

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET**

IVAN STUPNIŠEK

**PRIMJENA HIPERSPEKTRALNE
SPEKTORADIOMETRIJE U KVALITATIVNOJ PROCJENI
SPEKTRALNIH ZNAČAJKI TLA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2012.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
AGRONOMSKI FAKULTET**

IVAN STUPNIŠEK

**PRIMJENA HIPERSPEKTRALNE
SPEKTORADIOMETRIJE U KVALITATIVNOJ PROCJENI
SPEKTRALNIH ZNAČAJKI TLA**

DIPLOMSKI RAD

Mentor : Ivana Šestak

Zagreb, 2012.

**Mentor : Doc.dr.sc. Ivana Šestak, Zavod za opću proizvodnju bilja Agronomski fakultet,
Sveučilište u Zagrebu**

Ovaj diplomski rad ocijenjen je i obranjen dana _____,
ocjenom _____, pred povjerenstvom u sastavu:

1. **Doc.dr.sc. Ivana Šestak** _____
Docent, Zavod za opću proizvodnju bilja Agronomskog fakulteta u Zagrebu

2. **Prof.dr.sc. Milan Mesić** _____
Izvanredni profesor, Zavod za opću proizvodnju bilja Agronomskog fakulteta u
Zagrebu

3. **Vedran Rubinić, dipl.ing.agr.** _____
Asistent, Zavod za pedologiju Agronomskog fakulteta u Zagrebu

ZAHVALA

Želio bih zahvaliti mentorici doc. dr. sc. Ivani Šestak što je svojim sugestijama i prijateljskim pristupom uspjela potaknuti veliki interes za navedenu temu i što nikada nije sumnjala u mene.

Hvala prof.dr.sc. Milanu Mesiću što je prihvatio prijedlog da se diplomski rad izradi na uzorcima s njegovog projekta, što se interesirao za napredak ovog rada i poticao me.

Vedranu Rubiniću, dipl. ing. za prijateljski odnos, savjete i dostupnost u bilo koje doba.

Dariji Bilandžiji, dipl.ing. što me svojim savjetima poticala i ohrabivala.

Dr. sc. Aleksandri Jurišić za ugodnu radnu atmosferu prilikom boravka u laboratoriju.

Doc.dr.sc. Željki Zgorelec za dostupnost i savjete.

Prijateljima i kolegama Leni, Ireni, Anji, Maji J., Maji V., Ivani, što smo uvijek dijelili sreću i tugu ispita, ugodne i nezaboravne studentske dane.

Veliko hvala prijatelju Domagoju, koji je uvijek bio za mene dostupan i koji mi je svojim iskustvom dao iskrene i hvale vrijedne savjete.

Ivi i Zoranu što su uvijek bili tu za mene.

Nećacima Matei i Marku koji su me iznova svojom zaigranošću podsjećali da ništa nije nesavladivo i teško.

Hvala mojim sestrama Andrei i Danijeli, baki Mariji, što su bile velika potpora i nikada nisu sumnjale u ispravnost mojih odluka.

Posebno veliko hvala mojim roditeljima Ivanu i Višnjici na strpljivosti, što su mi pružali slobodu odlučivanja i nikada se nisu bunili.

Neizmjereno Vam hvala na bezuvjetnoj potpori.

U Zagrebu, 18.prosinca, 2012.

SAŽETAK

Metode daljinskih istraživanja danas se sve više koriste u svrhu praćenja stanja okoliša i unapređenja gospodarenja poljoprivrednim zemljištem. Pojedine pedološke značajke i procesi u tlu mogu se uočiti hiperspektralnom refleksijom elektromagnetskog zračenja u vidljivom i blisko infracrvenom području spektra s površine uzorka mnogo brže, jeftinije i nedestruktivno u usporedbi sa standardnim laboratorijskim analizama, ali uz manju točnost predikcije. Spektralni podaci sadrže informaciju o organskom i mineralnom sastavu tla - osnovnim građevnim jedinicama tla. Prema tome, mogu biti korisni za praćenje promjena u kvaliteti i plodnosti tla, osobito u okviru precizne poljoprivrede za unaprjeđenje gospodarenja inputima u uzgoju bilja. Glavni potencijal hiperspektralne VNIR spektroskopije tla u praktičnoj primjeni je izrada spektralnih baza podataka za predviđanje i kartiranje pedoloških značajki na svim prostornim razinama u svrhu donošenja odluka u gospodarenju tlom i biljnoj proizvodnji. Cilj istraživanja bio je procijeniti mogućnost korištenja hiperspektralne VNIR spektroskopije u kvalitativnoj analizi spektralnih karakteristika tla u okviru projekta „Gnojidba dušikom prihvatljiva za okoliš“ (Voditelj projekta: Prof.dr.sc. Milan Mesić; 178-1780692-0695, MZOŠ). Količina 200 zrakosuhih i usitnjenih uzoraka tla uzetih nakon žetve ozime pšenice 2010. godine skenirano je spektrometrom FieldSpec®3 (ASD Inc., USA), kako bi se utvrdile razlike u spektralnom odazivu tla koje je tretirano različitim količinama mineralnog dušika (0-300 kg N/ha). Metodom hiperspektralne spektrometrije moguće je pratiti dinamiku dušika, ugljika, humusa, pH. Posebnu pozornost treba obratiti na pH koji je u određenim varijantama diktirao odaziv refleksijske krivulje, razlog čemu je i ograničen raspon valnih duljina navedenog spektrometra koje se kreću od 350 nm - 1050 nm. Ostali faktori koji su utjecali na varijaciju spektra jesu: više ili manje zbijene čestice tla, boja tla, prisutnost gline, kao i željezovih iona zbog oksido redukcijskih procesa.

Ključne riječi: hiperspektralna spektrometrija, refleksija elektromagnetskog zračenja, pseudoglej, dušična gnojidba

ABSTRACT

Methods of remote sensing are increasingly used for the purpose of environmental monitoring and improvement of agricultural land. Certain soil features and processes in the soil can be observed by hyperspectral reflectance of electromagnetic radiation in the visible and near infrared region of the spectrum from the surface of the sample much faster, cheaper and more non-destructive compared to standard laboratory analyzes, but with lower accuracy of prediction. Spectral data contains information on organic and mineral composition of the soil - the basic unit of soil. Therefore, they can be useful for monitoring changes in the quality and fertility of the soil, especially in the framework of precision farming inputs for improving the management of plants. The main potential of hyperspectral VNIR spectroscopy ground in the practical application is the development of spectral databases for predicting and mapping soil features at all spatial levels for the purpose of decision-making in soil management and crop production. The aim of the research was to evaluate the possibility of using hyperspectral VNIR spectroscopy for the qualitative analysis of the spectral characteristics of the soil within the project "Nitrogen fertilization acceptable for the environment" (Project Leader: Prof. Milan Mesic, Phd, 178-1780692-0695, MSES). 200 soil samples dried in air and crushed were taken after harvest of winter wheat in 2010. and scanned with FieldSpec ®3 spectroradiometer (ASD Inc., USA) to identify differences in the spectral response of the soil which was treated with different amounts of mineral nitrogen (0-300 kg N / ha). Using hyperspectral spectroradiometer is possible to monitor the circulation of nitrogen, carbon, organic matter, pH. Particular attention should be paid to the pH, which in certain variants dictated reflective response curves, the reason being the limited range of wavelengths above spectroradiometer in the range of 350 nm - 1050 nm. Other factors that influenced the variation of the spectrum are: more or less compacted soil particles, the color of the soil, the presence of clay minerals and iron ions, oxidation and reduction processes.

Keywords: hyperspectral spectroradiometer, reflection of electromagnetic radiation, distric Stagnosol, nitrogen fertilization

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PREGLED LITERATURE	4
2.1. TEORETSKE OSNOVE PRIMJENE VNIR METODE	4
2.2. ISPITIVANJE SASTAVA TLA VNIR METODOM	6
3. MATERIJALI I METODE	12
3.1. LOKACIJA I EKSPERIMENTALNI DIZAJN	12
3.2. PSEUDOGLEJ – OSNOVNE KARAKTERISTIKE TLA NA POKUSNOJ POVRŠINI ...	15
3.3. UZORKOVANJE TLA I SPEKTRALNA MJERENJA	17
3.4. OPIS INSTRUMENTA - FIELD SPEC®3 (ASD INC., USA)	19
4. REZULTATI I RASPRAVA	23
4.1. VIZUALNA INTERPRETACIJA SPEKTRALNIH PODATAKA	23
PRILOG 1	32
PRILOG 2	33
PRILOG 3	34
PRILOG 4	35
PRILOG 5	36
5. ZAKLJUČAK	37
6. LITERATURA	38
7. ŽIVOTOPIS	41

1.UVOD

Najznačajniju, primarnu ulogu u uzgoju bilja ima tlo. Njegova je proizvodna uloga opskrba biljke vodom, zrakom i hranjivima. Ovi parametri određuju plodnost tla. Plodnost tla je stanje tla u izravnom odnosu sa sposobnošću snabdijevanja biljaka biogenim (nepodnim) elementima ishrane. Za opisivanje produktivnosti koriste se razni parametri i dijele se na:

1. Jednostavne kao što je pH, dubina tla, nagib zemljišta, količina oborina, mikroklima, itd.
2. Složene koji predstavljaju interakciju nekoliko jednostavnih parametara, npr. prirodna plodnost, kapacitet tla za vodu, propusnost tla (Vukadinović, 2012).

Plodnost omogućava fotosintezu, ključni proces za život na Zemlji (Bašić, 2007). Tlo je značajan resurs u proizvodnji hrane, vlakana i energije. Tlo regulira kretanje vode, te predstavlja prirodni filter za metale, hranjive tvari i neke kontaminante koji se pojavljuju u okolišu. Biološko je stanište mnogim biljnim i životinjskim vrstama, te temelj na kojem su izgrađene brojne građevine i gradovi. Tlo ima važnu ulogu u sprječavanju globalnog zagrijavanja, jer se u tlu odvija sekvestracija ugljika, te se tako reducira atmosferski ugljikov dioksid, jedan od stakleničkih plinova (Stenberg i sur., 2010). Sposobnost tla za obavljanjem tako važne uloge ovisi o njegovoj strukturi, sastavu, kemijskim, biološkim i fizikalnim svojstvima koji su prostorno i vremenski promijenjivi. Iz tog se razloga pojavila potreba za razvijanjem učinkovitog sustava praćenja stanja tla koji bi mogao pomaknuti granice u dosadašnjem načinu gospodarenja tlom.

Hiperspektralna spektrometrija je tehnika u preciznoj poljoprivredi koja danas zauzima sve značajnije mjesto u gospodarenju tlom. Precizna poljoprivreda predstavlja pomak u poljoprivrednoj proizvodnji jer se radi o visokotehnološkom sustavu, a sve u vidu postizanja veće proizvodne efikasnosti, uz primjenu nedestruktivnih metoda. Precizna poljoprivreda slijedi princip strogo optimiziranog upravljanja poljoprivrednim poslovanjem. Vjeruje se da barem 16 posto troškova otpada na neefikasne planove, utrošak vremena, rasipavanje materijala što se primjenom precizne poljoprivrede može izbjeći (www.topconpa.hr).

Takva informacijsko-komunikacijska tehnologija omogućava identifikaciju, analizu i upravljanje raznim varijablama ključnima za uzgoj poljoprivrednih kultura i obradu zemljišta. Dosadašnja iskustva pokazuju vrlo zadovoljavajuću razinu uspješnosti primjene novih tehnologija. Nove tehnologije potrebne su za uspješno udovoljavanje sve većoj potrebi zaštite okoliša, smanjenju utroška vremena i troškova, čime se povećava efikasnost proizvodnje, koja je ključna uzimajući u obzir gospodarske uvjete. Time se otvara prilika poljoprivrednicima za

promišljenijim načinom razvijanja strategije razvoja njihovih gospodarstava, koncerna itd., čime se s druge strane otvara mogućnost unaprjeđenja drugih aktivnosti poput marketinga, raznih promocija, kako bi se povećao standard poljoprivrednika i povećala konkurentnost u današnje vrijeme sve većeg globalnog razvoja. Tehnikama koje se primjenjuju u preciznoj poljoprivredi izbjegava se pretjerano zagađenje okoliša jer se smanjuje i prekomjerna primjena kemikalija, čija neracionalna primjena može izazvati onečišćenje tla za desetljeća. Nažalost, tlo je jedan od najugroženijih resursa današnjice.

Primjena daljinskih istraživanja u okviru precizne poljoprivrede u Hrvatskoj je u začecima, no može odigrati važnu ulogu poljoprivrednicima u donošenju odluka vezanih za gnojidbu i obradu tla. U usporedbi sa standardnim laboratorijskim analizama takav pristup je mnogo brži, jeftiniji i nedestruktivan. Klasične laboratorijske analize predstavljaju skup proces, osobito kod velikih površina, što zahtjeva financijsko i vremensko opterećenje, stoga primjena mjerenja elektromagnetskog zračenja (EM) u obliku VNIR (engl. visible and near infrared ili vidljive do blisko infracrvene) refleksije tla pruža dobru alternativu klasičnim metodama. Mjerenja se mogu provesti tijekom par dana, a kroz to razdoblje moguće je obraditi područje od minimalno 6 ha (Miltz i Don, 2012). Glavni problem *in situ* istraživanja može biti vlažnost tla, jer može prikriti, „zamaskirati“ određene točke spektra tzv. apsorpcijske pikove, pa se rezultati mogu krivo protumačiti ili mogu izostati određene reference. Pojedine pedološke značajke i procesi u tlu mogu se uočiti hiperspektralnom refleksijom elektromagnetskog zračenja u vidljivom i blisko infracrvenom području spektra s površine tla. Upotrebom VNIR tehnologije se ne uspoređuju samo dobiveni parametri već spektralni podaci sadrže i šire informacije o mineralnom i organskom sastavu tla, kao osnovnim građevnim jedinicama tla. Postoji velik interes za praćenje količine ukupnog dušika i ugljika u tlu i određenih promjena koje se odvijaju. Učinkovita gnojidba dušikom je od presudne važnosti jer ima značajan utjecaj na prinos, adekvatnu zaštitu okoliša, povoljnu mikrobiološku aktivnost tla. Povoljna mikrobiološka aktivnost dovodi do poboljšanja učinkovitosti usvajanja, akumulacije i iskorištenja dušika i ugljika.

Senzori VNIR tehnologije koriste refleksiju elektromagnetskog zračenja za praćenje promjena u tlu. Danas je primjena daljinskih istraživanja (engl. remote sensing) u agronomiji razvijena u obliku satelitskih i zračnih snimaka, kao i terenske spektroskopije te je izuzetno napredovala zadnjih nekoliko desetljeća. Danas se ubrzano radi na poboljšanju korisničkih sučelja na konzolama precizne poljoprivrede, pri čemu imperativ postaje lakoća korištenja sustava te jednostavnost prihvaćanja nove tehnologije (www.topconpa.hr).

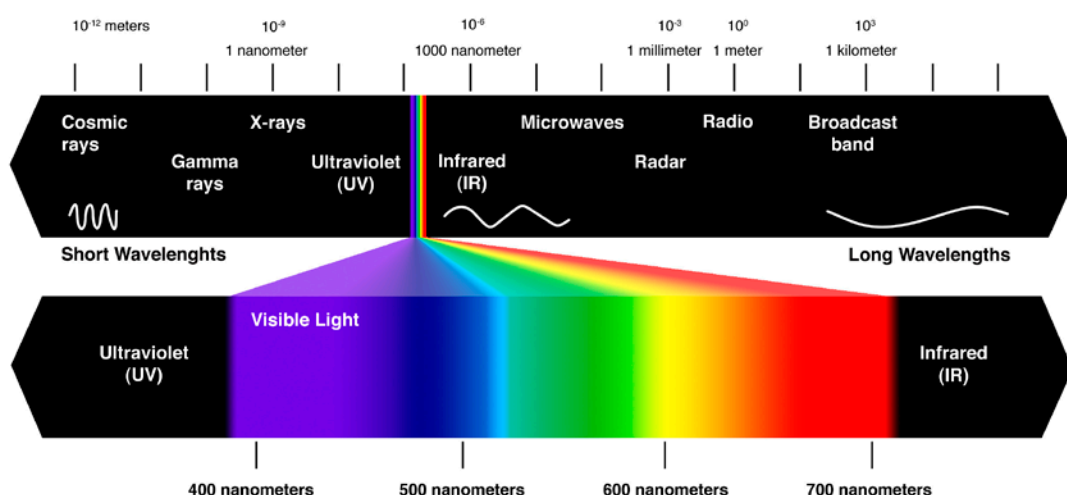
Cilj ovog rada je utvrditi mogu li se upotrebom spektrometra FieldSpec®3 utvrditi promjene u sastavu tla nakon višegodišnje gnojidbe s 10 varijanti mineralne dušične gnojidbe, odnosno ispitati mogućnosti ove eksperimentalne metode kao dodatnog alata u procjeni utjecaja različitih količina dušične gnojidbe na značajke tla.

2. PREGLED LITERATURE

2.1. Teoretske osnove primjene VNIR metode

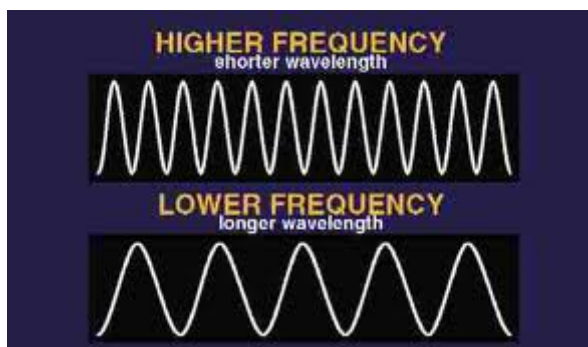
Svjetlost je elektromagnetsko zračenje. Ono što je ljudskom oku vidljivo je samo sićušni dio cijelokupnog elektromagnetskog spektra (Slika 1). Elektromagnetska zračenja međusobno se razlikuju valnom duljinom, a nastaju kada se električni naboji kreću u elektromagnetskom polju (hr.wikipedia.org).

Atom odašilje energiju kada je neki od njegovih elektrona potaknut dodatnom energijom izvana. Zračenje pobuđenih elektrona predočavamo valom. Udaljenost između dva vrha vala dvaju susjednih valnih bregova je valna duljina. Kratke valove tako primjerice imaju vidljiva svjetlost, ultraljubičasto (UV) zračenje, te x zrake, dok televizijski i radio prijemnik, radar i infracrvena svjetlost imaju duge valove. Budući da ljudsko oko ne detektira veliki dio elektromagnetskog zračenja koriste se razni instrumenti poput spektrometra, satelita i sl. UV zrake imaju kraće valne duljine od vidljivog dijela spektra koji nosi i više energije. Kada se svi dijelovi vidljivog spektra zamijećuju čine bijelu svjetlost, a kada takva svjetlost prolazi kroz prizmu rastavlja se na različite boje, te je tako boja objekta kojeg vidimo onaj dio spektra koji se odbija, a ostale se boje apsorbiraju.



Slika 1. Elektromagnetsko zračenje i spektar (Izvor: premediablog.widen.com)

Zračenje manje energije ima manju učestalost ili frekvenciju, ali veću valnu duljinu, a ona s više energije ima veću frekvenciju ali manju valnu duljinu (Slika 2).



Slika 2. Veza između frekvencije i valne duljine (Izvor: teacheratsea.wordpress.com)

Odnos između valne duljine i frekvencije jednostavno možemo prikazati slijedećom formulom :

$$\text{valna duljina} = \text{brzina svjetlosti} / \text{frekvencija}$$

Frekvencija je broj kompletnih valova ili valnih duljina koje prolaze kroz određenu točku u svakoj sekundi ili pojednostavljeno to je broj titraja u jednoj sekundi. Svjetlost putuje istom brzinom, ali svaka boja ima drugačiju frekvenciju i valnu duljinu.

Radiometrija je područje u znanosti kojom se mjeri elektromagnetsko zračenje bilo kojeg spektra, iako se u praksi ograničava na mjerenje infracrvenog, vidljivog i ultraljubičastog zračenja pomoću optičkih instrumenata (www.helios32.com). Ultraljubičasto zračenje nevidljivo je ljudskom oku, a dijeli se obzirom na valnu duljinu. U ovome radu pri korištenju metode spektrometrije najznačajnije je ultraljubičasto A ili dugovalno područje raspona valnih duljina od 315 – 400 nm, potom vidljivi dio spektra raspona od 400 – 700 nm i blisko infracrveno područje raspona od 700 – 1400 nm.

Spektri od 2500-25000 nm koji su u srednjem i termalnom infracrvenom području se koriste za ispitivanje ukupnog organskog sastava tla jer se najbitnije spektralne osobine nalaze u ovom području. Pojedine sastavnice organske komponente tla najbolje se razlikuju od 700-1000 nm, te u blisko infracrvenom (1000-2500 nm) području. Minerali gline imaju različite

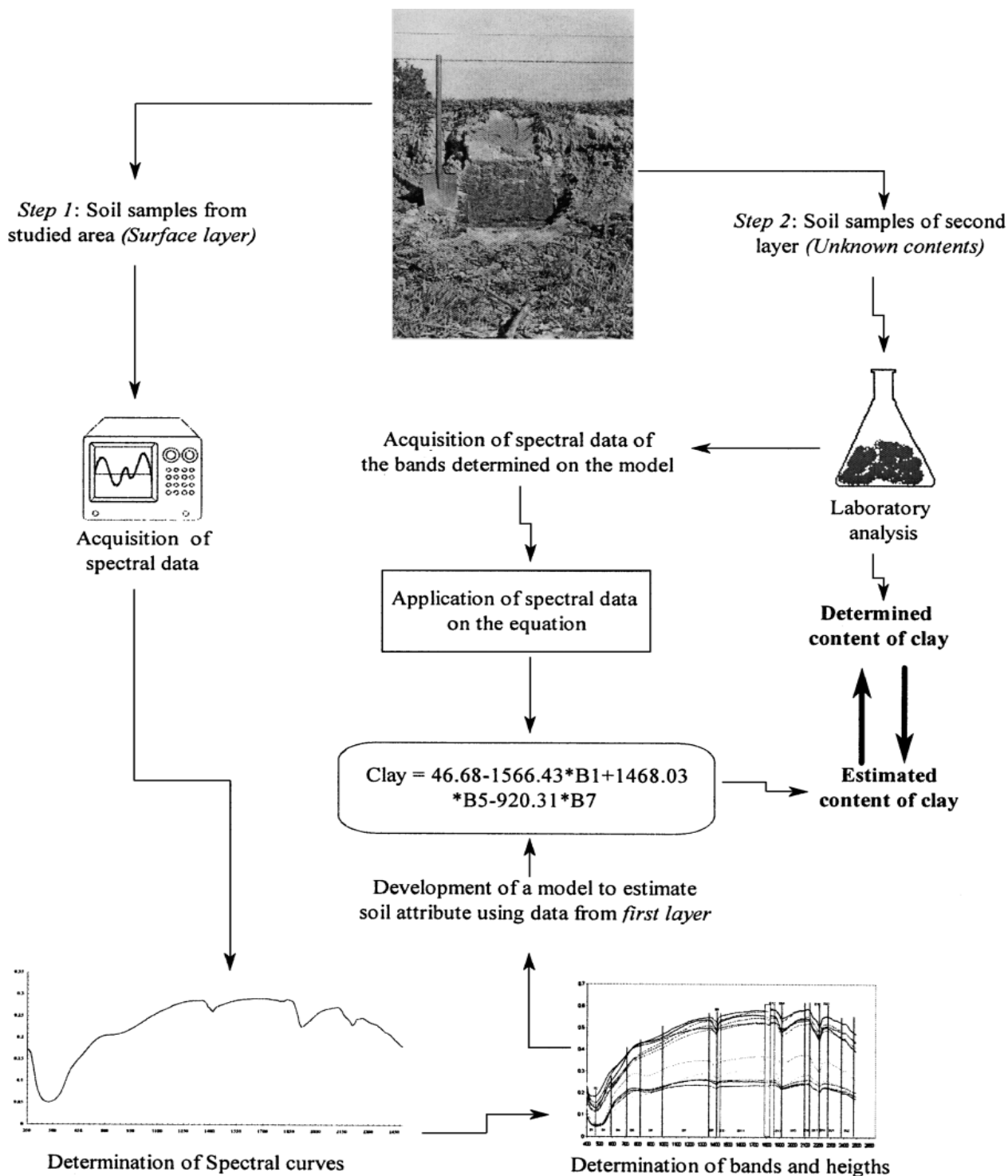
spektralne oznake u blisko infracrvenom području zbog jake apsorpcije sulfatnih, karbonatnih i hidroksilnih iona. Vidljivi spektar (VS); (400-700 nm) najčešće se koristi za određivanje boje tla ili različitih vrsta željezovih oksida i hidroksida, dok se metali u elementarnom obliku ne mogu zamijetiti u ovom području spektra (Shepherd i Walsh, 2002).

Osnovni princip spektroskopije temelji se na prolasku energije zračenja koje je reflektirano ili raspršeno s krutog, tekućeg ili plinovitog medija. Kada fotoni ulaze primjerice u mineral, neki se reflektiraju sa zrnate strukture, neki prolaze kroz zrnatu strukturu, a neki budu apsorbirani. Oni fotoni koji reflektiraju se rasprše. Raspršeni fotoni mogu ući u neku drugu zrnatu strukturu ili se mogu raspršiti s podloge te tako mogu biti zamijećeni i mjerljivi (Clark, 1995). Apsorpcijski koeficijent pri određenoj valnoj duljini je osnovni parametar koji opisuje interakciju fotona s promatranim materijalom, tj. tlom. Ta metoda kao i druge spektroskopske metode funkcioniraju po principu Beer-Lambertovog zakona koji pokazuje da je količina apsorbiranog zračenja proporcionalna koncentraciji apsorbirajućih čestica, uz točno definirane uvjete.

2.2. Ispitivanje sastava tla VNIR metodom

Pojedini parametri tla koji čine plodnost tla ili mehanički sastav, analiziraju se u laboratoriju. No obzirom da su takve standardne metode dugotrajne i zahtjevaju nekoliko faza priprema, krenulo se upotrebom VNIR tehnologije kako bi se što brže i jednostavnije moglo detektirati stanje mjerenih tala i kako bi se svi navedeni parametri mogli odrediti istovremeno.

Usporedni tok dviju metoda analize tla (spektoradijometrija i standardna laboratorijska analiza) prikazani su na slici 3. Vidljive su aktivnosti od uzimanja uzoraka, njihove obrade, određivanja sadržaja gline, pa do kalibracijskih i validacijskih modela, primjenom statističkih jednadžbi.



Slika 3. Shematski prikaz usporedbe dviju metoda analize tla (spektoradiometrija i klasična metoda; Izvor: Dematte i Nanni, 2006)

Shepherd i Walsh (2003) navode devedeset postotnu uspješnost u svrstavanju tla u različite kategorije plodnosti (engl. Fertility class) koristeći navedenu metodu.

Prema Wetterlind i sur. (2008), metoda vidljive i blisko infracrvene spektroskopije u istraživanjima sastava tla do sada se koristila za određivanje:

- sastava gline i količine vlage u tlu,
- određivanje količine ugljika i organske tvari u tlu,
- za istraživanje promjena sastava tla nakon dušične gnojidbe,
- za određivanje mehaničkog sastava tla,
- za praćenje mineralizacije dušika u anaerobnim i aerobnim uvjetima u tlu,
- za procjenu apsorpcije dušika od strane različitih usjeva,
- praćenje stope depozicije riječnih nanosa.

Spektralno očitavanje dobiva se na način da se zračenje koje sadrži određene valne duljine usmjeri na uzorak tla. Ovisno o sastavu tla upadne frekvencije spektra uzrokuju vibraciju veza pojedinih molekula, a veze između molekula se izvijaju ili rastežu i pri tome apsorbiraju upadno zračenje sa specifičnim kvantom energije koji odgovara razlici između dvije energetske razine. Frekvencija s kojom je apsorbirana energija daje reducirani reflektirani signal koji se u detektoru registrira kao % refleksije (R). Kvant energije je ovisan o frekvenciji koja je obrnuto proporcionalna valnoj duljini. Apsorpcija ili refleksija pri određenoj valnoj duljini pri kojoj se zračenje apsorbira ovisi o kemijskom sastavu, raznim kemijskim grupama, uvjetima okoline i temperaturi. Mjerenje apsorpcije ili refleksije omogućuje detekciju velikog broja raznih molekula koje sadrže iste veze. Odaziv apsorpcijskog spektra promatranog materijala stvara krivulju koja se koristi u analitičke svrhe. Pri interakciji bliskog infracrvenog zračenja i srednjeg infracrvenog zračenja vibracije među molekulama su te koje daju sliku dok su u vidljivom dijelu spektra uglavnom ekscitacije elektrona.

Stenberg i sur. (2010) ustvrdili su da je variranje spektra direktna posljedica varijacije spektralnog odaziva -OH, -SO₄ i -CO₃ grupa. pH tla daje različiti spektralni odaziv zbog više čimbenika kao što je prisutnost gline, minerala, puferskog kapaciteta organske tvari i mikrobioloških procesa u tlu. Zbog širokih i preklapajućih bendova u vidljivom i bliskom infracrvenom području spektralna očitavanja se teže analiziraju nego u srednjem infracrvenom području (Stenberg i sur., 2010).

Spektralna refleksija tla pokazuje najveći odaziv u rasponu od 1000 nm - 2500 nm. Ispod 750 nm spektralna refleksija tla je slabija. Većina uzoraka tla pokazuje viši spektralni odaziv u rasponu od 1400 nm - 1900 nm, ali je razlog tome prisutnost vode u tlu. S isušivanjem uzoraka tla taj odaziv opada (Mccoy, 2005).

Najbitniji parametri koji određuju spektralni odaziv su sadržaj vode u tlu, tekstura tla, organska tvar, sadržaj željeza i željeznih minerala, poglavito oksida. Veličina čestica u tlu je jedan od glavnih čimbenika koji utječe na zadržavanje vlage. Zajedno veličina čestica i sadržaj vlage djeluju na spektralni odaziv tla na način da što je tlo vlažnije i čestice su zbijenije spektralni odaziv će biti jači zbog veće površine apsorpcije i jače refleksije. Suprotno, kod manje zbijenih čestica i manje zastupljenosti vlage manja je površina apsorpcije te je i refleksija manja.

Apsorpcija je veća kada tlo sadrži veće količine organske tvari, a spektralna refleksija se smanjuje s povećanjem organske tvari. Organska tvar u tlu najbolji spektralni odaziv daje u vidljivom spektru. Organska tvar utječe na boju i spektralni odaziv tla. Već 5 % organske tvari u tlu daje tamniju boju, a smanjenje organske tvari čini tlo svjetlijim (smeđkasti i sivi tonovi). Međutim ograničenje ovog odnosa se postiže kad je količina organske tvari veća od 5%. Iznad ove koncentracije nema varijacija u spektralnom odazivu.

Parametri koji također utječu na spektralni odaziv su i druge mineralne tvari poput željezovog oksida i drugih oksida metala koje daju boju (apsorpciju-refleksiju u VS). Željezovi minerali i oksidi imaju najveći spektralni odaziv između 560 nm i 830 nm, ovisno od oksidacijskog statusa željeza. Glina najbolje apsorbira oko valne duljine od 2210 nm. Slično kao i sa željezovim ionom i različite vrste gline u reducirajućim uvjetima pokazuju specifični spektralni odaziv (Mccoy, 2005).

Većina spektralnih očitavanja uzoraka tla generalno pokazuju tri apsorpcijska pika: oko 1400, 1900 i 2200 nm i nekoliko manjih pikova na 2200 i 2500 nm koji su uglavnom posljedica vibracija C-H, N-H i O-H veza. Organske tvari u tlu koje uglavnom pokazuju refleksijske karakteristike (tzv. kemofori, engl. chemophores) su klorofil, glukoza, ulja, celuloza, lignin, pektini i huminske kiseline i to u spektralnom rasponu od 400-2500 nm (Stevens i sur., 2006). Organska tvar, prah, ukupno željezo, glina, pijesak i minerali poput kvarca, magnetita, kaolinita, smektita su najvažniji čimbenici koji utječu na spektralno očitavanje i razlikovanje pojedinih tipova tla. Prisutnost organske tvari može „zamaskirati“ prisutnost željeza i reducirati njegov intenzitet (Dematte i sur., 2004).

Autori Shepherd i Walsh (2002) navode da se metodom VNIR-a može mjeriti podložnost tla eroziji, ali i određivati sastav lignina i polifenola, sastav raspadnutog lisnog materijala u uzorcima tla.

Nadalje, mnogi radovi spominju važnost stvaranja baza podataka spektralnih razlika za različite tipove tla na velikim poljoprivrednim površinama (engl. spectral libraries). A zajedno s razvojem GIS-a (engl. Geographic information system) i GPS-a (engl. Global position system) čija interpolacija s bazama podataka uključuje predviđanje pedoloških svojstava na velikim područjima posebice primjenom satelitskih snimaka (npr. Landsat TM).

Shepherd i Walsh (2003) uspješno prikazuju količinu fosfora u bazenu rijeke Nyando (3500 km²), kao mjeru erozije i depozicije erodiranog materijala koja je na tom području intenzivna još od 1960-tih godina. Na kartama koje autori prikazuju npr. dobro se vide i područja koja nisu erodirana i sadrže visoku razinu fosfora i još uvijek su pogodna za proizvodnju kukuruza. Mjerenja VNIR spektroskopijom vrlo visoko koreliraju sa podacima standardnih laboratorijskih analiza (Dematte i sur., 2004; Nanni i Dematte, 2006).

Waiser i sur. (2006) u svom radu su ispitali 72 uzorka tla iz Erath and Comanche County, Teksas, u spektralnom rasponu od 350-2500 nm koristeći VNIR-DRS (diffuse reflectance spectroscopy) tehniku. Ispitivane su četiri različite kombinacije sadržaja vlage u tlu i predtretmana tla. Uzorci tla u tom radu bili su prirodno vlažno tlo, *in situ* obrađeno odmah na terenu, *in situ* sasušeno tlo, razmaz vlažnog tla *in situ* i posušeno tlo. S obzirom na sadržaj vlage utvrđivali su ukupni sadržaj gline u uzorcima tla. Autori navode kako su kalibracija i validacija slabe točke digitalnog mapiranja zato što su uzorkovanje i analiza tla na takav način dugotrajna i zahtjevaju nešto veće troškove, ali uspoređujući je sa standardnim laboratorijskim analizama koje zahtjevaju još dulje vrijeme obrade i znantno su skuplje, ipak opravdavaju njeno korištenje. Sušenje uzoraka pomaže pri točnosti u određivanju količine gline, jer reducira greške koje mogu nastati zbog spektralne apsorpcije vode. Autori zaključuju da je metoda u potpunosti prihvatljiva, te iako VNIR-DRS metoda može dati dobre rezultate i u vlažnim uvjetima, sušenje i homogeniziranje uzoraka se pokazalo kao najtočnija i najbolja opcija.

Wetterlind i sur. (2008) opisuju upotrebu VNIR metode za mjerenje količine gline i organske tvari u svrhu procjene apsorpcije dušika kod različitih vrsta tala, na usjevima žitarica. Rezultati pokazuju da je metoda u potpunosti primjenjiva za ovaj tip istraživanja, iako autori navode da glavni problem na kojemu treba poraditi jest kalibracija kada se metoda primjenjuje na velikim površinama.

He i Song (2006) mjerili su dušik, fosfor, kalij, organsku tvar, pH. Rezultati su pokazali da se predikcijskim modelima može predvidjeti količina dušika, organskog materijala i pH, ali ne i količina fosfora i kalija u njihovom istraživanom tlu.

U svom radu Sorensen i Dalsgaard (2005) su prikazali objektivnu i racionalnu primjenu, kao i prednosti i slabosti upotrebe NIR (engl. near infrared spectroscopy) spektroskopije, kao brze i nedestruktivne metode, koja im je poslužila u predikcijskim modelima za utvrđivanje gline i ostalih komponenti tla. Tlo iz svih regija Danske korišteno je za NIR spektralnu kalibraciju. Cilj njihovog projekta bio je istražiti mogućnost razvijanja univerzalne kalibracije korisne za razvoj precizne poljoprivrede u Danskoj, te da pritom istraže i utjecaj različitih parametara na ukupnu točnost. Autori navode da točnost determinacije gline ovisi o kalibriranom koncentracijskom rasponu spektralnim rasponima koji su korišteni za kalibraciju kao i postupku predtretmana spektralnih podataka. Optimalna kalibracija za glinu (1-26% gline), dala je predikcijsku grešku od 1.7-1.9%, dok je pogreška predviđanja za optimalni, širi raspon kalibracije (3-74% gline) procijenjena na 3.4%. Za usporedbu, devijacija standarda reproducibilnosti referentnom metodom je 1,3%. Za ugljik, mulj i pijesak, pogreške u predviđanju su 0,42%, 4,6% i 5,5%. Rezultati su pokazali da je NIR spektroskopija potencijalno brza i učinkovita tehnika za određivanje sadržaja gline u tlu. Tehnika također može biti korisna u predviđanju drugih veličina frakcije čestica. Autori danskog istraživanja utvrdili su da dobiveni rezultati ukazuju da se upotrebom NIR metode mogu determinirati određeni anorganski parametri koji se mogu dovesti u posrednu vezu s određenim organskim komponentama istog uzorka.

Wetterlind i sur. (2010) izvršili su kalibraciju VIS-NIR za predikciju teksture tla, organske tvari, ukupnog N, pH i biljkama dostupnog P, K, Mg na 25 uzoraka i dvije različite lokacije. U nedostatku validacijskih uzoraka, napravljena je usporedba dviju različitih mogućnosti kako bi se smanjile greške i raznolikost dobivenih rezultata. Ograničili su se na validacijske uzorke prijašnjih mjerenja kojih je bilo između 130-150. Uspoređeno je šest različitih metoda odabira kalibracijskih uzoraka, uzetih iz tri različite baze podataka sa šireg područja s većim varijacijama pedoloških parametara. Dobiveni rezultati ukazali su da je za predikcijske modele pH i biljkama dostupnog P, K, Mg potrebno više od 25 uzoraka, dok je za predikciju pouzdanih kalibracijskih modela za glinu, pijesak, organsku tvar te ukupni N i C dovoljan navedeni broj uzoraka.

3. MATERIJALI I METODE

3.1. Lokacija i eksperimentalni dizajn

Istraživanje je provedeno na stacionarnom poljskom pokusu (Slika 4), u sklopu hidromelioriranog poljoprivrednog zemljišta kojeg koristi tvrtka Moslavka d.d. (Agrokor) u području zapadno-panonske podregije Hrvatske (45°33' N, 16°31' E). Uzorci su prikupljeni 2010. godine i pripadaju tipu tla pseudoglej. Teren karakterizira ravan reljef s prosječnom nadmorskom visinom 97.2 m. Šire područje obuhvaća umjerena kontinentalna klima s prosječnom godišnjom temperaturom od 10.7°C (Tablica 1) te prosječnom godišnjom količinom oborina od 865 mm. Godišnji hod oborina (Slika 5) također je bio izuzetno varijabilan u odnosu na prosjek. Na temelju praćenja količine oborina (2010) i usporedbom s referentnim razdobljem od 1965.-1990. (Tablica 2) utvrđeno je da se 2010. godina smatra ekstremno vlažnom u odnosu na prosjek (Mesić i sur., 2011).

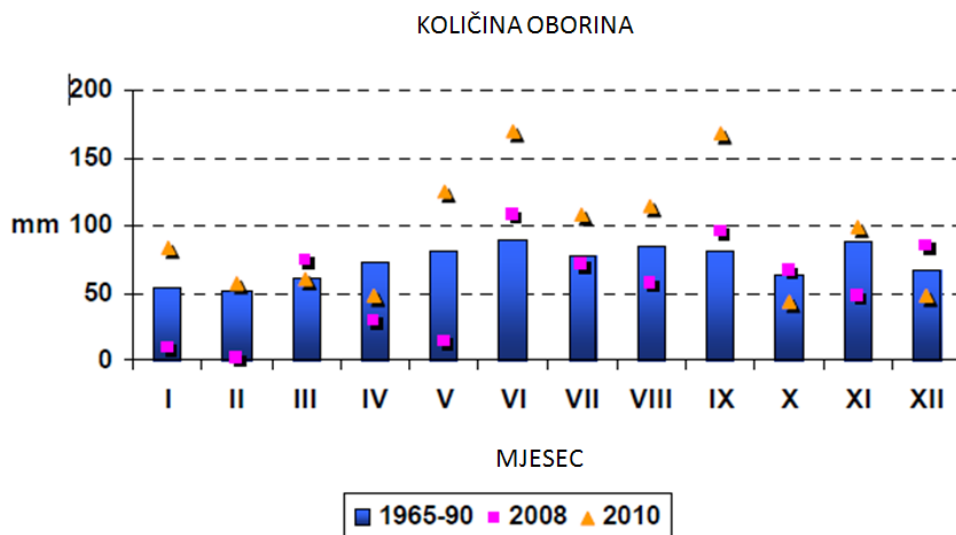


Slika 4. Pokusna površina na kojoj su prikupljeni uzorci tla podjeljena s obzirom na varijante gnojidbe (Izvor: Šestak, 2011)

Tablica 1 - Srednja mjesečna i godišnja temperatura zraka, °C

Godina	Mjeseci												Sred- nja
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Prosje- k 1965-90.	-0,2	2,0	6,6	11,0	15,9	19,0	20,8	19,8	16,1	10,8	5,3	1,4	10,7

(Izvor: Mesić i sur., 2011)



Slika 5. Dijagram oborina u razdoblju od 1965-2010 (Izvor: Šestak, 2011)

Tablica 2 - Odstupnje mjesečnih oborina u 2010. od prosjeka

Razdoblje	Količina oborina, mm		
	Ukupno 2010.	1965-90.	Razlika
Siječanj	83,8	53,1	30,7
Veljača	56,4	51,4	5
Ožujak	59,6	59,4	0,2
Travanj	47,1	72,7	-25,6
Svibanj	123,9	80,1	43,8
Lipanj	170,0	89,5	80,5
Srpanj	108,3	76,9	31,4
Kolovoz	113,1	85,3	27,8
Rujan	167,3	80,3	87
Listopad	43,0	63,5	-20,5
Studeni	99,0	87,3	11,7
Prosinac	48,4	65,4	-17
Ukupno	1119,9	864,9	255

(Izvor: Mesić i sur., 2011)

Pokusna površina koristi se u sklopu višegodišnjeg istraživanja utjecaja mineralne gnojidbe dušikom (N) na prinos važnijih ratarskih kultura, agronomsku učinkovitost gnojidbe te ispiranje nitrata, u okviru znanstvenog projekta “Gnojidba dušikom prihvatljiva za okoliš” (Voditelj projekta: Prof.dr.sc. Milan Mesić; 178-1780692-0695, MZOŠ). Pokus ukupne površine od oko 4 ha postavljen je prema shemi bloknog rasporeda (PRILOG 5) s 10 varijanti mineralne gnojidbe u 4 ponavljanja (Šestak, 2011). Veličina osnovne parcele za svaku varijantu je 30 x 130 m, uključujući međuprostore.

Pokusne varijante uključuju:

1. Kontrola - negnojeno
2. $N_0 + P + K$
3. $N_{100} + P + K$
4. $N_{150} + P + K$
5. $N_{200} + P + K$
6. $N_{250} + P + K$
7. $N_{250} + P + K + \text{Fosfogips}$
8. $N_{250} + P + K + \text{dolomit}$
9. $N_{300} + P + K$
10. Crni ugar - obrada bez sjetve

3.2. Pseudoglej – osnovne karakteristike tla na pokusnoj površini

Tip tla je definiran kao drenirani pseudoglej, ravničarski, distrični. Pripada odjelu hidromorfni tala, klasi pseudoglej. Bez provedenih meliorativnih zahvata, pseudogleji pripadaju P3 klasi pogodnosti, odnosno radi se o tlima s velikim ograničenjima za poljoprivrednu proizvodnju. To je posebno važno tlo jer zauzima drugo mjesto po površini u Hrvatskoj (577.000 ha). Ona su općenito male plodnosti, nepovoljnog vodozračnog i toplinskog režima, siromašna fiziološki aktivnim hranjivima te plitkog aktivnog profila (Škorić, 1990).

Iako su izvan domašaja podzemnih voda (u istraživanom profilu podzemna voda nalazila se na 175 cm ispod površine tla), pod utjecajem su povremenog prekomjernog vlaženja stagnirajućom oborinskom vodom (Bogunović, 2006). Budući da se precipitacijska voda povremeno nakupljala u iluvijalnom horizontu ispitivanog područja, to je bio razlog za instaliranje drenažnog sustava u području eksperimenta.

Najizraženije fizikalno obilježje nemelioriranog pseudogleja je njegova vertikalna teksturna heterogenost, pri čemu su površinski horizonti uglavnom praškaste ilovače s povišenim udjelom praha, dok je slabo propusni horizont ilovača s dva do tri (ponekad i četiri do pet) puta većim udjelom gline (Ćirić, 1984). A i Eg horizonti imaju nestabilnu strukturu, dok je slabo propusni horizont najčešće bestrukturan (koherentan), zbog čega u mokroj fazi ima kašastu konzistenciju te je ljepljiv, dok je u suhoj fazi tvrd i zbijen (Resulović i sur., 2008).

Takva fizikalna svojstva uvjetuju specifičnosti vodnog režima (nemelioriranog) pseudogleja, u kojem razlikujemo tri faze vlažnosti tla:

1. mokra - kada su sve pore ispunjene vodom
2. vlažna – kada se vlažnost kreće između poljskog vodnog kapaciteta i točke venuća
3. suha faza – kada je vlažnost ispod točke venuća

Naizmjenično smjenjivanje mokre i suhe faze uvjetuje redukcijske i oksidacijske procese i specifičnu mramoriranost horizonta kao i tvorbu Fe i Mn konkrecija, uz nepostojanje oštre podjele na redukcijski i oksidacijski horizont (Martinović, 2000). U zoni zadržavanja stagnirajuće površinske vode su blijede mikrozone, koje su izmješane s rđastim i mrkim mazotinama i uklopinama, što zajedno daje karakteristično mramoriranje sivkastim jezičcima

u horizontu (Slika 6). Na površini strukturnih agregata je siva boja zbog redukcije, a unutar agregata je rđasta boja zbog oksidacije. Biljno-hranidbena komponenta je nepovoljna. Posebno nedostaje ukupni i fiziološki aktivni fosfor, koji se vrlo često veže na slobodno željezo u netopive željezne fosfate. Fiziološki aktivnog kalija ima nešto više zbog prapora iz kojeg je pseudoglej često nastao. Dušika također ima vrlo malo. Biološka aktivnost je slaba, jer u tlu ima vrlo malo mikroorganizama, a uglavnom prevladavaju anaerobi, te je slaba nitrifikacija, fiksatori dušika su slabo zastupljeni, a rizosfera je razvijena u površinskom dijelu profila (Bogunović, 2006). Osim fizikalnih značajki tla koje pogoduju stagnaciji vode u površinskom dijelu profila te niskog sadržaja organske tvari, glavni ograničavajući čimbenik prinosa je niska vrijednost pH tla, koja je djelomično i rezultat dugogodišnje mineralne gnojidbe dušikom, ali i niske količine organske tvari. Treba napomenuti da pH u pseudogleju raste sa dubinom tla (Mesić i sur., 2011).



Slika 6. Profil tla tipa pseudoglej (Izvor: Šestak,2011)

3.3. Uzorkovanje tla i spektralna mjerenja

Istraživanje u okviru diplomskog rada uključivalo je 200 zrakosuhih i usitnjenih uzoraka (Slika 7) tla s dubine 30 cm uzetih nakon žetve ozime pšenice u srpnju 2010. godine prema mrežnoj shemi uzorkovanja poluatomatskom kružnom sondom (Patent pending: international application No. PCT/HR2011/000021) na poljskom pokusu s 10 varijanti gnojidbe mineralnim dušikom (0-300 kg N/ha) (Karta sadržaja ukupnog dušika u tlu - PRILOG 1).



Slika 7. Uzorci tla za analizu

Ukupno je 200 uzoraka skenirano spektrometrom (FieldSpec®3, ASD, Inc, USA). Za mjerenje je korišten spektralni raspon od 350-1050 nm, s intervalom od 1.4 nm i spektralnom rezolucijom od 3 nm, koristeći umjetni izvor svjetlosti istog raspona valnih duljina kao sunčevo zračenje.

Spektralni podaci vizualno su analizirani i interpretirani u aplikaciji ViewSpec Pro 4.07. (ASD, Inc., SAD) i ENVI (Research Systems, Inc., SAD) u svrhu utvrđivanja razlika u spektralnom odazivu tla različito tretiranog mineralnom dušičnom gnojidbom.

Zrakosuhi uzorci su samljeveni, odvajani u petrijeve zdjelice (borosilikatno staklo), te su ručno snimani pri sobnoj temperaturi od 20-24°C u laboratoriju Zavoda za opću proizvodnju bilja (Slika 8).

Uzorci su analizirani u pet ponavljanja zbog dobivanja što reprezentativnijeg rezultata, obzirom da se mogu pojaviti manja odstupanja zbog umjetnog izvora svjetlosti i ljudskog faktora. Izvršeno je uprosječivanje spektara pet ponavljanja svakog uzorka, radi dobivanja prosječnog spektra, kojeg se uspoređivalo s ponavljanjima unutar varijanti, te kasnije uspoređivanja varijanti međusobno.

Svaki petnaest minuta mjerila se refleksija referentnog uzorka spektralnom (engl. NIST-traceable kalibracijska ploča poznate stabilne reflektancije, Spectralon®, Labsphere, Sutton, NH), kako bi se izvršila kalibracija uređaja (Slika 9), posebno važna ukoliko se vrši mjerenje na dosada nepoznatom uzorku. Kasnije je moguće spremanje spektralnih mjerenja u posebnu bazu, kako se za isti tip uzorka i mjerenja, u ovom slučaju tla tipa pseudoglej i razne varijante mineralne gnojidbe dušikom ne bi morao ponavljati postupak kalibracije.



Slika 8. Ručno snimanje uzoraka tla



Slika 9. Kalibracija sa NIST-traceable kalibracijskom pločom poznate stabilne reflektancije

3.4. Opis instrumenta - FieldSpec®3 (ASD Inc.,USA)

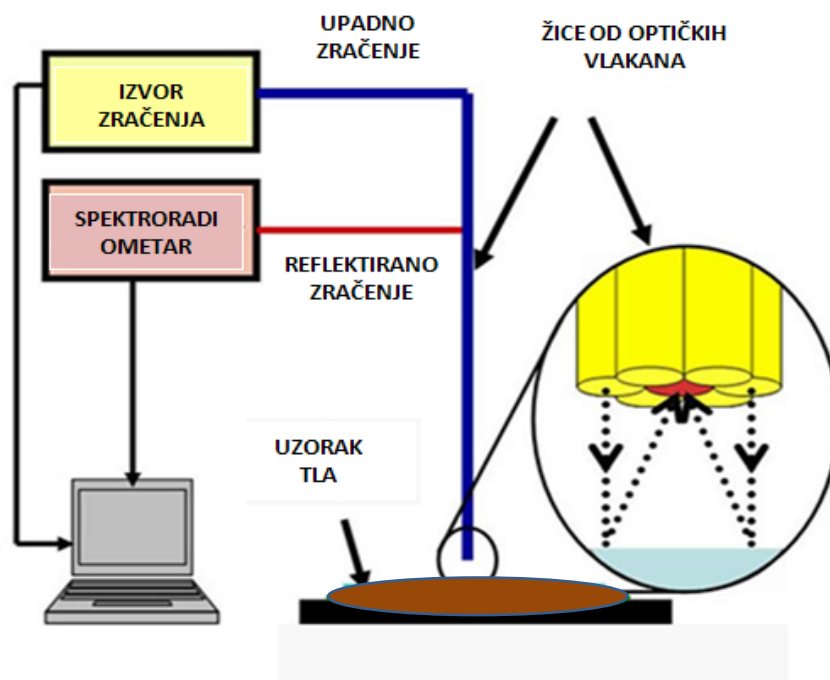
FieldSpec®3 (Slika 10) je spektrometar koji se može koristiti u raznim uvjetima, te direktno na terenu ili laboratoriju pod umjetnim osvjetljenjem. Ovaj prijenosni spektrometar omogućuje analizu spektralne refleksije u rasponu od 350 - 1050 nm, što odgovara ultraljubičastom, vidljivom do blisko infracrvenom rasponu svjetlosti (www.asdi.com).

Koristi se za nedestruktivna istraživanja tla i vegetacije u agronomiji, istraživanjima u domeni šumarstva, ekologije, fiziologije bilja, geologiji i analizi minerala, istraživanjima leda i snijega, u oceanografiji, oplemenjivanju bilja i mnogim drugim.



Slika 10. FieldSpec®3 uređaj

Prijenosni spektrometar ima mogućnost mjerenja u rasponu valnih duljina od 350-1050 nm sa intervalom detekcije od 1.4. nm i spektralnom rezolucijom od 3-700 nm. Sastoji se od dva dijela i to sonde i kompjutera povezanih optičkim kablom. Izvor zračenja je kvarcna halogena lampa snage 200-500 W i spektralne temperature od 3400 K. Spektrometar sadrži fotoelektrične detektore koji registriraju protok energije zračenja koji se vrati kao povratni signal materijala, tj. uzorka ozračenog kvarcnom halogenom lampom. Izlazni signal spektrometra kalibrira se s NIST standardima. Sustav bilježi podatke u spomenutom spektralnom rasponu (350-1050 nm), a kroz optička vlakna (Slika 11) provodi digitalnu informaciju do prijenosnog računala u realnom vremenu, na kojeg je spektrometar spojen i u kojem se podaci pohranjuju (Slika 12).



Slika 11. Shematski prikaz bilježenja podataka od mjerenja uzorka do spremanja u računalu



Slika 12. Krivulja spektralnog očitavanja uzorka tla zabilježena na prijenosnom računalu

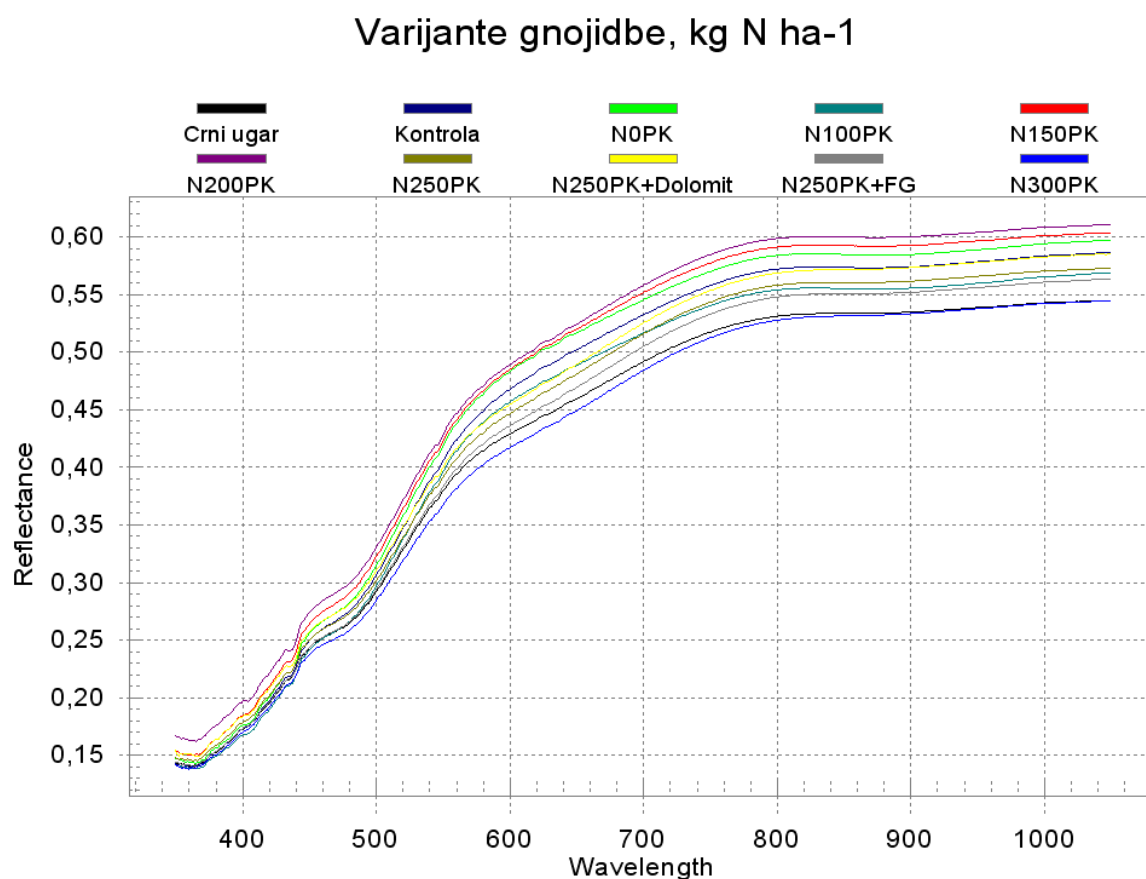
Mjerenje spektrometrom ima tri koraka. Prvo se sonda usmjerava na kalibracijsku keramičku ploču poznate stabilne refleksije (engl. NIST-traceable, Spectralon®, Labsphere, Sutton, NH) koja reflektira prosječno 98.2% upadnog zračenja (95.0-99.3%). Ovaj korak služi kalibraciji instrumenta (Šestak, 2011). Nakon toga instrument se usmjerava na uzorak i konačno spektralna refleksija uzorka se izračuna iz omjera vrijednosti refleksije svake valne duljine i upadnog zračenja izmjerenog na svakoj valnoj duljini, te izražava kao faktor refleksije.

Prednosti korištenja spektroradiometra (www.asdi.com):

1. brzina - u vremenskom razdoblju od 100 milisekundi bilježi više podataka,
2. otpornost - posebno konstruiran kako bi izdržao ekstremne uvjete terenskog rada, intenzivne temperature i druge situacije koje prate rad na terenu,
3. fleksibilnost - mogućnost polaganja na tlo ili nošenja na leđima istraživača,
4. automatizirano prikupljanje podataka, a njegovo sučelje proširuje sposobnosti omogućavajući automatizaciju u prikupljanju podataka,
5. jednostavnost korištenja kod primjene,
6. uspješno korištenje kao referentne metode pri interpretaciji satelitskih i zračnih spektralnih snimaka
7. zadovoljavajući rezultati dosadašnje primjene ovakve nedestruktivne metode

4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. Vizualna interpretacija spektralnih podatka



Slika 13. Varijante gnojidbe dušikom

Količina gnojidbe ukazuje na varijabilan odaziv spektra prema varijantama pokusa (Slika 13). Jasno je vidljivo da u rasponu refleksije od 350 - 1050 nm spektri reflektiraju po pravilu : više organske tvari - manja refleksija i obratno, manje organske tvari - veća refleksija. Niži spektar refleksije kod varijanti koje su gnojene sa N₁₀₀PK, Crni ugar, N₂₅₀PK, N₂₅₀ + fosfogips i N₃₀₀PK, mogu se protumačiti većim sadržajem organske tvari (PRILOG 3) zbog jače mineralne gnojidbe, manjim vremenskim intervalom razgradnje iste, ali i boljom mikrobiološkom aktivnošću, obzirom da i prinosi pšenice tijekom godina istraživanja

pokazuju bolje rezultate, primjerice prinos u 2010. godini (Šestak, 2011), te u odnosu na preostale varijante, veću površinu zelene mase i bolji urod.

Refleksiju Crnog ugra možemo tumačiti prirodnom obnovom organske tvari, obzirom da je to varijanta koja se obrađivala ali bez sjetve. Naravno da se mineralnom gnojidbom privremeno povećava sadržaj organske tvari, ali treba imati na umu da je prirodna obnova organske tvari mnogo dugotrajnija i kompleksnija. Obzirom na klimatske uvjete pokusne parcele, površinski se horizont ispire oborinskom vodom, te se na taj način osiromašuju anorganski i organski sastojci tla (Martinović, 2000). Takav se proces naziva eluvijalnim, gdje stupanj eluvijacije ovisi o nekoliko čimbenika : mogućnosti kretanja čestica kroz masu tla, destrukciji organskog i mineralnog kompleksa tla, o intenzitetu ispiranosti.

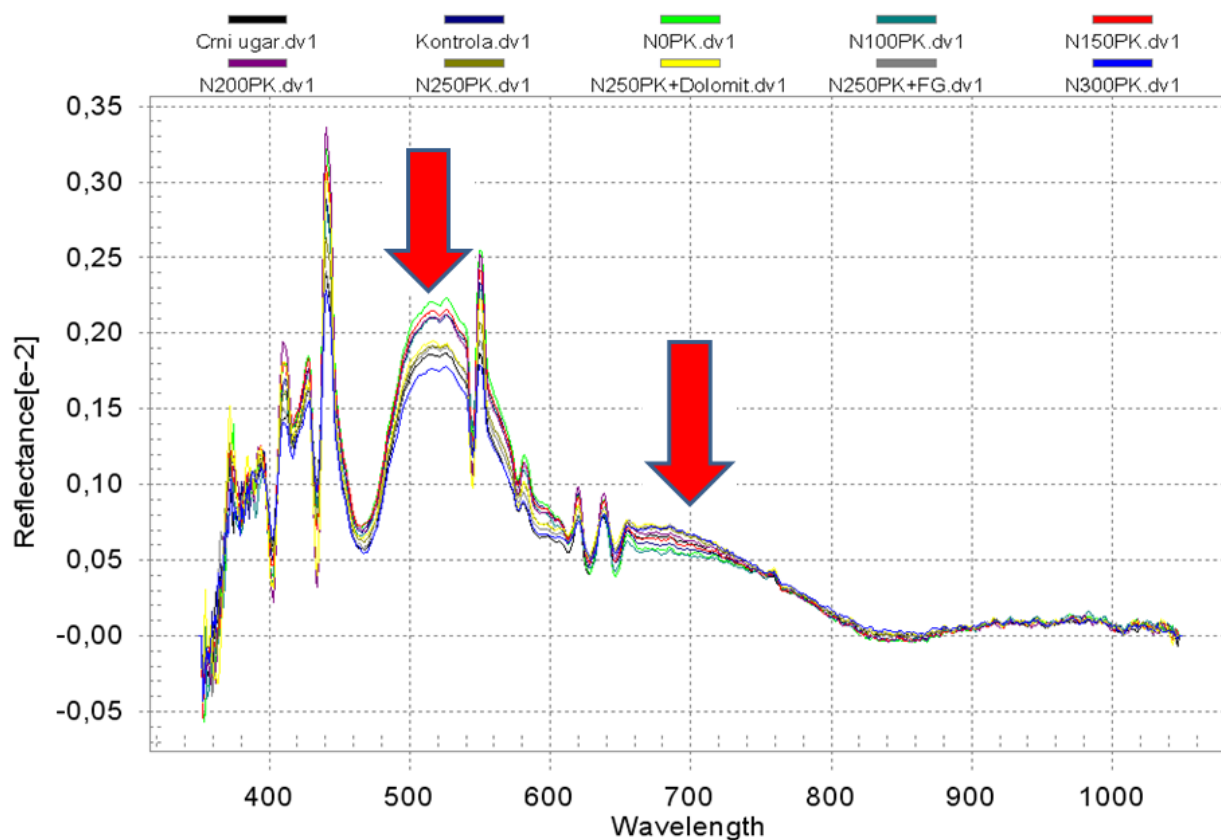
Posljedica eluvijacije je iluvijacija jer se nagomilavaju čestice eluvijalnog horizonta na drugom mjestu.

Hidrogenizacijom možemo objasniti redukcijske procese, tvorbe humusnih kiselina, karbonizaciju organske tvari, obzirom da površinska voda poplavljuje površinu pedosfere, zbog čega tlo i poprima karakteristična svojstva.

Acidifikacijom kao procesom zakiseljenosti tla dolazi do obogaćenosti adsorpcijskog kompleksa tla vodikovim ionima i do nastanka koloidnih kiselina, te se karta vrijednosti pH tla (PRILOG 4) može bazirati na ovoj tvrdnji, gdje je jasno vidljiv raspon pH po varijantama gnojidbe, gdje zaključna tvrdnja jest da je to tlo kiselo.

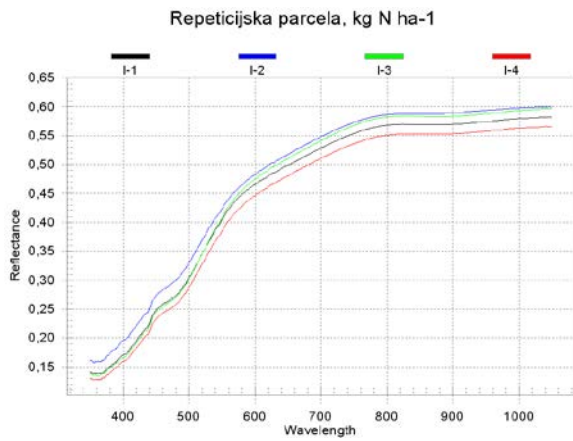
Zakiseljavanjem primarni i sekundarni minerali u tlu gube baze, te se cijepaju na najjednostavnije komponente. Većom zakiseljenošću tla dolazi i do promjene u sastavu mikro i makro organizama, te nastaje kiseli, nezasićeni humus. Mobilnost organskih i anorganskih spojeva tla raste, kao i intenzitet procesa eluvijacije. Zbog toga alkalizacijom tla sprječavamo tu pojavu zbog baza Mg, Ca, K, N. Što je koncentracija H - iona veća i omjer $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ će biti veći. U glinenom kompleksu tla najpoznatiji su minerali kaolinit (nastaje u umjerenoj do jako kiseloj sredini), montmorilonit i ilit, koji nastaje u neutralnoj i slabo do umjerenoj kiseloj reakciji (Martinović, 2000). Na manje gnojenim varijantama postoji vjerojatnost jače refleksije zbog prisutnosti kaolinita, ilita, koji u kombinaciji s višim pH tla i nešto većoj prisutnosti gline daju takav karakterističan odaziv refleksijske krivulje.

Varijante gnojidbe, kg N ha⁻¹

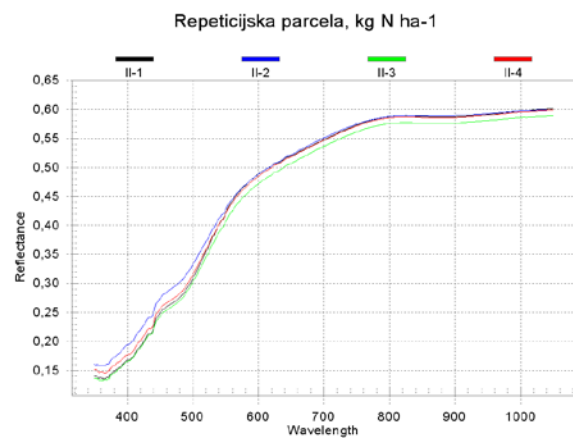


Slika 14. Varijante gnojidbe nakon izračuna prve varijacije

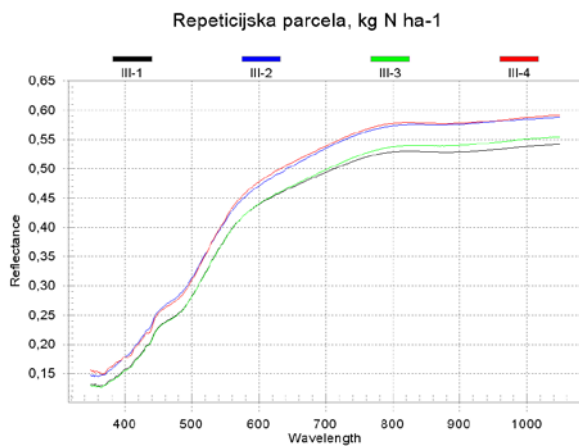
Na podacima originalne refleksije primijenjen je predtretman prve derivacije (Slika 14), u svrhu smanjenja varijacija nastalih promjenom intenziteta ozračenja, kao i razlika između uzorka tla i optičkog kabla. Slabija mineralizacija posredno utječe i na slabiju ragnjnu organske tvari. U rasponu između 490 – 560 nm (strelica lijevo) zamijećuje se odaziv refleksije koji potvrđuje McCoyevu tezu (2005) o manjoj refleksiji kod veće zastupljenosti organske tvari, dušika i ugljika i nižeg pH. No u rasponu od 660 – 720 nm (strelica desno) detektira se obrnuta situacija, gdje spektralni odaziv varijanti koje su tretirane manjom količinom dušika pokazuju nižu refleksiju, vjerovatno zbog toga što je pH tla viši, pa se mogu dovesti u korelaciju ovi zaključci. pH je viši zbog manje gnojidbe dušikom, te ne dolazi do stvaranja nezasićenog humusa, koji tvori kiseli medij.



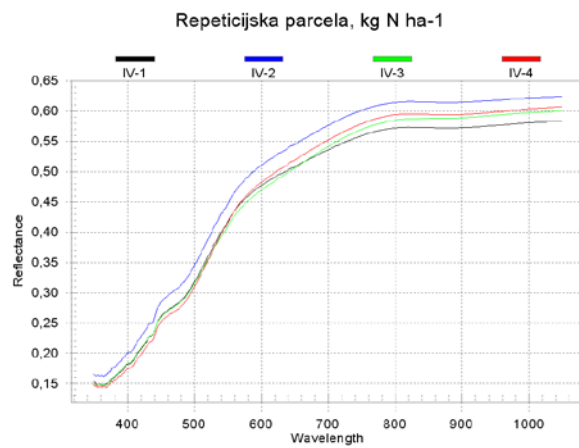
Slika 15. Repeticijska parcela var. I



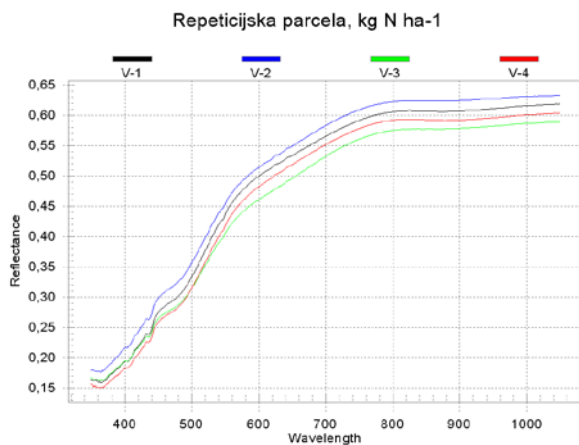
16. Repeticijska parcela var. II



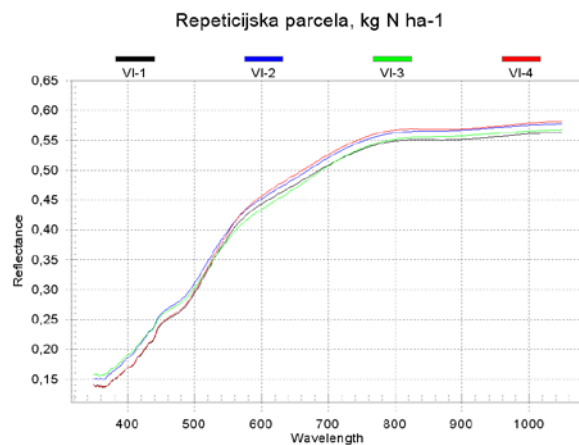
Slika 17. Repeticijska parcela var. III



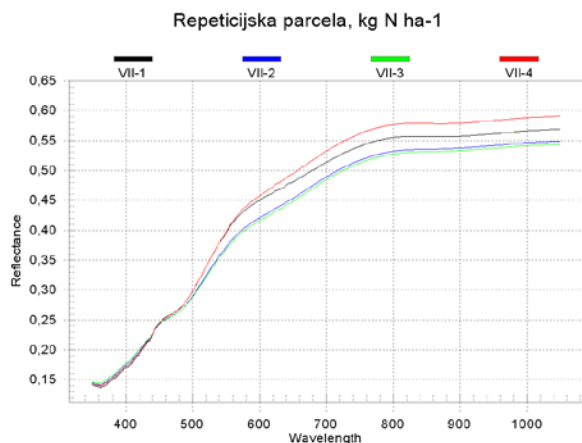
18. Repeticijska parcela var. IV



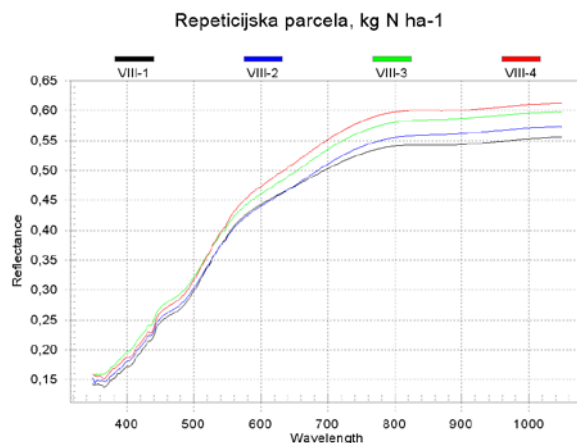
Slika 19. Repeticijska parcela var. V



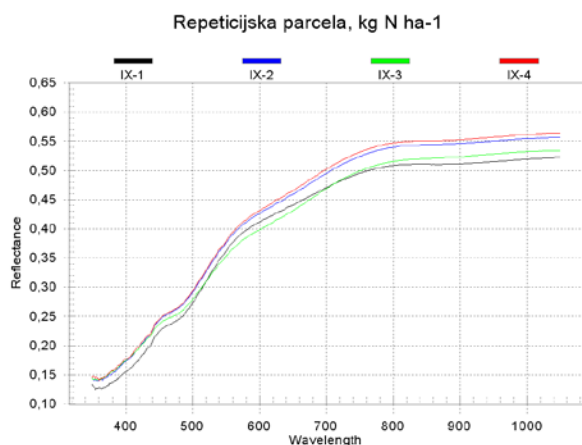
20. Repeticijska parcela var. VI



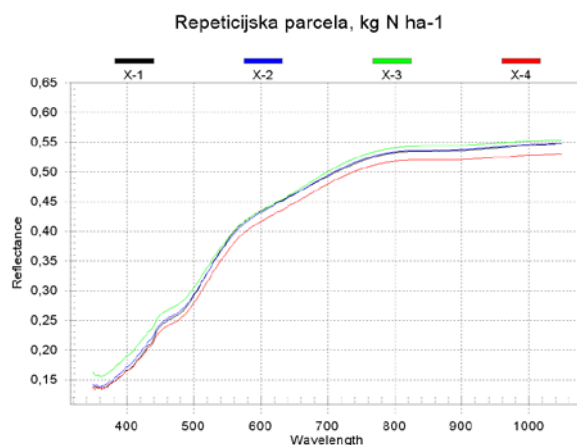
Slika 21. Repeticijska parcela var. VII



22. Repeticijska parcela var. VIII



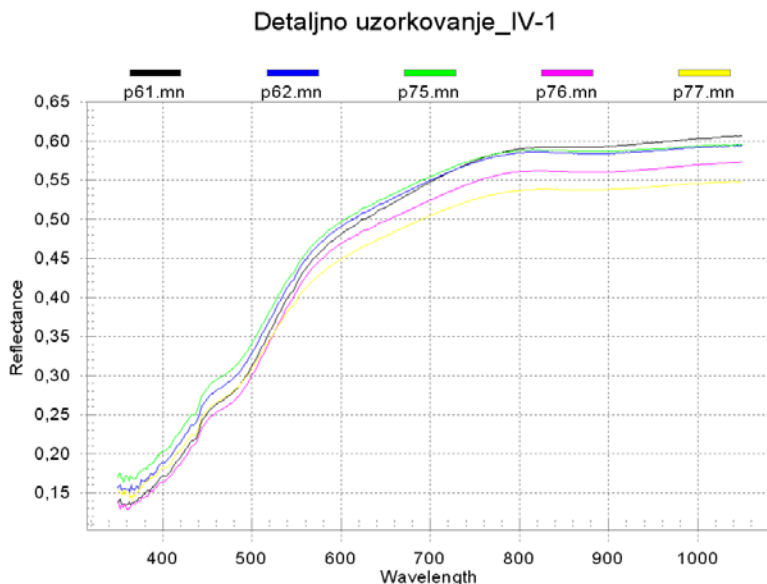
Slika 23. Repeticijska parcela var. IX



24. Repeticijska parcela var. X

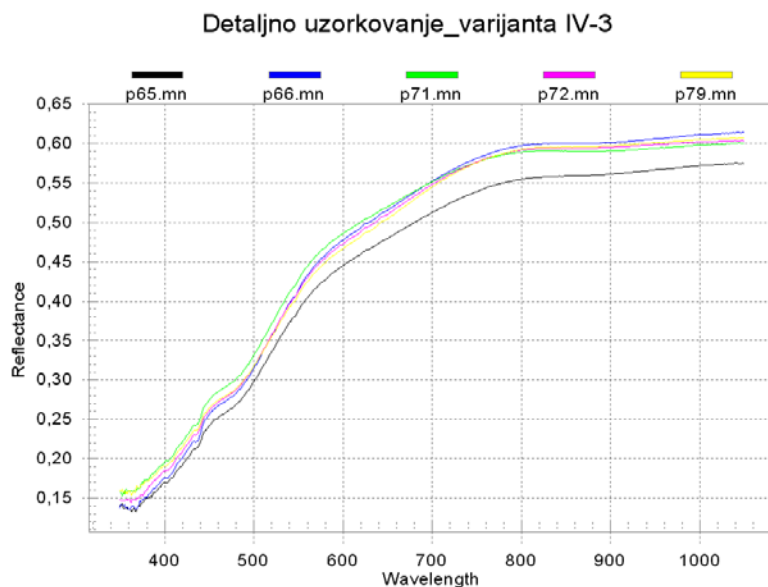
Promatrajući repeticijske parcele (Slike 15-24) i uspoređujući ih s kartama sadržaja humusa u tlu (PRILOG 3), sadržaja ukupnog ugljika (PRILOG 1) i dušika (PRILOG 2), kao i kartom pH vrijednosti tla (PRILOG 4), vidljivo je pravilno smanjenje refleksije u varijantama s više gnojidbe u vidljivom dijelu spektra što objašnjavamo s prisutnošću veće količine organske tvari, no određeno smanjenje refleksije može se pojaviti i na mjestima tla koja sadrže viši pH. Ove promjene logično bi se moglo objasniti većom količinom oborina u godini kada su uzorci uzeti (Mesić i sur., 2011) jer zbog nepropusnog horizonta može doći do ispunjavanja makro pora pri čemu se potiskuje zrak iz tla. U takvoj mokroj fazi voda uzrokuje redukciju željezovih i manganovih spojeva na dvovalentne oblike koji su topivi i pokreću se difuzijom. Prilikom ovog procesa nastupa i povećano trošenje minerala, a neki oslobođeni metalni ioni vežu se s određenim organskim tvarima u komplekse. Minerali gline, koji su zastupljeni u

istraživanom tlu, daju različite spektralne odazive u kratkovalnom bliskom infracrvenom području. Njihovi spektri variraju vjerovatno zbog apsorpcije karbonatnih i hidroksilnih iona.



Slika 25. Detaljno uzorkovanje IV varijante, prvog ponavljanja

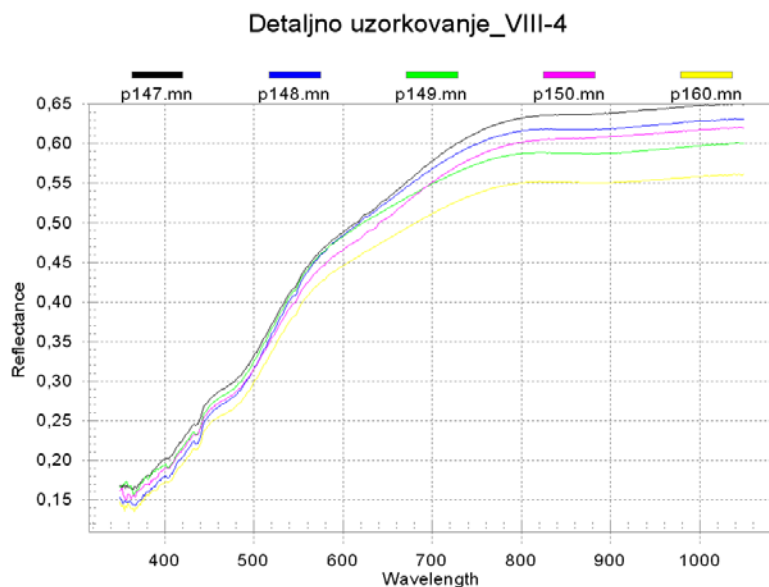
Detaljnim uzorkovanjem četvrte varijante, prvog ponavljanja (Slika 25), vidi se da spektralni odziv prati sadržaj dušika (PRILOG 1), ugljika (PRILOG 2), humusa (PRILOG 3), kao i veliku razliku u pH tla (PRILOG 4), posebno u uzorcima p75 i p76 (PRILOG 5), koji variraju razlikom vrijednosti pH tla od 3.85 – 5.90. U uzorku p75 izmjeren je nešto viši sadržaj dušika, ugljika i količine humusa koji nije reprezentativan s obzirom da je u tom uzorku izmjeren premali raspon sadržaja humusa. U tom slučaju pretpostavlja se da zadržavanje vode dovodi do redukcijskih procesa i mijenja pH tla na većem dijelu pokusne površine što znači da zbog kiselijeg medija dolazi do slabijeg raspadanja i razgradnje organske tvari. Vidljivo je (PRILOG 4) da prva ponavljanja sadrže viši pH i njihove vrijednosti ukazuju na gotovo neutralan pH najvjerojatnije zbog provedene drenaže i okretanja sloja tla, gdje je melioracijom i obradom dublji sloj koji je višeg pH nanešen na površinu, odnosno došlo je do izmjene slojeva tla.



Slika 26. Detaljno uzorkovanje IV varijante, trećeg ponavljanja

Refleksijska krivulja p71 u ovome slučaju je nešto veća s obzirom da je navedeni uzorak (PRILOG 5) uzet iz kiselog dijela tla s vrijednošću pH oko 3.72 (PRILOG 4). Iako uzorak p79 sadrži nešto veći postotak humusa refleksijska krivulja prati spektralne vrijednosti uzorka p71. To može biti dokaz stvaranja kiselog humusa koji je potom očitao i u korelaciji s četvrtom varijantom i trećim ponavljanjem (Slika 26). Ovo se može tumačiti procesima koji su se odvijali u tlu, a vezani su uz humizaciju i humifikaciju.

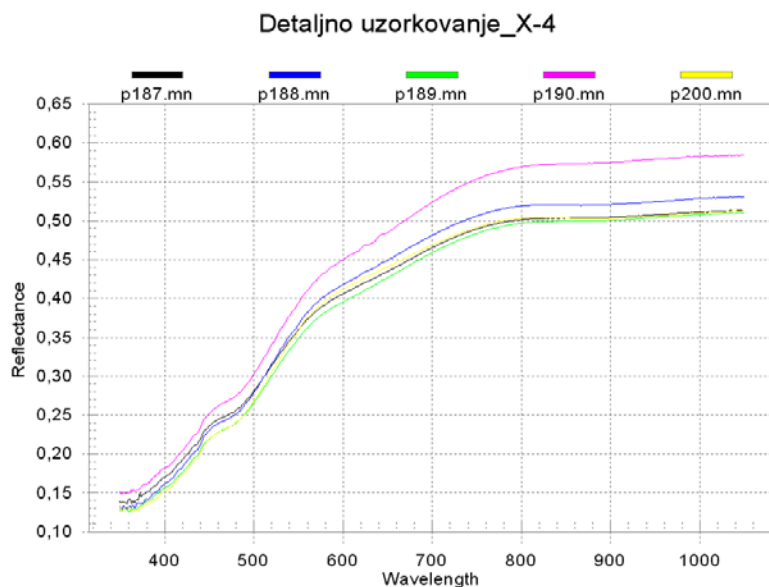
Humizacija je obogaćenost tla humusom. Na količinu i intenzitet humifikacije kao procesa nastajanja humusa utječu: kemijski sastav, svojstva mineralnog dijela tla, te klimatske i vodne prilike, a kako je pseudoglej hidromorfno tlo, slabije propusno, postoji mogućnost zadržavanja vode bez obzira na drenažni sustav, kada je to zadržavanje svedeno na najmanju moguću mjeru. Polivalentni kationi (Ca, Mg, Fe, Al) mogu biti most za adsorpciju između organskog i anorganskog dijela. Sadržaj humusa u istim uvjetima povećava se sa sadržajem gline (Škorić, 1990). Pokusna parcela kreće se u kategoriji vrlo slabog do slabo humoznog tla.



Slika 27. Detaljno uzorkovanje VIII varijante, četvrtog ponavljanja

Osma se varijanta (Slika 27) razlikuje u tumačenju jer postoji mogućnost većeg zadržavanja vode na spomenutom dijelu varijante što je uvjetovalo da bez obzira na drenažni sustav došlo do zadržavanja vode na većim dubinama spomenute varijante i pojave manjeg ili većeg „bazena”, gdje se nešto dulje zadržavala voda. Primjenom visoke količine mineralne gnojidbe N₂₅₀PK u kombinaciji sa dolomitom, došlo je do slabije razgradnje organske tvari, nakupljanja humusa, dušika i ugljika, te u usporedbi s općenito niskim pH tla većim odazivom refleksijske krivulje p147 koja je u području višeg postotka dušika (PRILOG 1), ugljika (PRILOG 2) i humusa (PRILOG 3), a nižeg pH (PRILOG 4).

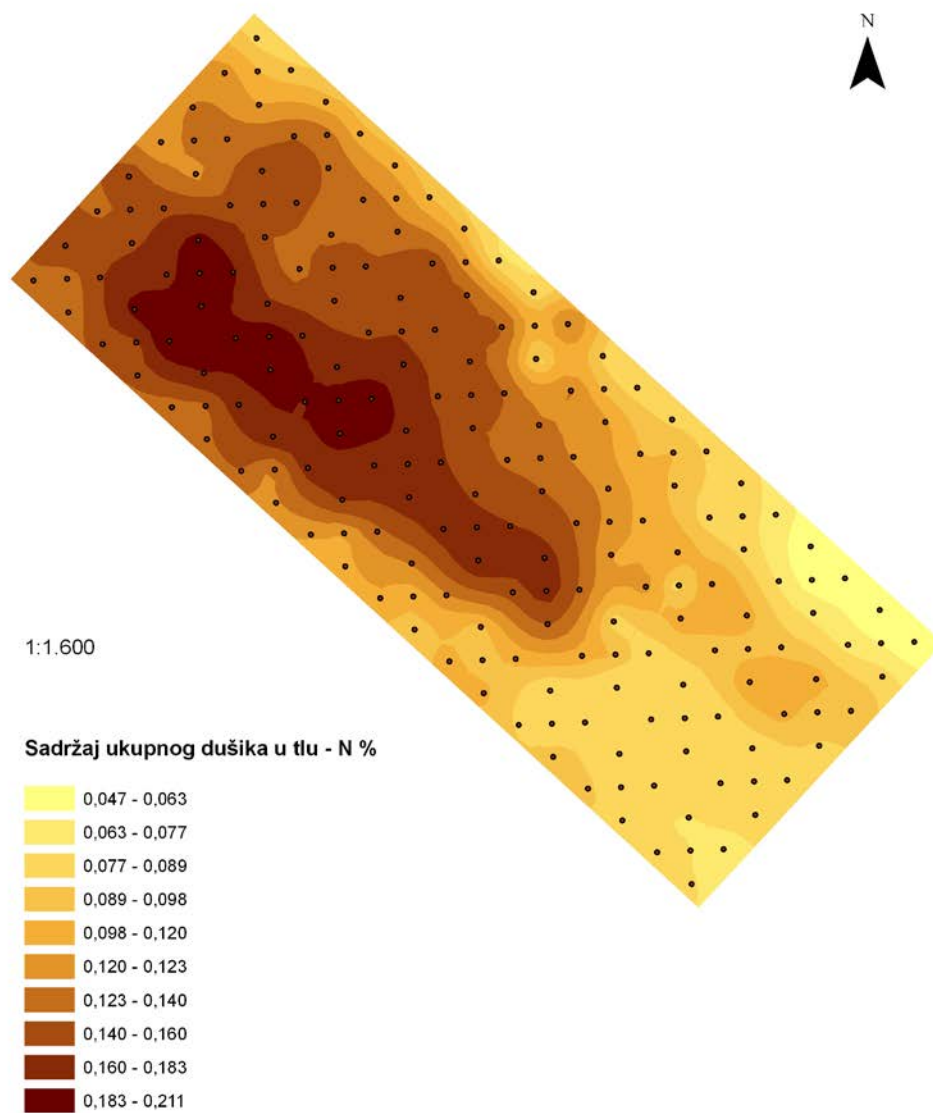
Iz navedenog može se zaključiti da u takvim situacijama pH diktira refleksijsku krivulju. Kako se prevelika mobilnost organskih i anorganskih spojeva sprječava alkalizacijom, prisutnost vode je jedino logično objašnjenje zbog čega je došlo do stvaranja kiselijeg humusa.



Slika 28. Detaljno uzorkovanje X varijante, četvrtog ponavljanja (Crni ugar)

Spektralni odaziv uzorka p190 (PRILOG 5) je vjerovatno veći jer je izrazito kiseli medij (PRILOG 4), te je došlo do stvaranja hidroksilnih i željezovih iona koji su uvjetovali konveksnu krivulju u vidljivom dijelu spektra. No obzirom da je riječ o varijanti gdje dolazi do prirodne obnove organske tvari, pretpostavka je da je boja tla ključni faktor tumačenja refleksije u ovom uzorku jer organska tvar utječe na boju uzorka, te je tlo s više organske tvari tamnije boje i refleksija je manja (Slika 28) kao što to navodi i McCoy (2005). Boja uzorka p190 je nešto svjetlija, ali je moguće da je i prisutnost gline nešto veća. Kako željezovi minerali i oksidi pokazuju najveći spektralni odaziv između 560 nm i 830 nm, najvjerojatnije je da baš i točka p190 sadrži više prisutnost željezovih spojeva.

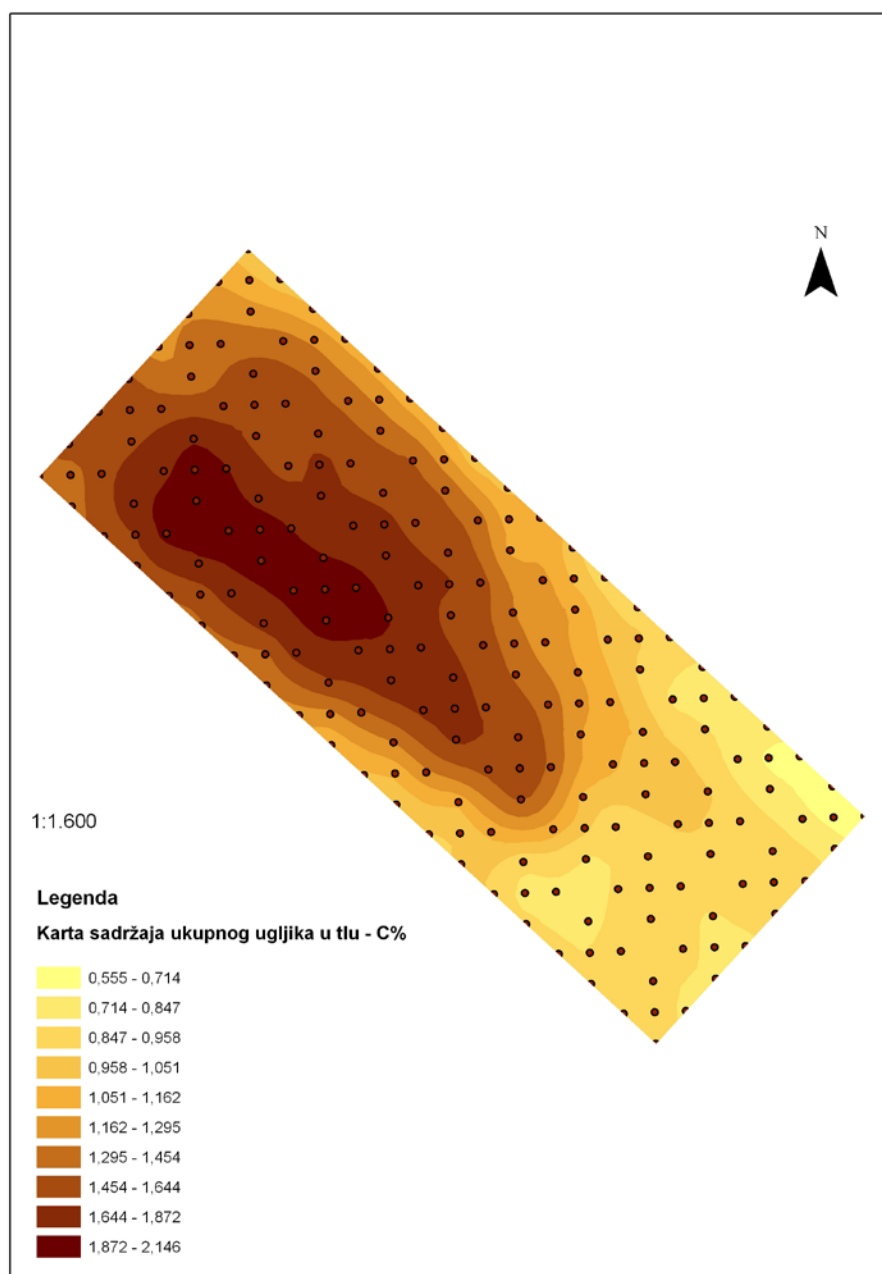
PRILOG 1



Prostorna raspodjela sadržaja ukupnog dušika u tlu nakon višegodišnje primjene mineralne dušične gnojidbe

(Korišten softwear ArcGIS, ESRI, 2009, Izradio: Zavod za OPB)

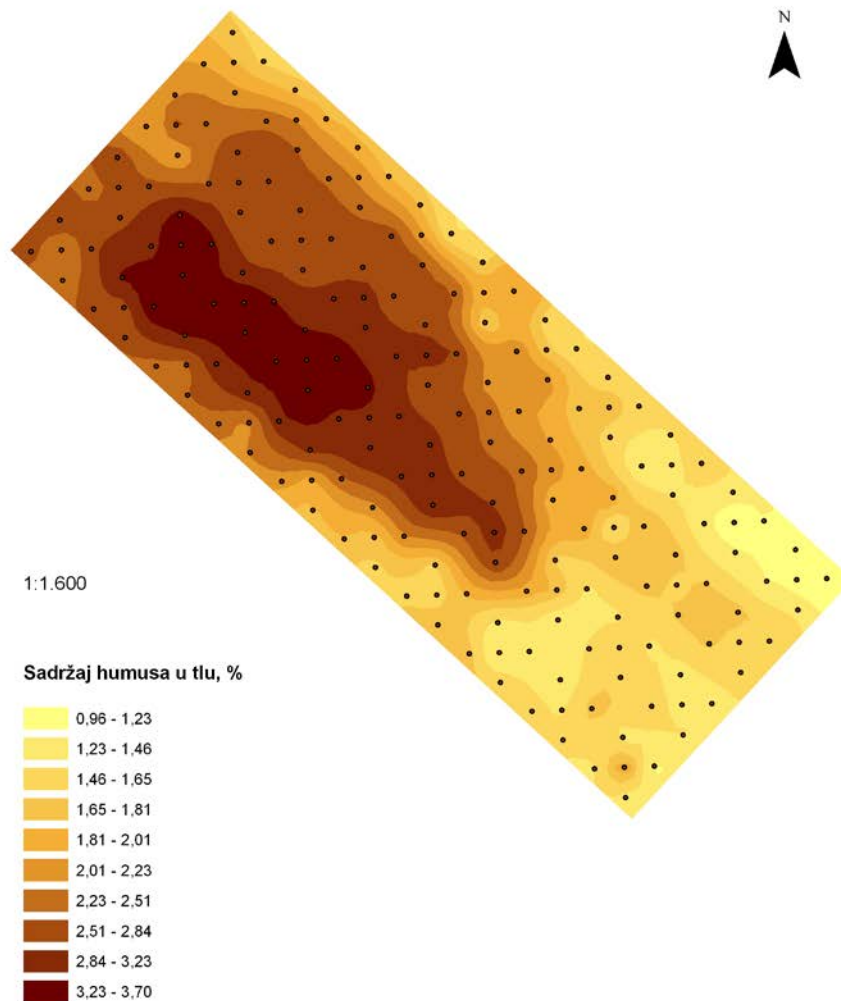
PRILOG 2



Prostorna raspodjela sadržaja ugljika u tlu nakon višegodišnje primjene mineralne dušične gnojidbe

(Korišten softwear ArcGIS, ESRI, 2009, Izradio: Zavod za OPB)

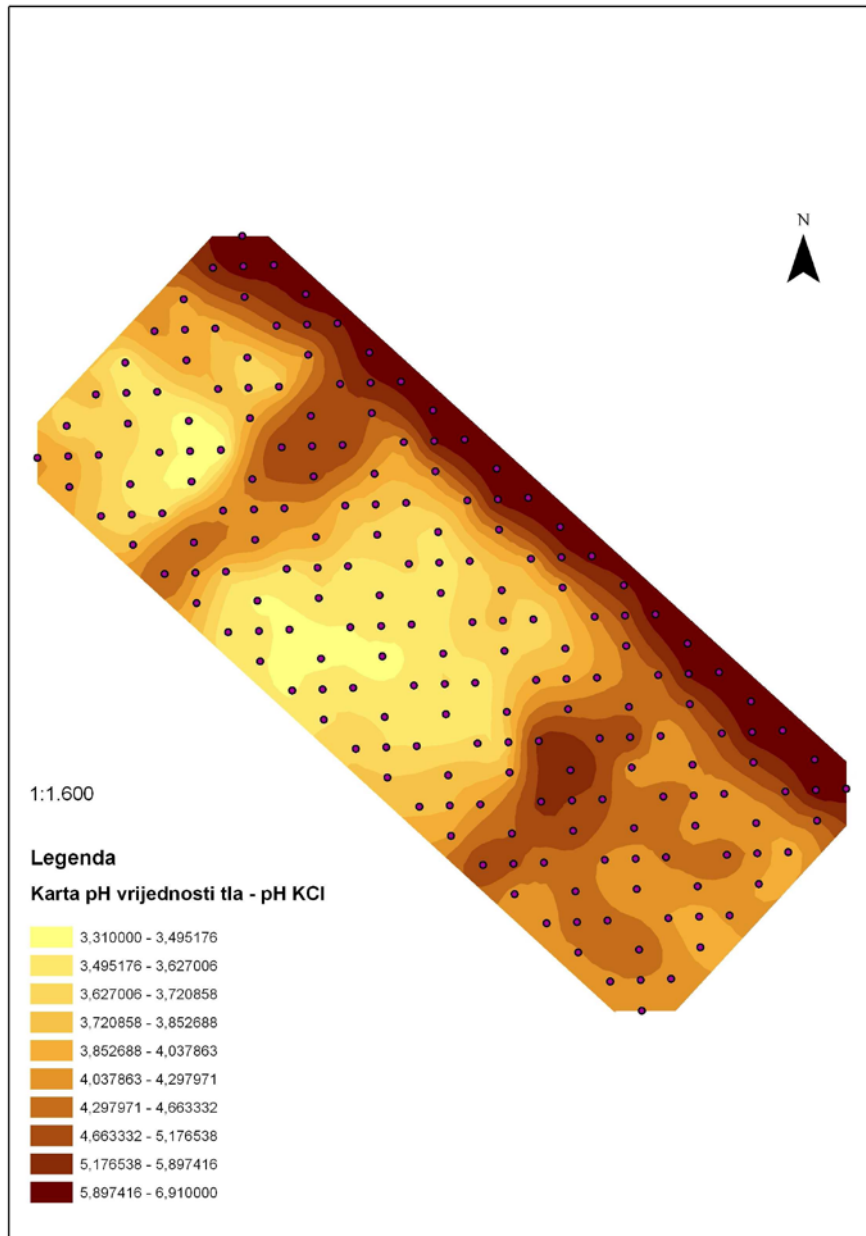
PRILOG 3



Prostorna raspodjela sadržaja humusa u tlu nakon višegodišnje primjene mineralne dušične gnojidbe

(Korišten softwear ArcGIS, ESRI, 2009, Izradio: Zavod za OPB)

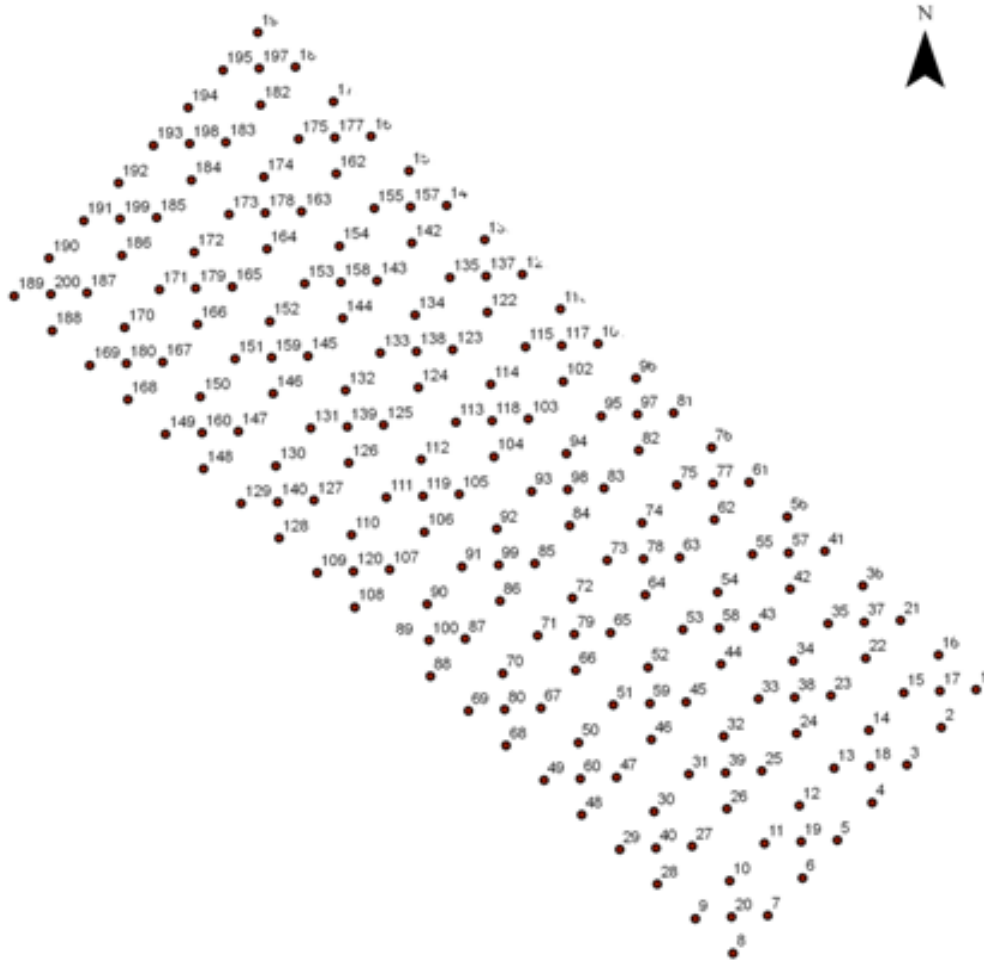
PRILOG 4



Prostorna raspodjela pH vrijednosti u tlu nakon više godišnje primjene mineralne dušične gnojidbe

(korišten softwear ArcGIS, ESRI, 2009, Izradio: Zavod za OPB)

PRILOG 5



Pokus postavljen prema shemi bloknoeg rasporeda ukupnog broja od 200 uzoraka
(Izvor: Šestak, 2010)

5. ZAKLJUČAK

Metoda hiperspektralne spektrometrije je nedestruktivna, brža u odnosu na standardne laboratorijske analize i prihvatljiva s ekonomskog, ekološkog i istraživačkog gledišta. Na temelju dobivenih rezultata zaključuje se da je metodom moguće pratiti promjene određenih pedoloških parametara : dušika, ugljika, humusa, i pH tla, ali treba biti oprezan u njihovu tumačenju posebice ukoliko se radi o jako kiselom tlu. Zbog ograničenog raspona valnih duljina spektrometra (350-1050 nm) koji je primjereniji za mjerenje odaziva biljnog materijala, dobivene rezultate na uzorcima tla možemo promatrati i analizirati u odnosu na boju tla, sadržaj organske tvari i pH tla i njihove međuovisnosti. Zbog širokih i preklapajućih bendova u vidljivom i blisko infracrvenom području spektralna očitavanja se teže analiziraju nego u srednjem infracrvenom području. Obzirom da je navedeno tlo iznimno kisele reakcije i visokog sadržaja gline, veličina čestica djeluje na spektralni odaziv tla na način da što su čestice zbijenije spektralni odaziv će biti jači zbog veće površine apsorpcije i jače refleksije. Boja tla, veličina čestica tla, prisutnost željezovih minerala i oksida mogu imati presuđujuću ulogu u odazivu refleksije jer se mogu dobro zapaziti u vidljivom dijelu spektra.

Potrebno je izvršiti daljnja istraživanja u smislu izrade predikcijskih modela pedoloških svojstava, kao i uzorkovanja u svrhu bolje interpretacije i stvaranja baza podataka kako bi u konačnici mogli potvrditi dosadašnju 90% uspješnost metode hiperspektralne spektrometrije upotrebljavane na različitim tlima i u različitim agroekološkim uvjetima koja je zabilježena u literaturnim navodima. Činjenica je da bi se relevantniji podaci dobili upotrebom spektrometra većeg raspona valnih duljina, preko 1050 nm, te bi se tako prije mogla utvrditi velika učinkovitost ove metode. Za veću točnost modela bitno je imati širok raspon vrijednosti istraživanih parametara, dakle veće varijacije i veći broj podataka sa što većeg prostora, kako bi se dobile reprezentativnije baze podataka i kalibracijski modeli, što potvrđuje i sva relevantna literatura. Međutim, ova metoda se kao vrlo informativna koristi za praćenje stanja tla u poljoprivredi, može poslužiti kao dodatni alat, odnosno skenira se tlo s raznih poljoprivrednih površina a razvoj osjetljivosti metode i kalibracijskih modela u budućnosti će doprinjeti i široj upotrebi ove metode u okviru precizne poljoprivrede u nas.

6. LITERATURA

1. Ashdown, I. (2002). Photometry and Radiometry, A tour Guide for Computer Graphic Enthusiast, <http://www.helios32.com/Measuring%20Light.pdf> . Pristupljeno 07.05.2012.
2. Bašić, F. (2008). Interna skripta iz modula Poljoprivreda i okoliš, Agronomski fakultet, Zagreb.
3. Bogunović, M. (2006). Interna skripta iz modula Pedologija za studente preddiplomskog studija Agronomskog fakulteta, Zagreb.
4. Clark, R.N. (1995). Reflectance spectra, AGU Handbook of Physical constants; 178-188.
5. Ćirić, M., (1984). Pedologija. Svjetlost, Sarajevo.
6. Dematte, J.A.M., Campos, R.C., Alves, M.C., Fiorio, P.R., Nanni, M.R. (2004). Visible NIR- reflectance: a new approach on soil evaluation. Geoderma, 121: 95-112.
7. He, Y., Song, H. (2006). Prediction of soil content using near-infrared spectroscopy. SPIE, The International Society for Optical Engineering, DOI: 10.1117/2.1200604.0164
8. Martinović, J. (2000). Tla u Hrvatskoj – monografija. Pokret prijatelji prirode, Lijepa naša, Zagreb.
9. Martinović, J. (1997). Tloznanstvo u zaštiti okoliša. Priručnik za inženjere. Pokret prijatelji prirode, Lijepa naša, Zagreb.
10. McCoy, R.M. (2005). Field methods in remote sensing. The Guilford Press, New York London. pp 1-159.
11. Mesić, M., Zgorelec, Ž., Šestak, I., Jurišić, A. (2011). Gnojidba dušikom prihvatljiva za okoliš (Znanstveni projekt broj: 178-1780692-0695). Izvješće o radu u 2010. godini. pp 1-132.

12. Miltz, J., Don, A. (2012). Optimising sample preparation and near infrared spectra measurements of soil samples to calibrate organic carbon and total nitrogen content. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, DOI: 10.1255/jnirs.1031
13. Nanni, M.R., Dematte, J.A.M. (2006). Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. *Soil Sci.Soc.Am.J.*, 70: 393-407.
14. Resulović, H., Čustović, H., Čengić, I. (2008). *Sistematika tla/zemljišta: nastanak, svojstva i plodnost*. Poljoprivredno-prehrambeni fakultet Univerziteta u Sarajevu, Sarajevo.
15. Shepherd, K.D. (2003). Rapid characterization of organic resource quality for soil and livestock management in tropical agroecosystems using near infrared spectroscopy. *Agronomy Journal* 95:1314-1322
16. Shepherd, K.D., Walsh, M.G. (2002). Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. *Soil Sci.Soc.Am.J.*, 66: 988-998.
17. Sorensen, L.K., Dalsgaard, S. (2005). Determination of clay and other soil properties by near infrared spectroscopy. *Soil Sci.Soc.Am.J.*, 69: 159-167.
18. Stevens A., Wasemael, B., Vandenschrich, G., Toure, S., Tychon, B. (2006). Detection of Carbon stock change in agricultural soils using spectroscopic techniques. *Soil Sci.Soc.Am.J.*, 70: 844-850.
19. Šestak, I. (2011). Procjena učinkovitosti gnojidbe dušikom spektroskopijom usjeva pšenice. Doktorska disertacija. Zagreb, 129s.
20. Škorić, A. (1990). *Postanak, razvoj i sistematika tla*. Fakultet poljoprivrednih znanosti, Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
21. Vukadinović, V. (2012). Procjena pogodnosti tla. <http://pedologija.com.hr/literatura/Pogodnost.pdf> . Pristupljeno 01.12.2012.

22. Wetterlind, J., Stenberg, B., Jonsson, A. (2008). Near infrared reflectance spectroscopy compared with soil clay and organic matter content for estimating within-field variation in N uptake in cereals. *Plant Soil*, 302: 317-327.
23. Waiser, T.H., Morgan, C.L.S., Brown, D.J., Hallmark, C.T. (2006). In Situ characterization of soil clay content with visible near-infrared diffuse reflectance spectroscopy. *Soil Sci.Soc.Am.J.*, 71: 389-396.
24. Wetterlind, J., Stenberg, B., Soderstrom, M. (2010). Increased sample point density in farm soil mapping by local calibration of visible and near infrared prediction models. *Geoderma*, 156: 152-160.
25. http://www.topconpa.hr/?page_id=31 . Pristupljeno 30.04.2012.
26. <http://hr.wikipedia.org/wiki/Svjetlost> . Pristupljeno 02.05.2012.
27. <http://www.asdi.com/products/fieldspec-spectroradiometers/fieldspec-3-portable-spectroradiometer> . Pristupljeno 02.04.2012.
28. <http://premediablog.widen.com/blog/the-color-space>. Pristupljeno 23.09.2012.
29. [http://Relationship between frequency and wavelength](http://Relationship%20between%20frequency%20and%20wavelength). (from <http://emap-int.com>) teacheratsea.wordpress.com . Pristupljeno 20.09.2012.

7. ŽIVOTOPIS

- Ivan Stupnišek rođen je 21. svibnja 1985. godine u Zagrebu
- Osnovnu školu „Braće Radić“, Botinec, pohađao je od 1992. do 2000. godine, sa odličnim uspjehom i tijekom školovanja sudjelovao na natjecanjima iz područja biologije (2. mjesto Grada Zagreba), kemije i hrvatskog jezika
- 2000. godine upisuje Zdravstveno učilište u Zagrebu, usmjerenje zubotehničar, maturirao 2004. godine.
- Po završetku srednjoškolskog obrazovanja, početkom 2005. godine dobiva pripravnički staž u Stomatološkoj poliklinici Perkovića, što u je ujedno i jednogodišnje radno iskustvo, nakon kojeg stječe uvjete za polaganje Državnog stručnog ispita, kojeg uspješno polaže u svibnju 2006.
- 2006. - 2010. pohađa preddiplomski studij Agroekologije, Agronomskog fakulteta u Zagrebu
- Stručnu praksu i terenski rad obavlja na Zavodu za opću proizvodnju bilja i privatnoj poljoprivrednoj ljekarni u Sesevskom Kraljevcu
- 2010. završava preddiplomski studij završnim radom „Prorjeđivanje cvjetova i plodova jabuke“ na Zavodu za voćarstvo
- 2010. godine upisuje diplomski studij Ekološke poljoprivrede i agroturizma
- Područje interesa su mu ekologija, zaštita voda i tla, precizna poljoprivreda i obnovljivi izvori energije, tijekom studija sudjeluje u brojnim fakultetskim izvannastavnim aktivnostima poput Smotre sveučilišta 2010., 2011. godine
- Prvi je autor objavljenog preglednog znanstvenog rada A2 skupine

Publikacije:

Stupnišek, I., Fruk, G., Jemrić, T. (2011). Usporedba različitih tehnika prorjeđivanja cvjetova i plodova jabuke. Glasnik zaštite bilja (0350-9664), 34, 5; 12-16.