziologického“ sucha.

Metóda výpočtu kritickej vlhkosti pôdy, kedy je dostupnosť vody pre porast znížená (critical soil water content of limited water availability θ_{la}), bola opísaná už skôr, v súvislosti s metódou výpočtu výparu (Novák, Havrila, 2006). Je ju možné vyjadriť rovnicami (2–4), (Novák, 2012):

$$\theta_{la} = \theta_{k1} = \frac{1}{\alpha} + \theta_{k2} \quad (2)$$

$$\theta_{k2} = 0.67 \cdot \theta_v \quad (3)$$

$$\alpha = -2.27 E_p + 17.5 \quad (4)$$

θ_{k1} , θ_{k2} sú kritické vlhkosti pôdy indikujúce začiatok a koniec intervalu vlhkostí pôdy, kedy sa transpirácia začne znižovať a kedy je blízka nule, θ_v je vlhkosť trvalého vädnutia (Kutílek, Nielsen, 1994). Koeficient α môžeme približne určiť podľa očakávanej dennej intenzity potenciálnej transpirácie E_p ; pre výpočet θ_{k2} je potrebné poznať vlhkosť bodu trvalého vädnutia θ_v . Nakoniec sa vypočíta θ_{la} z rovnice (2).

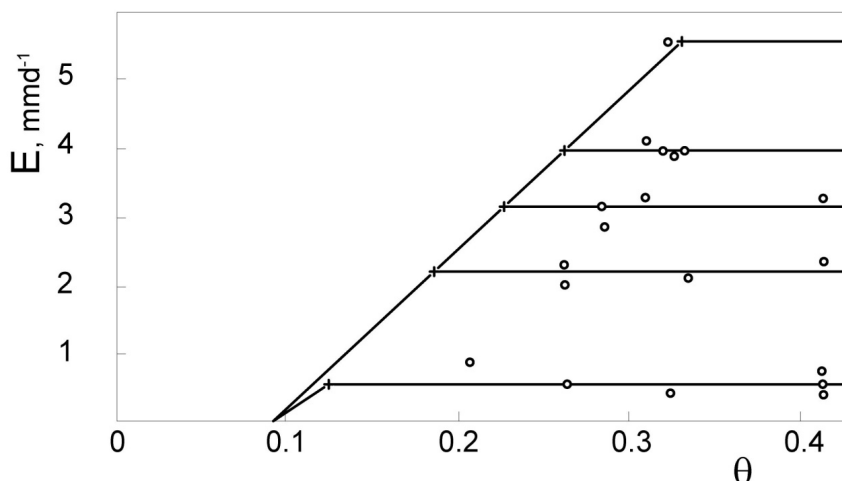
Všimnime si, že kritická vlhkosť pôdy θ_{la} je nižšia ako vlhkosť trvalého vädnutia ($\theta_{k1} < \theta_v$); pretože rastlina transpiruje aj pri vlhkostiach pôdy nižších ako je vlhkosť trvalého vädnutia pôd, čo je v súlade s našimi poznatkami. Koeficient α závisí na intenzite potenciálnej transpirácie E_p . Z toho vyplýva, že vlhkosť pôdy, korešpondujúca kritickej vlhkosti nezávisí len od vlastností pôdy, ale od vlastností celého systému pôda- rastlina – atmosféra (PRAT). Intenzita potenciálnej transpirácie silne ovplyvňuje kritickú vlhkosť pôdy θ_{k1} a je funkciou meteorologických charakteristík.

Na obr. 3 sú kritické vlhkosti pôdy reprezentujúce zníženú dostupnosť vody pre rastliny (critical soil water content of limited availability to plants) pre tri druhy pôd a ich závislosť na intenzite transpirácie - $\theta_{la} = f(E_p)$. Z obrázku vyplýva výrazná závislosť θ_{la} na intenzite transpirácie porastu. Ak sa pozrieme na černoze na spraši z Trnavy, tak pre relatívne nízku

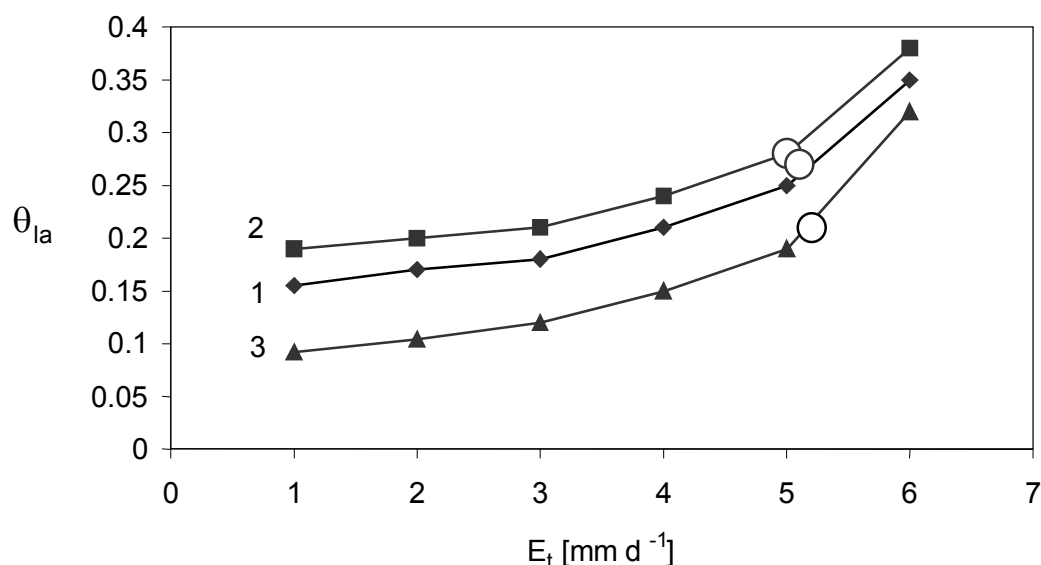
intenzitu transpirácie 1 mm d^{-1} , typickú pre letný zamračený deň $\theta_{la} = 0,15$, pre horúci letný deň s $E_t = 5 \text{ mm/d}$ je $\theta_{la} = 0,25$. Je to podstatný rozdiel. Je zaujímavé, že nedostatok vody v pôde limituje produkciu biomasy predovšetkým počas horúcich dní, nedostatok vody v pôde počas chladných dní, nie je tak významný.

Na obr.3 (označené krúžkami), sú vlhkosti pôdy, reprezentujúce „body zníženej dostupnosti vody pre rastliny“ θ_{zd} , vypočítané podľa rov. (1). Súčiniteľ p v rovnici (1) v pôvodnej práci $p = 0.6$ je nastavený pre maximálne intenzity transpirácie a teda ak sa závlahy riadia podľa tohto kritériá, je zabezpečená maximálna produkcia biomasy počas celej sezóny, ale za cenu zbytočne vysokých závlahových dávok, pretože priemerné denné úhrny transpirácie sú približne o polovicu nižšie, ako $E_t = 5 \text{ mm d}^{-1}$.

Hore uvedené tvrdenia platia pre podmienky rastu, keď nie sú narušené základné fyziologické procesy v rastlinách, t.j. nevyskytnú sa extrémne nízke vlhkosťové potenciály pôdy v kombinácii teplotným stresom (Lipiec et al., 2013)



Obr 2. Závislosť intenzity evapotranspirácie E na priemernej vlhkosti koreňovej oblasti pôdy θ pod porastom kukurice v okolí Trnavy. Kritické vlhkosti pôdy θ_{la} boli vypočítané podľa opísanej metodiky.



Obr. 3. Závislosť kritickej vlhkosti pôdy θ_{la} na priemerných denných intenzitách transpirácie kukurice (*Zea Mais L.*) E_t , pre tri druhy pôd. Krúžky označujú hodnoty vlhkosti pôdy θ_{zd} , reprezentujúce zníženú dostupnosť vody pre rastliny, vypočítané pomocou rovnice (1) s hodnotou súčiniteľa $p = 0.6$. Černozem na spraši, Trnava - (1); hlinitá pôda Most pri Bratislave - (2); piesočnatá pôda, Láb - (3).

Záver

Fyziologické sucho je vhodné definovať ako hydratačný stav rastliny (porastu), keď je produkcia biomasy nižšia, ako maximálne možná v daných meteorologických podmienkach (predpokladajúc nemenné nutričné a agrotechnické podmienky).

Pretože porast prijíma vodu z pôdy, tomuto hydratačnému stavu porastu (fyziologickému suchu) zodpovedá priemerná vlhkosť koreňovej oblasti pôdy, ktorá je nižšia, ako tzv. kritická vlhkosť pôdy, kedy sa začala znižovať dostupnosť vody z pôdy pre porast.

Toto tvrdenie je založené na početných empirických informáciách o lineárnej závislosti medzi intenzitou transpirácie porastu a intenzitou fotosyntézy (produkcie biomasy). Ak sa intenzita transpirácie pre nedostatočný prítok vody do rastliny zníži pod úroveň potenciálnej transpirácie, zníži sa ja produkcia biomasy.

Predkladá sa výpočtová metóda určenia kritickej vlhkosti pôdy, kedy sa začína znižovať dostupnosť vody z pôdy pre porast.

Literatúra

- BRIGGS, L. J., SHANTZ, H. L. 1912. The wilting coefficient for different plants and its indirect determination. USDA Bureau of Plant Industry Bull 230. U. S. Gov. Printing Office, Washington, DC.
- CZYZ, E.A., DEXTER, A.R. 2013. Influence of soil type on the wilting of plants. *Int. Agrophys.*, v. 27, 385 – 390, doi: 10.2478/intag-2013-0008.
- HANKS, R.J., HILL, R.W. 1980. Modeling crop responses to irrigation in relation to soils, climate and salinity. *Inter. Irrig. Inform. Center, Publ. No. 6, Bet Dagan, Israel*, s. 57.
- JORDAN, W.R., RITCHIE, J.T. 1971. Influence of soil waterstress on evaporation, root absorption and internal water status of cotton. *Plant Physiol.* 48: 783–788.
- KANDRA, B. 2006. Results of drought identification of East Slovakia Lowland, according to different characteristics. *Acta Hydrologica Slovaca*, v.7, 163 – 175
- KOOL, D., AGAM, N., LAZAROVITH, N., HEITMAN, J.L., SAUER, T.J., A. BEN- GAL. 2014. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agric. Forest Meteorol.*, 184, 56 – 70.
- KUTÍLEK, M., NIELSEN, D.R. 1994. *Soil hydrology*. Catena Verlag, Cremlingen - Destedt, Germany, 370 pp.
- LIPIEC, J., DOUSSAN, C., NOSALEWICZ, A., KONDRACKA, K. 2013. Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: a review. *Int. Agrophys.* v.27, 463 – 477, doi: 10.2478/intag-2013-0017.
- METEOROLOGICKÝ SLOVNÍK , výkladový, terminologický. 1993. Academia, MZCR, Praha, pp.594.
- MULTILINGUAL TECH. DICTIONARY ON IRRIGATION AND DRAINAGE, ICID, New Delhi, 2nd Ed.1996.
- NOVÁK, V., HAVRILA, J. 2006. Method to estimate the critical soil water content of limited availability for plants. *Biologia*, (Bratislava), 61 / Suppl. 19, 289 –293.
- NOVÁK, V. 2012. *Evapotranspiration in the Soil – Plant – Atmosphere System*. Springer Science + Bussiness Media Dordrecht, pp.253.
- ŠÚTOR, J., GOMBOŠ, M., MATI, R. 2005. Kvantifikácia pôdneho sucha a jej interpretácia. *Acta Hydrologica Slovaca*, v.6, 299 – 306.
- ŠÚTOR, J. 2006. Prognóza pôdneho sucha. *Acta Hydrologica Slovaca*, v.7, 176 –182.

RICHARDS, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium. *Physics*, 318 – 333.

RICHARDS, L.A., WALDLEIGH, C.H. 1952. Soil water and plants growth. In: *Soil physical conditions and plant growth*. Am. Soc. Agron. Monograph 2: 13 pp

VÁŠA, J., DRBAL, J. 1975. Retence, pohyb a charakteristiky půdní vody, v-131, VÚV Praha.

VEIHMEYER, F.J., HENDRICKSON, A.H. 1928. "Soil moisture at permanent wilting of plants". *Plant Physiol.* 3 (3): 355–357

VIDOVIČ, J., NOVÁK, V. 1987. Závislosť úrody kukurice na evapotranspirácii porastu. *Rostlinná výroba*, 33, No.6, 663-670.

Pod'akovanie. Táto publikácia vznikla s podporou projektov VEGA (2/0032/13), ITMS 26240120004 Centra excelentnosti integrovanej protipovodňovej ochrany územia a s podporou operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Kontakt:

Ing. Viliam Novák, DrSc

Ústav hydrológie SAV

Račianska 75

83201 Bratislava, Slovensko

e-mail: novak@uh.savba.sk, tel: +421249268249