

Universitatea de Științele Vieții “Regele Mihai I” din Timișoara



Facultatea de Agricultură

Ing. CHIȚU CĂTĂLIN

TEZĂ DE DOCTORAT

**CERCETĂRI PRIVIND UTILIZĂREA TEHNOLOGIEI DE
REPLICARE DIGITALĂ IN PRODUCȚIA AGRICOLĂ**

Conducător Științific

Prof. Dr. Ing IMBREA Florinel

Timișoara

2024

REZUMATUL TEZEI

Prezenta lucrare își propune determinarea influenței verigilor tehnologice și schimbările climatice asupra productivității utilizând tehnologiile Smart (inteligente) de monitorizare, cu referire la principalele elemente tehnologice (material biologic, perioada de semănat și nivelul de fertilizare, erbicidare), evoluția vremii și culturii din satelit și predicție prin algoritmi de replică digitală/geamăn-digital (en. digital-twin) în calculul riscului culturii și productivității.

Obiectivele cercetărilor. Principalele obiective urmărite în prezenta lucrare au constat în:

1. Stabilirea influenței factorilor de mediu asupra producției în corelație cu condițiile pedoclimatice din zona: vestul României (Șiria), sud-Estul României (Bărăganu), sudul României (Mihai Bravu), nordul Luxembourgului (Christnach), vestul Luxembourgului (Dippach și Schengen);
2. Studii legate de tehnologia de **Replicare Digitală** pentru eficacitatea tratamentelor fito-sanitare în funcție de potențialul apei din sol corelat cu cantitatea de precipitații, temperatura, umiditatea, radiația solară și BBCH;
3. Definirea unui model ce implementează tehnologia de **Replicare Digitală** (en. digital-twin) pentru productivitate care se axează pe vectorii dați de parametri de mediu, apa din sol, aplicarea optimă de tratamente și fertilizare, procesând fluxurile de date digitale generate de senzori IOT și scanare spectrală din satelit, precum și evoluția pedoclimatică de-a lungul anilor.

Gradul de încadrare a temei în preocupările internaționale, naționale, regionale, ale colectivului de cercetare. **Replicarea Digitală** și tehnologiile smart în agricultură implică crearea de reprezentări virtuale ale sistemelor agricole fizice, care pot fi utilizate în diverse scopuri, cum ar fi optimizarea gestionării culturilor, precizarea randamentului și gestionarea eficientă a resurselor. Unele dintre aplicațiile cheie ale „**Replicării digitale în agricultură**” includ agricultura de precizie, agricultura inteligentă și modelarea parametrilor unei culturi.

În cadrul tezei s-a folosit o plajă largă de tehnologii și dispozitive IOT și anume:

- 5 stații agro-meteorologice Lumbara Base dotată cu direcție vânt, viteză vânt, pluviometru, radiație solară, luminozitate, indice UV, Temperatura și Umiditate Aer, presiune atmosferică;
- 5 stații agro-meteorologice Lumbara Soil dotată cu senzor TEROS12 (fabricat în USA) pentru umiditate (VWC), temperatura și EC sol și senzor TEROS21 (fabricat în USA) pentru potențialul apei în sol și temperatura solului;
- Stație agro-meteorologică Lumbara Eye dotată cu senzor de imagine 4K, Sony, zoom optic 20x și rotire în plan orizontal 0-350 grade, rotire în plan vertical 0-90 grade;
- Imagini de satelit pentru vizualizarea în diferite spectre a evoluției culturii, respectiv formei terenului și cantitatea de apă;
- Evoluția vremii pe baza datelor de satelit și istoricul parametrilor pedo-climatici pe fiecare locație.

Prezentarea câmpurilor experimentale

Christnach este un sat situat în estul Luxemburgului în regiunea Eternach, fiind expus unei clime temperate cu influente maritime. Zona este deluroasă expusă la temperaturi moderate pe tot parcursul anului. Verile sunt de obicei blânde până la calde, cu temperaturi medii ridicate cuprinse între 20 °C și 25 °C. Iernile tind să fie reci, cu minime medii în jur de 0 °C. Regiunea Eternach primește o cantitate moderată de precipitații distribuite uniform pe tot parcursul anului. Precipitațiile sunt relativ consistente, fără să se distingă un sezon uscat. Precipitațiile anuale variază în general de la 700 la 900 milimetri. În timpul lunilor de iarnă, Christnach și zonele înconjurătoare sunt acoperite de zăpadă. Zăpada mai multă se poate acumula, în special pe altitudinile mari și mai ales în timpul iernilor mai reci. Regiunea experimentează o cantitate moderată de soare pe tot parcursul anului, cu toate acestea pe timpul verilor culturile primesc mai multe ore de lumină și energie solară decât primăvara și toamna. Primăvara și toamna sunt anotimpuri de tranziție cu temperaturi blânde și uneori foarte schimbătoare.

Dippach face parte din cantonul Capellen, situată în vestul Luxemburgului.. Centrul administrativ este localitatea Schouweiler. Râul Mess, un afluent al râului Alzette, izvorăște din aceasta locație. În Dippach, verile sunt confortabile și parțial înnorate, iar iernile sunt foarte reci, vântoase și mai ales tulburi. Sezonul cald durează 3,1 luni, între 3 iunie și 8 septembrie, cu o temperatură medie zilnică ridicată de peste 19 °C. Cea mai tare lună a anului în Dippach este iulie, cu o medie a maximelor de 23 °C și minime de 14 °C. Sezonul rece durează 3.6 luni, de obicei din 16 noiembrie până în 5 martie, cu o temperatură medie zilnică ridicată sub 7 °C. Cea mai rece lună a anului în Dippach este ianuarie, cu o medie minimă de -1 °C și maximă de 4 °C.

Schengen este o localitate viticolă în Luxemburg, aflată la întretăierea granițelor dintre Germania, Franța și Luxemburg ce face parte din cantonul Remich situat în estul Luxemburgului. Sezonul cald durează 3,1 luni, din 4 iunie până în 15 septembrie, cu o temperatură maximă medie zilnică de peste 20.5 °C. Cea mai caldă lună a anului în Schengen este iulie, cu o medie maximă de 23.9 °C și minimă de 14.4 °C. Sezonul rece durează 3.6 luni, de obicei din 15 noiembrie până în 4 martie, cu o temperatură maximă medie zilnică sub 7.8 °C. Cea mai rece lună a anului în Schengen este ianuarie, cu o medie minimă de 0 °C și o maximă de 3.9 °C.

Bărăganu este situat în sud-estul României în extremitatea de sud a județului Brăila, la limita cu județul Ialomița. fiind expus unei clime temperate cu influente maritime. Clima zonei este temperat-continentală caracterizându-se prin veri foarte calde și ierni foarte reci, printr-o amplitudine termică anuală, diurnă relativ mare și prin precipitații în cantități reduse. Durata medie anuală de strălucire a Soarelui este cuprinsă între în jur de 2200 ore, numărul anual de zile cu cer senin este de 100, iar cu cer acoperit 120 de zile. Temperatura medie anuală a aerului 11 °C. Precipitațiile atmosferice, variază între 380 și 490 mm/an, Vânturile au ca direcții dominante nord-est, nord, sud-vest și sud, dominante fiind crivățul. Umiditatea relativă a aerului variază între 70 și 76%. Se remarcă înghețul, bruma și viscolul, în perioada rece, seceta, roua și grindina, în perioadele calde ale anului.

Șiria se află în județul Arad, expusă zonei climatului temperat-continental moderat, caracterizată prin ierni nu prea friguroase și veri calde. Vara, ca urmare a creșterii intensității radiației solare(peste 15 cm²/luna) și a predominării timpului senin, temperatura aerului înregistrează valori ridicate – media lunara depășind 20 °C. Temperatura medie anuală: +10,5 ° C; Temperatura maxima absoluta: + 38.1 ° C; Temperatura minima absoluta: -20 ° C; Precipitații: 45.93 l/m²; Vânt mediu: 2.575 l/m²; Adâncimea de

îngheț : 0.80 m de nivel teren actual . Temperatura medie anuală a aerului se menține în jurul valorii de 12 °C. Analizând situația temperaturii din luna ianuarie, cea mai rece luna din an; se observă că valorile termice anuale oscilează între 0.3 și 1.5 °C, fiind mai ridicate decât în Bărăgan sau Luxembourg, constituind un indiciu al caracterului moderat al iernii. Faptul că în această parte a țării iernile sunt mai blânde o dovedesc și valorile termice din celelalte luni ale sezonului rece (0.9 °C pentru luna Decembrie și +2.5 °C pentru luna Februarie). Media multianuala a temperaturii aerului, calculată pe întreaga perioadă a sezonului rece este de 0.9 °C.

Mihai Bravu se află în județul Giurgiu, expusă zonei climatului temperat-continental. Datorită altitudinii și poziției sale geografice, în timpul iernii pot fi vânturi aspre, chiar dacă unele sunt atenuate de păduri. Temperaturile din timpul iernii ajung sub 0 °C, chiar dacă rar scad sub -10 °C. Vara, temperatura medie pentru lunile iulie și august este de 23 °C, cu toate că în ultimii ani temperaturile au depășit 40 °C la orele prânzului. Media precipitațiilor și a umidității în timpul verii este scăzută, dar ocazional apar furtuni violente. În timpul verii și toamnei, temperaturile variază între 18-22 °C, iar precipitațiile în aceasta perioadă tind să crească, fiind perioade mai frecvente dar blânde de ploi. Temperatura medie lunară cea mai scăzută se înregistrează în luna Ianuarie, cu o valoare medie de -3 °C. Vara este foarte caldă, în Iulie temperatura medie este de 23 °C, uneori atinge chiar 35 - 40 °C. Precipitațiile sunt scăzute, în medie de 585 mm pe an, dar au debitul mai ridicat vara: cele mai mari cantități medii lunare de precipitații cad în Iunie (circa 85 mm), iar cele mai scăzute în martie (15 mm). În medie, pe teritoriul comunei cad precipitații în 117 zile/an.

Tehnologia de **Replicarea Digitală** (Digital Twin în engleza) sau Geamăn Digital, a fost inventată și implementată de către NASA în vederea verificării comportamentului navelor spațiale și este definită ca o reprezentare virtuală / digitală a sistemelor fizice pentru a simula comportamentul sistemului fizic Există diferite definiții pentru acest concept disponibile în literatura de specialitate. Pe baza definițiilor raportate, **Replicarea Digitală** poate este dată de entitățile fizice și virtuale, precum și de un set de conexiuni inteligente între entitățile fizice și corespondența lor digitală.

Practic, **Replicarea Digitală** reprezintă o copie digitală a unui sistem, produs, sau proces (ex agricol) din lumea reală. **Replicarea Digitală** servește ca omolog digital al entității din mediul real, cum ar fi simularea, integrarea, testarea, monitorizarea și întreținerea a celui real înainte de a aplica asta în teren. **Replicarea Digitală** a fost destinată să fie un instrument de bază pentru gestionarea ciclului de viață al sistemului sau produsului respectiv și există pe parcursul întregului ciclu de viață (creare, construire, operare / suport și eliminare) a entității fizice pe care o reprezintă.

Replicarea Digitală în producția agricolă

Monitorizarea și evaluarea calității solului pentru susținerea productivității plantelor reprezintă baza strategiilor de utilizare a terenurilor în fermele agricole. Sănătatea și productivitatea culturilor depind de calitatea și proprietățile solului dar și de evoluția climatică a zonei. Informații mai detaliate despre solul agricol pot reduce utilizarea potențială a dozelor de îngrășăminte chimice și pesticide, îmbunătățind astfel apele subterane, protejând mediul și sănătatea umană. De asemenea, sprijină definirea densității plantelor într-un mod mai eficient.

În agricultură, **Replicarea Digitală** sprijină oamenii de știință să studieze mai bine solul, iar fermierii să înțeleagă comportamentele culturilor în regiunea lor. Senzorii de monitorizare a solului, cum ar fi umiditatea, temperatura, materia organică joacă roluri critice în agricultura digitală. De exemplu,

informațiile privind umiditatea solului pot fi utilizate pentru a evalua eficiența irigației pe câmpurile agricole. În plus, pentru a sprijini procesul decizional al agriculturii inteligente, scanarea digitală a solului este esențială, aducând aport în informații spațiale privind evoluția macro/micro elementelor prin investigații de teren și de laborator, împreună cu sistemele de scanare din satelit. Abordările digitale de evaluare a solului au un impact direct asupra randamentului și performanței culturilor prin identificarea zonelor care pot cauza un randament scăzut al culturilor. Metodologiile alternative digitale pentru studiul solului și identificarea principalelor caracteristici ar avea posibilitatea de a simula tendințele evolutive ale acestuia.

În cadrul tezei modelul de replică digitală, s-a dezvoltat într-un program software cu vizualizare în Microsoft Excel, care implementează agregarea fluxurilor de date al condițiilor pedoclimatice pe fiecare solă, rezultatele legate de fertilizarea cu azot și productivitatea pentru culturile de grâu, porumb, rapiță și soia. Modelul propus de **Replicarea Digitală** ia în considerare impactul fertilizării și dinamica nutrienților în diferite etape de creștere date de scara BBCH și evoluția GDD. Fluxurile de intrare date de senzori, sateliți cât și predicția vremii, includ atât citirile de temperatură maximă-minimă, umiditate în perioadele critice de creștere. Astfel, la nivel subteran, temperatura solului la adâncimi de 10 cm și 30 cm, influențează direct germinarea semințelor și dezvoltarea radiculară direct legată de disponibilitatea nutrienților și creșterea plantelor în fiecare stare a plantei. Umiditatea solului la aceste nivele este esențială în calculul de disponibilitate al apei necesar plantei dar și transformării resturilor vegetale în azot respectiv diluția și absorbția acestuia. Conținutul de umiditate a solului afectează germinarea, dezvoltarea rădăcinilor și transportul nutrienților. Modelul urmărește nivelurile de umiditate în timp, corelându-le cu precipitațiile/irigarea și ratele de evaporare. La nivel suprateran, temperatura aerului influențează dezvoltarea plantelor, în special în fazele critice precum germinarea, înflorirea și fructificarea sau intrarea în repaus. Atât citirile de temperatură maximă, cât și minimă sunt utilizate pentru a evalua stresul termic și riscurile de îngheț. Azotul în resturile vegetale include descompunerea acestora provenite de la recolte realizate cu 2 ani înainte. Aceste resturi se eliberează azot în sol într-un mod lent fiind direct legate de mai mulți factori reactivi din sol. Astfel cantitățile și ratele de descompunere variază în funcție de tipul recoltelor anterioare, resturilor, condițiile solului (ex. PH, textura), umiditate și temperatură. Ieșirile de date prin rularea modelului includ ratele estimate de eliberare a azotului, care ghidează strategiile de fertilizare. Folosind intrări precum umiditatea și temperatura solului, modelul prezice etapele de creștere ale culturilor, inclusiv apariția, înflorirea și maturizarea. Aceste predicții permit fermierilor să optimizeze momentele de plantare și recoltare

Tot odată **Replicarea Digitală** oferă recomandări pentru gestionarea apei pe baza nivelurilor de umiditate ale solului și a ratelor de evapotranspirație, evidențiind stresul hidric. Acest lucru asigură o irigare eficientă, minimizând risipa de apă și prevenind stresul hidric. Evaluarea riscurilor de mediu, precum temperaturile scăzute ale solului sau umiditatea excesivă, care ar putea duce la o creștere lentă sau probleme de absorbție a nutrienților

Astfel, modelul propus, ia în vedere o rată standard de absorbție a azotului pentru cultura de grâu, porumb, rapiță și soia, care poate fi ajustată pe baza fertilității solului și a condițiilor meteorologice. De asemenea, ia în considerare impactul microorganismelor din sol ce influențează mineralizarea azotului. Umiditatea și temperatura solului sunt factori esențiali pentru disponibilitatea nutrienților și creșterea rădăcinilor. Modelul integrează intrări dinamice privind vremea ca istoric și ca predicție, presupunând că monitorizarea constantă a proprietăților solului oferă predicții exacte pentru sănătatea plantelor.

Descompunerea azotului din resturile culturilor este modelată pe baza raportului carbon-azot din resturi și a condițiilor de mediu, precum temperatura și umiditatea. Modelul presupune rate standard de descompunere în funcție de tipul solului. Temperatura aerului joacă un rol semnificativ atât în ratele metabolice ale plantelor, cât și în condițiile de stres potențial. Modelul folosește date istorice de temperatură și calculează zilele de creștere (GDD) pentru a prezice fazele BBCH de creștere și înflorire

Un alt aspect studiat este legat eficacitatea tratamentelor de erbicidare dată de stadiul vegetativ (BBCH) și factorii modelului de **Replicarea Digitală** enumerați mai sus. Cantitățile de erbicid aplicate la hectar, respectiv costurile variază semnificativ dacă operațiunile se fac în parametri optimi și stadiile vegetative BBCH corespunzătoare.

Impactul gradului de aprovizionare cu apă asupra producției

Umiditatea adecvată a solului stimulează creșterea când umiditatea solului este la un nivel adecvat, culturile primesc apa necesară pentru procese esențiale, cum ar fi fotosinteza, absorbția nutrienților și expansiunea celulară. Acest lucru duce la o creștere sănătoasă, în special în timpul stadiilor critice de creștere, cum ar fi înflorirea și umplerea păstăilor la soia. Cu o umiditate suficientă a solului, cultura își poate maximiza potențialul genetic de producție, rezultând în randamente mai mari.

După cum se observă din simulările de **Replicarea Digitală** pe cultura de grâu, porumb, soia, rapiță și orz umiditate din sol cauzează stres hidric rezultă când nivelul din sol scade sub necesarul culturii, în special în timpul etapelor critice, cum ar fi înflorirea (BBCH 60-69) și formarea boabelor (BBCH 70-79). Acest lucru duce la reducerea expansiunii celulare, un număr mai mic de boabe și greutatea scăzută a acestora. Stresul hidric în aceste perioade poate duce la pierderi semnificative de randament, din simulări până la 50-70%, în funcție de severitatea și durata acestuia.

Umiditatea excesivă a solului (zona Luxembourg) poate fi, de asemenea, dăunătoare astfel, o valoare prea mare poate reduce oxigenul disponibil pentru rădăcinile plantelor, afectând respirația și absorbția nutrienților. Acest lucru poate încetini creșterea sau poate duce chiar la boli radiculare. Deși excesul de umiditate este mai puțin frecvent decât problemele legate de secetă, o expunere îndelungată poate reduce producția cu 10-30%, conform **Replicării Digitale** folosind datele pedoclimatice pe sola respectivă.

Relația dintre umiditatea solului și eficiența utilizării apei (WUE), este raportul dintre producția agricolă și cantitatea de apă utilizată. Când nivelurile de umiditate din sol sunt optime, plantele pot folosi apa eficient, ceea ce duce la o valoare WUE mai mare. Nivelurile scăzute sau ridicate de umiditate scad WUE, reducând producția totală.

Umiditatea solului în fazele critice de creștere este un alt factor important în Replicarea digitală. Astfel în timpul germinării, umiditatea adecvată(20%-25%) este esențială pentru răsărirea semințelor iar în timpul înfloririi și umplerii păstăilor, un deficit de umiditate în sol reduce direct numărul de flori, păstăi și greutatea semințelor.

Ca urmare, menținerea unor niveluri optime de umiditate a solului, în special în fazele critice de creștere, cum ar fi înflorirea și umplerea păstăilor, este esențială pentru maximizarea producției de soia. Stresul provocat de umiditatea solului (fie prea scăzută, fie prea ridicată) poate afecta semnificativ potențialul de producție prin reducerea creșterii, formării păstăilor și dezvoltării semințelor.

Impactul temperaturii asupra producției

Din rezultatele furnizate de *Replicarea Digitală* se observă că temperaturile ridicate ale aerului ($F_{TEMP_{AIR_MAX}}$) agravează stresul hidric, în special în stadiul BBCH 50-70, accelerarea evapotranspirației (F_{EVAPO}), ceea ce duce la epuizarea rapidă a umidității solului.

De asemenea, temperatura solului influențează semnificativ mineralizarea azotului (N) și descompunerea resturilor vegetale. Astfel, temperaturile mai ridicate cresc activitatea microbiană ($F_{N_{RESID}}$), accelerând descompunerea materiei organice și eliberarea azotului. Rezultate obținute demonstrează că temperaturile optime pentru descompunerea microbiană sunt de obicei între 20 °C și 30 °C. Sub 10 °C, descompunerea încetinește considerabil, ceea ce poate întârzia disponibilitatea azotului pentru absorbția plantelor. Temperaturile mai reci ale solului, în special la începutul primăverii, pot întârzia eliberarea azotului, reducând potențialul de randament dacă descompunerea întârzie față de stadiile critice de creștere.

Impactul fertilizării asupra producției

Din rezultatele furnizate prin Replicarea digitală, se confirmă că necesarul de îngrășămintă cu azot este dat în funcție de stadiile BBCH. Astfel, în stadiile timpurii BBCH 10-20, acestea necesită mai puțin azot, în timp ce stadiile critice precum BBCH 30-39 și BBCH 50-59 au cerințe mai mari. Rezultate cercetărilor proprii obținute prin *Replicarea Digitală* legate de disponibilitatea azotului din descompunerea resturilor ($F_{N_{RESID}}$), din fixarea prin simbioză ($F_{N_{LEGUM}}$) și din gunoiul de grajd aplicat ($F_{N_{GARB}}$) trebuie să fie sincronizată cu aplicarea îngrășămintelor minerale ($F_{N_{APPLIED}}$), întrucât eliberarea, stocarea și absorbția acestora se face progresiv corelat cu stadiile de creștere optimă a plantei influențând productivitatea. Mineralizarea târzie a azotului din cauza temperaturilor scăzute ale solului poate duce la o nepotrivire cu cererea maximă de azot, în special în timpul alungirii tulpinii și umplerii boabelor, ceea ce poate duce la o reducere a randamentului.

Pe de altă parte, dacă temperaturile solului favorizează o mineralizare rapidă a azotului la începutul sezonului (înainte de BBCH 30), azotul poate fi pierdut prin levigare sau volatilizare înainte de a fi utilizat pe deplin de cultură, afectând, de asemenea, negativ randamentul.

Rezultatele Replicării Digitale în combaterea buruienilor

Aplicarea dozelor scăzute de erbicide, în combinație cu gestionarea optimizată a acoperirii culturilor, cum ar fi umbrirea realizată de porumb, este o tehnică cunoscută adesea sub denumirea de "gestionare integrată a buruienilor". Această metodă folosește atât controlul chimic (erbicidele), cât și controlul fizic/biologic (umbrirea prin acoperire vegetală) pentru a reduce populațiile de buruieni, în timp ce minimizează utilizarea erbicidelor, costurile și impactul asupra mediului.

Porumbul, fiind o cultură înaltă și cu creștere rapidă, are potențialul de a concura cu buruienile prin formarea unei acoperiri dense, care limitează accesul la lumină pentru buruieni. Multe specii de buruieni depind foarte mult de lumină pentru creștere și reproducere. Umbrirea realizată de acoperirea de porumb poate reduce semnificativ biomasa buruienilor, în special pentru buruienile cu frunze late, care sunt sensibile la umbră. Porumbul dezvoltă o acoperire completă relativ rapid, mai ales atunci când este plantat la densități optime. Cu cât acoperirea se încheie mai repede (adică frunzele se suprapun și acoperă solul), cu atât mai mare este impactul asupra buruienilor, datorită reducerii accesului la lumină.

Dacă erbicidul este aplicat la o doză care doar stresează, dar nu ucide buruiana, există riscul dezvoltării rezistenței. Astfel, integrarea efectului de acoperire ajută prin stresarea suplimentară a buruienilor prin umbră, ceea ce face ca și dozele sub-letale să fie mai eficiente. Erbicidul trebuie aplicat în sezonul de creștere, înainte ca acoperirea porumbului să se încheie complet, dar când buruienile sunt încă mici și vulnerabile. Acest lucru previne stabilirea buruienilor și competiția cu cultura de porumb în fazele timpurii.

Astfel rezultatele experimentale privind această metoda de combaterea a buruienilor din câmpul Shengen a fost confirmată de Replicarea digitală. Cu toate că buruienile nu au fost complet distruse, ciclul lor de dezvoltare a fost întârziat de substanța activă, astfel în perioada de 3 săptămâni post aplicare, umiditatea din sol și GDD au influențat BBCH-ul culturii, astfel porumbul a trecut din **BBCH**_{PERIOD}=[10,19] în **BBCH**_{PERIOD}=[20,29], asigurând umbrirea buruienilor, ceea ce a dus la o reducere a costurilor cu combaterea buruienilor la 25%

Concluzii finale

Din datele opțiune conform simulărilor prin replică digitală, se observă că în faza BBCH 20-30, culturile manifestă o sensibilitate moderată la secetă, dar dezvoltarea rădăcinilor poate fi afectată, limitând în acest fel absorbția de nutrienți. În faza BBCH 50-59 culturile sunt manifestă o sensibilitate ridicată la secetă ceea ce duce la reducerea numărului de semințe, determinând o scădere a producție. Seceta în faza BBCH 70-89 afectează greutatea boabelor și randamentul final. În etapele ulterioare (BBCH 80+), impactul secetei este redus, dar boabele încă suferă probleme de dezvoltare.

Disponibilitatea azotului în timpul stadiilor critice de creștere (BBCH 30-50) este esențială pentru optimizarea randamentului. Insuficiența azotului în aceste stadii, adesea din cauza descompunerii întârziate a materiei organice în condiții de sol rece, poate duce la o reducere a biomasei plantelor și a randamentului de boabe.

Rezultatele cercetărilor proprii au evidențiat importanța dintre descompunerea lentă a resturilor și temperatura solului, demonstrând că eliberarea azotului se cumulează progresiv în cantitatea totală de azot din sol respectiv consumul acestuia de către plantă în funcție de stadiile BBCH contribuind în acest fel la sporirea producției și a randamentului la hectar.

Levigarea azotului este un factor important în Replicarea digitală, variind foarte mult în funcție momentul aplicării azotului, precipitațiile acumulate, structura solului și panta terenului. Rezultatele arată că levigarea este mai mare în regiunile cu precipitații anuale >400 mm, pe sole plate sau ușor înclinate (1-3%), în special pe solurile nisipoase cu aport ridicat de azot. Pe solele cu pantă mai abruptă (>5%), scurgerea

de suprafață domină, reducând levigarea, dar crescând pierderile de azot prin căile de suprafață. Din aceste considerate indiferent de cultură, pe solele din Luxembourg aplicarea îngrășămintelor se recomandă aplica doar primăvara, confirmat de rezultatele simulării prin Replicarea digitală.

Utilizarea dozelor scăzute de erbicid în combinație cu efectul de umbrire al acoperirii de către cultură poate fi o strategie eficientă de gestionare integrată a buruienilor. În timp ce reduce utilizarea chimicalelor și impactul asupra mediului, aceasta necesită o gestionare atentă a speciilor de buruieni, selecția erbicidului și momentul aplicării pentru a asigura eficacitatea. În special, această abordare funcționează bine în sisteme în care o acoperire densă a culturilor(ex. porumb, floare soarelui) poate concura cu buruienile, iar buruienile sunt sensibile la lumină, oferind o alternativă sustenabilă la aplicările de erbicide în doze mari.

Utilizarea fluxurile de date legate de cultură și parametrii pedo-climatici în modelul de **Replicare Digitală** ajută la identificare erorilor tehnologice dar și a simula impactul asupra culturilor existente în corelație cu schimbările climatice.

Modelul de **Replicare Digitală** este un instrument al viitorului, obligatoriu pentru orice fermier care se luptă cu schimbările climatice. Modelul procesează fluxurile de date istorice și predictive despre istoricul climatului solei și solului, starea curentă a acestora, respectiv informații specifice culturilor anterioare și de viitor, pentru a optimiza utilizarea nutrienților, a prezice etapele de creștere și corelația acestora cu necesitățile culturii din punct de vedere fertilizare, necesar apă și tratamente, respectiv evaluarea riscurilor de mediu și prevenirea degradării solului.

Life Sciences University “Regele Mihai I” of Timișoara



Faculty of Agriculture
Ing. CHIȚU CĂTĂLIN

DOCTORAL THESIS

**ADVANCING CROP YIELD OPTIMIZATION THROUGH
DIGITAL TWIN TECHNOLOGY**

Scientific coordinator

Prof. Dr. Ing IMBREA Florinel

Timișoara

2024

THESIS SUMMARY

This paper aims to determine the influence of technological links and climate changes on productivity using Smart monitoring technologies, with reference to the main technological inputs (biological material, sowing period and level of fertilization, weeding), satellite monitoring for the weather & crop evolution and defining and usage of digital-twin algorithms for crop risks and productivity.

Research objectives . The main objectives pursued in this paper consisted of:

- 1) Influence of environmental factors on production in correlation with the pedoclimatic conditions in the area: western Romania (Syria), southeastern Romania (Bărăganu), southern Romania (Mihai Bravu), northern Luxembourg (Christnach), western Luxembourg (Dippach and Schengen);
- 2) Digital twin technology for the herbicidy efficacy treatments according to soil water potential correlated with the amount of precipitation, temperature, humidity, solar radiation and BBCH;
- 3) Digital-twin model definition for productivity, focusing on vectors given by environmental parameters, soil water, optimal application of treatments and fertilization, processing digital data streams generated by IOT sensors and satellite spectral scanning, with support of pedoclimatic evolution over the 5 years.

The degree of inclusion of the theme in the international, national, regional concerns of the research group . Digital Twin and smart technologies in agriculture involve the creation of virtual representations of physical agricultural systems, which can be used for various purposes such as optimizing crop management, yield prediction and efficient resource management. Some of the key applications of "***Digital Twin in Agriculture*** " include precision agriculture, smart agriculture and of crop modeling parameters.

The following IOT technologies and devices were used in the research:

- agro -meteorological stations Lumbara Base equipped with wind direction, wind speed, rain gauge, solar radiation, brightness, UV index, Air Temperature and Humidity, atmospheric pressure;
- Lumbara Soil agro -meteorological stations equipped with a TEROS12 sensor (made in the USA) for moisture (VWC), temperature and soil EC and a TEROS21 sensor (made in the USA) for soil water potential and soil temperature;
- Lumbara Eye agro -meteorological station equipped with a 4K image sensor, Sony, 20x optical zoom and horizontal rotation 0-350 degrees, vertical rotation 0-90 degrees;
- Satellite images for visualization in different spectra of the evolution of the culture, respectively the shape of the land and the amount of water;

- The evolution of the weather based on satellite data and the history of pedo-climatic parameters on each location.

Presentation of the experimental fields

Christnach is a village located in the east of Luxembourg in the Eternach region, being exposed to a temperate climate with maritime influences. The area is hilly, exposed to moderate temperatures throughout the year. Summers are usually mild to warm, with average high temperatures between 20 °C and 25 °C. Winters tend to be cold, with average lows around 0 °C. The Eternach region receives a moderate amount of rainfall evenly distributed throughout the year. Precipitation is relatively consistent, without distinguishing a dry season. Annual rainfall generally ranges from 700 to 900 millimeters. During the winter months, Christnach and the surrounding areas are covered in snow. More snow can accumulate, especially at higher elevations and especially during colder winters. The region experiences a moderate amount of sunshine throughout the year, however during the summers crops receive more hours of light and solar energy than in the spring and autumn. Spring and autumn are transitional seasons with mild and sometimes very changeable temperatures.

Dippach is part of the canton of Capellen, located in the west of Luxembourg. The administrative center is the town of Schouweiler. The Mess river, a tributary of the Alzette River, originates at this location. In Dippach, the summers are comfortable and partly cloudy, and the winters are very cold, windy, and mostly cloudy. The warm season lasts for 3.1 months, from June 3 to September 8, with an average daily high temperature of over 19 °C. The hottest month of the year in Dippach is July, with an average high of 23 °C and low of 14 °C. The cold season lasts 3.6 months, usually from November 16 to March 5, with an average daily high temperature below 7 °C. The coldest month of the year in Dippach is January, with an average minimum of -1 °C and maximum of 4 °C.

Schengen, a vineyard town in Luxembourg, is located at the intersection of the borders between Germany, France and Luxembourg, is part of the canton of Remich located in the east of Luxembourg. The warm season lasts for 3.1 months, from June 4 to September 15, with an average daily high temperature of over 20.5 °C. The warmest month of the year in Schengen is July, with an average maximum of 23.9 °C and minimum of 14.4 °C. The cold season lasts 3.6 months, usually from November 15 to March 4, with an average daily maximum temperature below 7.8 °C. The coldest month of the year in Schengen is January, with an average minimum of 0 °C and a maximum of 3.9 °C.

Bărăganu is located in the south-east of Romania in the southern extremity of Brăila county, on the border with Ialomița county. Being exposed to a temperate climate with maritime influences. The climate of the area is temperate-continental characterized by very hot summers and very cold winters, by a relatively large annual and diurnal thermal amplitude and by precipitation in small amounts. The average annual duration of the Sun shines between around 2200 hours, the annual number of days with a clear sky is 100 days, and with an overcast sky 120 days. Average annual air temperature 11 °C. Atmospheric precipitation varies between 380 and 490 mm/year, the winds have the dominant directions of northeast,

north, southwest and south, the dominant being the river bed. The relative humidity of the air varies between 70 and 76%. Frost, frost and blizzard are noted in the cold period, drought, dew and hail in the warm periods of the year.

Şiria is located in Arad county (west Romania), exposed to the moderate temperate-continental climate zone, characterized by not too cold winters and warm summers. In summer, as a result of the increase in the intensity of solar radiation (over 15 cm²/month) and the predominance of clear weather, the air temperature registers high values - the monthly average exceeding 20 °C. Average annual temperature: +10.5 ° C; Absolute maximum temperature: + 38.1 ° C; Absolute minimum temperature: -20 ° C; Precipitation: 45.93 l/m²; Average wind: 2,575 l/m²; Frost depth: 0.80 m from current ground level. The average annual air temperature is kept around 12 °C. Analyzing the temperature situation in January, the coldest month of the year; it is observed that the annual thermal values oscillate between 0.3 and 1.5 °C, being higher than in Bărgănu or in Luxembourg, constituting an indication of moderate winter. The fact that the winters are milder in this part of the country is also proven by the temperature values in the other months of the cold season (0.9 °C for December and +2.5 °C for February). The multiannual average of the air temperature, calculated over the entire period of the cold season, is 0.9 °C.

Mihai Bravu is located in Giurgiu county (south Romania), exposed to the temperate-continental climate zone. Due to its altitude and geographical position, there can be harsh winds in winter, even if some are mitigated by the forests. Temperatures in winter reach below 0 °C, even if they rarely fall below -10 °C. In summer, the average temperature for July and August is 23 °C, although in recent years temperatures have exceeded 40 °C at noon. The average rainfall and humidity during the summer is low, but there are occasional violent thunderstorms. During summer and autumn, temperatures vary between 18-22 °C, and precipitation during this period tends to increase, being more frequent but gentle periods of rain. The lowest average monthly temperature is recorded in January, with an average value of -3 °C. Summer is very hot, in July the average temperature is 23 °C, sometimes it even reaches 35 - 40 °C. Precipitation is low, on average 585 mm per year, but has a higher flow in summer: the highest average monthly amounts of precipitation fall in June (about 85 mm), and the lowest in March (15 mm). On average, precipitation falls on the territory of the commune in 117 days/year.

Digital Twin technology was invented and implemented by NASA in order to verify the behavior of spacecraft and is defined as a virtual / digital representation of physical systems to simulate the behavior of the physical system. There are different definitions for this concept available in specialized literature. Based on the reported definitions, the *Digital Twin* may be given by the physical and virtual entities, as well as a set of intelligent connections between the physical entities and their digital counterparts.

Basically, *Digital Twin* represents a digital copy of a system, product, or process (eg agricultural) from the real world. The *Digital Twin* serves as a digital counterpart of the entity in the real environment, such as simulating, integrating, testing, monitoring and maintaining the real one before applying it in the field. The *Digital Twin* was intended to be a core tool for managing the lifecycle of that system or product and exists throughout the entire lifecycle (creation, build, operation/support and disposal) of the physical entity it represents.

Digital twin in production

Monitoring and evaluating soil quality to support plant productivity is the basis of land use strategies in agricultural farms. The health and productivity of crops depend on the quality and properties of the soil but also on the climatic evolution of the area. More detailed information about agricultural soil can reduce the potential use of chemical fertilizer and pesticide doses, thereby improving groundwater, protecting the environment and human health. It also supports the definition of plant density in a more efficient way.

In agriculture, *Digital Twin* supports scientists to better study soil and farmers to understand crop behaviors in their region. Soil monitoring sensors such as moisture, temperature, organic matter play critical roles in digital agriculture. For example, soil moisture information can be used to assess irrigation efficiency in agricultural fields. In addition, to support smart agriculture decision-making, digital soil scanning is essential, bringing spatial information on the evolution of macro/micro elements through field and laboratory investigations together with satellite scanning systems. Digital soil assessment approaches have a direct impact on crop yield and performance by identifying areas that may cause low crop yield. Alternative digital methodologies for studying the soil and identifying the main characteristics would have the possibility to simulate its evolutionary trends.

In the framework of the thesis, the *Digital Twin* model was developed as a software program with Microsoft Excel parameters visualization, implementing the aggregation of data flows of pedoclimatic conditions on each soil, the results related to nitrogen fertilization and productivity for wheat, corn, rape crops and soy. The proposed *Digital Twin* model takes into account the impact of fertilization and nutrient variations at different growth stages given by the scale of BBCH and the evolution of GDD. Input streams given by sensors, satellites as well as weather forecast, include both maximum-minimum temperature readings, humidity during critical growing periods. Thus, at underground level, soil temperature at depths of 10 cm and 30 cm, directly influences seed germination and root development directly related to nutrient availability and plant growth in each state of the plant. The soil moisture at these levels is essential in the calculation of the availability of water required by the plant but also the transformation of plant residues into nitrogen covering its dilution and absorption. Soil moisture content affects germination, root development and nutrient transport. The model tracks moisture levels over time, correlating them with rainfall/irrigation and evaporation rates. Above ground, the air temperature influence the plant development, especially during critical phases such as germination, flowering and fruiting or dormancy. Both maximum and minimum temperature values are used to assess heat stress and frost risks. Nitrogen in plant residues includes their decomposition from crops harvested 2 years before. These residues release nitrogen into the soil in a slow way being directly linked to soil factors. Thus, the amounts and rates of decomposition vary depending on the type of previous crops, residues, soil conditions (eg PH, texture), moisture and temperature. Running the model with these inputs, include estimated nitrogen release rates, which guide fertilization strategies. Moreover, using inputs such as soil moisture and temperature, the model predicts crop growth stages, including emergence, flowering and maturity. These predictions allow farmers to optimize the right planting and harvesting time.

At the same time, the *Digital Twin* provides recommendations for water management based on soil moisture levels and evapotranspiration rates, highlighting water stress. This ensures efficient irrigation, minimizing water wastage and preventing water stress. Assessing environmental risks, such as low soil temperatures or excessive moisture, which could lead to slow growth or nutrient uptake problems

The proposed model takes into account a standard rate of nitrogen absorption for wheat, corn, canola and soybean crops, which can be adjusted based on soil fertility and weather conditions. It also considers the impact of soil microorganisms influencing nitrogen mineralization. Soil moisture and temperature are essential factors for nutrient availability and root growth. The model integrates dynamic historical and predictive weather inputs, assuming that constant monitoring of soil properties provides accurate predictions of plant health. Nitrogen decomposition in crop residues is modeled based on the carbon-to-nitrogen ratio of the residues and environmental conditions such as temperature and humidity. The model assumes standard decomposition rates by soil type. Air temperature plays a significant role in both plant metabolic rates and potential stress conditions. The model uses historical temperature data to calculate growing days (GDD) and to predict BBCH growth and flowering phases

Another aspect studied is related to the effectiveness of herbicide treatments given the vegetative stage (BBCH) and the factors of the *Digital Twin* model listed above. The amounts of herbicide applied per hectare, respectively the costs, vary significantly if the operations are done in the optimal parameters and the appropriate BBCH vegetative stages.

The impact of the degree of water supply on production

Adequate soil moisture stimulates growth. When soil moisture is at an adequate level, crops receive the water needed for essential processes such as photosynthesis, nutrient uptake, and cell expansion. This leads to healthy growth, especially during critical growth stages such as flowering and pod filling (ex soybeans). With sufficient soil moisture, the crop can maximize its genetic production potential, resulting in higher yields.

As seen from *Digital Twin* tool simulations on wheat, maize, soybean, canola and barley soil moisture causes water stress results when the soil level drops below the crop's requirement, especially during critical stages such as flowering (BBCH 60-69) and grain formation (BBCH 70-79). This leads to reduced cell expansion, a smaller number of grains and their low weight. Water stress during these periods can lead to significant yield losses, from simulations up to 50-70%, depending on its severity and duration.

Excessive soil moisture (Luxembourg area) can also be harmful, so too high a value can reduce the oxygen available to plant roots, affecting respiration and nutrient absorption. This can slow growth or even lead to root disease. Although excess moisture is less common than drought problems, a prolonged exposure can reduce production by 10-30%, according to digital replication using pedoclimatic data on that plot location.

The relationship between soil moisture and water use efficiency (WUE), is the ratio of agricultural production to the amount of water used. When soil moisture levels are optimal, plants can use water efficiently, resulting in a higher WUE value. Low or high humidity levels lower WUE, reducing overall production.

Soil moisture during critical growth stages is another important factor in *Digital Twin* simulations. Thus during germination, adequate humidity (20%-25%) is essential for seed germination and during flowering and pod filling, a moisture deficit in the soil directly reduces the number of flowers, pods and seed weight.

As a result, maintaining optimal soil moisture levels, especially during critical growth stages such as flowering and pod filling, is critical to maximizing production. Soil moisture stress (either too low or too high) can significantly affect yield potential by reducing growth, pod formation and seed development.

The impact of temperature on production

From the results provided by the *Digital Twin* simulations, it is observed that high air temperatures ($F_TEMP_{AIR_MAX}$) aggravate the water stress, especially in the BBCH 50-70 stage, the acceleration of evapotranspiration (F_EVAPO), which leads to the rapid depletion of soil moisture.

Soil temperature also significantly influences nitrogen (N) mineralization and plant residue decomposition. Thus, higher temperatures increase microbial activity (F_N_{RESID}), accelerating the decomposition of organic matter and the release of nitrogen. Results obtained demonstrate that the optimum temperatures for microbial decomposition are usually between 20 °C and 30 °C. Below 10 °C, decomposition slows considerably, which can delay the availability of nitrogen for plant uptake. Cooler soil temperatures, especially in early spring, can delay nitrogen release, reducing yield potential if decomposition lags behind critical growth stages.

The impact of fertilization on production

From the results provided through the *Digital Twin* simulations, it is confirmed that the nitrogen fertilizer requirements are driven by BBCH stages. Thus, in early stages BBCH 10-20, they require less nitrogen, while critical stages like BBCH 30-39 and BBCH 50-59 have higher requirements. The results of own research obtained through the *Digital Twin* related to the availability of nitrogen from the decomposition of residues (F_N_{RESID}), from fixation by symbiosis (F_N_{LEGUM}) and from the applied manure (F_N_{GARB}) must be synchronized with the application of mineral fertilizers ($F_N_{APPLIED}$), since their release, storage and absorption is progressively correlated with the optimal growth stages of the plant, influencing productivity. Late nitrogen mineralization due to low soil temperatures can result in a mismatch with peak nitrogen demand, particularly during stem elongation and grain filling, which can result in reduced yield.

On the other hand, if soil temperatures favor rapid N mineralization early in the season (before BBCH 30), N may be lost through leaching or volatilization before it is fully utilized by the crop, also adversely affecting yield.

Results of digital twin simulations in weed control

Applying low rates of herbicides in combination with optimized cover crop management, such as shading by corn, is a technique often known as "integrated weed management". This method uses both chemical control (herbicides) and physical/biological control (shading by vegetative cover) to reduce weed populations while minimizing herbicide use, costs, and environmental impact.

Maize, being a tall and fast-growing crop, has the potential to compete with weeds by forming a dense cover that limits light access for weeds. Many weed species are highly dependent on light for growth and reproduction. Shading provided by corn cover can significantly reduce weed biomass, especially for

broadleaf weeds, which are sensitive to shading. Corn develops full cover relatively quickly, especially when planted at optimal densities. The faster the cover closes (ie the leaves overlap and cover the soil), the greater the impact on weeds due to reduced access to light.

If the herbicide is applied at a rate that only stresses but does not kill the weed, there is a risk of developing resistance. Thus, the integration of the cover effect helps by further stressing the weeds through shading, which makes even sub-lethal doses more effective. The herbicide should be applied during the growing season, before the corn cover is fully closed, but when the weeds are still small and vulnerable. This prevents weeds from establishing and competing with the corn crop in the early stages.

Thus, the experimental results regarding this method of weed control in the Schengen field were confirmed by the *Digital Twin* simulation outputs. Although the weeds were not completely destroyed, their development cycle was delayed by the active substance, so in the period of 3 weeks after application, soil moisture and GDD influenced the BBCH of the crop, thus the corn passed from **BBCH PERIOD** = [10,19] in **BBCH PERIOD** = [20,29], ensuring weed shading, resulting in a 25% reduction in weed control costs

Final conclusions

As results of *Digital Twin* simulations, it is observed that in the BBCH 20-30 phase, crops show moderate sensitivity to drought, but root development may be affected, thus limiting nutrient uptake. In the BBCH 50-59 phase, crops show a high sensitivity to drought, which leads to a reduction in the number of seeds, causing a decrease in production. Drought at the BBCH 70-89 stage affects grain weight and final yield. In the later stages (BBCH 80+), the impact of drought is reduced, but the grains still suffer development problems.

Nitrogen availability during critical growth stages (BBCH 30-50) is essential to optimize yield. Nitrogen deficiency at these stages, often due to delayed decomposition of organic matter under cold soil conditions, can result in reduced plant biomass and grain yield.

The results of our own research have highlighted the importance of the slow decomposition of residues and the temperature of the soil, demonstrating that the release of nitrogen accumulates progressively in the total amount of nitrogen in the soil, respectively its consumption by the plant depending on the BBCH stages, contributing in this way to increasing production and yield per hectare.

Nitrogen leaching is an important factor of the crop digital replica, varying greatly with the timing of nitrogen application, accumulated rainfall, soil structure, and land slope. The results show that leaching is greater in regions with annual rainfall >400 mm, on flat or slightly sloping soils (1-3%), especially on sandy soils with high nitrogen input. On soils with steeper slopes (>5%), surface runoff dominates, reducing leaching but increasing nitrogen losses through surface pathways. From these considerations, regardless of the culture, on Luxembourg soils, it is recommended to apply fertilizers only in the spring, confirmed by the results of the *Digital Twin* simulations on that plots.

The use of low herbicide rates in combination with the shading effect of crop cover can be an effective integrated weed management strategy. While it reduces chemical use and environmental impact, it requires careful management of weed species, herbicide selection and application timing to ensure effectiveness. In particular, this approach works well in systems where a dense cover crop (eg corn,

sunflower) can compete with weeds and the weeds are sensitive to light, providing a sustainable alternative to high-dose herbicide applications.

The use of crop-related data streams and pedo-climatic data as inputs of the *Digital Twin* model helps to identify technological errors but also to simulate the impact on existing crops in correlation with climate change.

The *Digital Twin* for crop simulation is a tool of the future, a must-have for any farmer fighting climate change. The model processes historical and predictive data streams about soil and soil climate history, their current condition, weather forecast impact and best future crops, to optimize nutrient use, predict growth stages and their correlation with crop needs fertilization, necessary water and treatments, respectively the assessment of environmental risks and the prevention of soil degradation.