

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ



Technická zpráva k projektu v předmětu IMS

T7: CA v oblasti ekologie

Analýza odlesňování v Brazílii

10. prosince 2023

Autoři:

Tomáš Ebert, xebert00

Kateřina Čepelková, xcepel03

Obsah

1	Úvod	2
1.1	Autoři a zdroje faktů	2
1.2	Ověření validity projektu	2
2	Rozbor tématu a použitých metod/technologií	3
2.1	Popis použitých postupů	3
2.1.1	Vícevrstvá mapa	4
2.1.2	Okolí buněk	5
2.2	Popis původu použitých metod/technologií	6
3	Koncepce - modelářská témata	7
3.1	Způsob vyjádření konceptuálního modelu	7
3.2	Formy konceptuálního modelu	7
4	Koncepce - implementační témata	9
5	Architektura simulačního modelu/simulátoru	11
5.1	Mapování abstraktního modelu do simulačního	11
6	Podstata simulačních experimentů a jejich průběh	12
6.1	Postup experimentování	12
6.2	Dokumentace jednotlivých experimentů	12
6.3	Závěry experimentů	15
7	Shrnutí simulačních experimentů a závěr	16

1 Úvod

Práce vznikla v rámci předmětu Modelování a simulace na Fakultě informačních technologií VUT v Brně. Modeluje (IMS prezentace - s. 8) systém (IMS prezentace - s. 7) lesa inspirovaného Brazílií. Model (IMS prezentace - s. 7) je vytvořený za pomoci celulárního automatu (IMS prezentace - s. 212).

Cílem simulace (IMS prezentace - s. 8) je predikce budoucí deforestace na území inspirovaném daty Brazílie od roku 2015 za účelem odpovědi na otázku, zda je realizovatelný slib brazilského prezidenta Luiz Inácio Lula da Silva. Ten se zavázal, že do roku 2030 ukončí brazilské odlesňování [2].

Předmětem zkoumání je uměle vytvořená abstrakce území inspirovaném daty Brazílie ukazující nárůst či pokles zalesnění oblastí.

1.1 Autoři a zdroje faktů

Autory práce jsou Kateřina Čepelková a Tomáš Ebert - studenti Fakulty informačních technologií VUT v Brně.

Inspirací pro přístup k implementaci projektu byl projekt, který pro získání výsledků odlesňování pracuje s několika vrstvami, kde každá vrstva obsahuje pouze data pro danou problematiku (např. klima, nadmořská výška atd.) [18]. Konkrétní výpočty pak byly inspirovány projektem, který se zabývá problematikou odlesňování Centrálních Zagorských lesů v Íránu [9].

Hlavním zdrojem odborných faktů byly především různé oficiální webové stránky zpravodajských portálů [11, 1] a výzkumných center [8, 19]. Jejich důvěryhodnost byla vždy podložena dalšími články od jiných zdrojů.

1.2 Ověření validity projektu

Pro ověření validity (IMS prezentace - s. 37) jsme provedli simulaci deforestace již od roku 2015. Díky tomu jsme mohli porovnat výsledky z prvních 8 let s vývojem reálné situace [16, 19, 20, 6].

Validita byla ověřována také pomocí průběžné simulace modelu a srovnávání jejich výsledků s jinými pracemi, které se zabývají stejnou či podobnou problematikou [5, 17].

2 Rozbor tématu a použitých metod/technologií

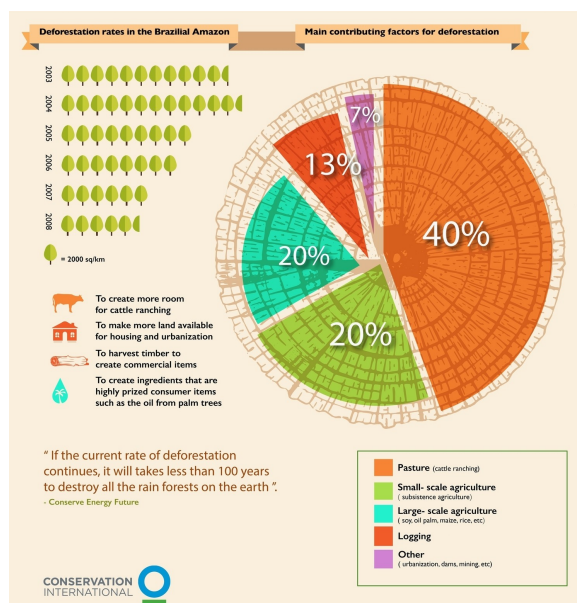
Lesy pohlcují uhlík, proto jsou velmi výhodné pro regulaci oxidu uhličitého a dalších skleníkových plynů. Tropický les samotný je schopen pohltit od 228 až do 247 gigatun uhlíku, což je až sedmi násobek toho, co dokáže lidstvo vyprodukovat za rok. Odlesňování tudíž znečišťuje a uvolní se tedy pak více skleníkových plynů, což způsobuje klimatické změny. Například v roce 2022 se deforestace podílela na 7 % celosvětových emisích [7].

Mezi hlavní příčiny deforestace můžeme řadit chov dobytka a pěstování sójových bobů. Tyto dvě příčiny spolu souvisí, neboť pro pastvu dobytka je nutno vykácet část lesa. Poté se může stát, že další obyvatelé na tomto území chtějí pěstovat sójové boby, neboť Brazílie je jeden z největších pěstitelů na světě. Chov dobytka se proto opět posune dále, kde je nutno vykácet další část lesa. Po pěstování sóji zůstává půda bez živin a snižuje se její produktivita pro pěstování a šance na znovuzalesnění [3].

Luiz Inácio Lula da Silva se stal prezidentem 1. ledna 2023 a ihned začal s úspěšnou kampaní proti deforestaci [2]. Luiz Inácio Lula da Silva nasadil přes 700 agentů na kontrolu ilegální deforestace. Kontrola probíhá pomocí satelitních snímků [10]. Jeho cílem je do roku 2030 omezit veškerou ilegální deforestaci a tím co nejvíce snížit dopad na životní prostředí [4].

2.1 Popis použitých postupů

Modelem je celulární automat. Při postupu odlesňování mimo jiné závisí i na sousedních buňkách (buňka má vyšší pravděpodobnost vykácení, jestliže se v jejím okolí již nachází vykácené části).



Obrázek 1: Příčiny odlesňování v Amazonii - rok 2018

Převzato z www.weforum.org

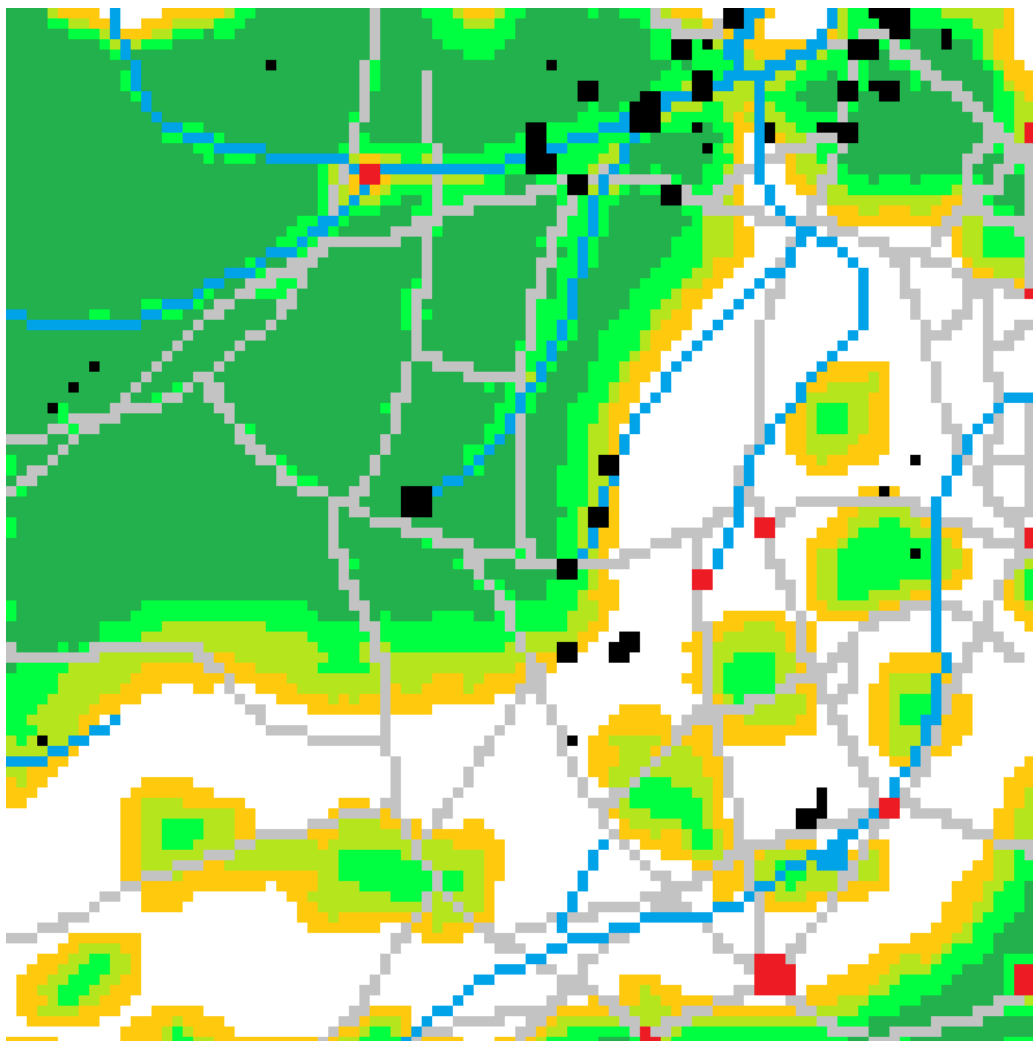
2.1.1 Vícevrstvá mapa

Pro vhodné zobrazování jsme se inspirovali již zmíněným projektem [18]. Ten využívá pro generaci výsledku několik map. My využíváme 5 mapových vrstev - 4, ze kterých se získává kontribuce k destrukci (mapa vodstva, měst, cest, dolů). Tyto prvky jsme vybrali jelikož, jak je vidět na obrázku 1, mají největší vliv na deforestaci v Brazílii. Na cesty se váže (ilegální) těžba dřeva [21], farmy [12], chov dobytka [14]. Na vodu a města se vážou farmy a chov dobytka [15]. Doly figurují jako samostatný faktor [13]. Nakonec využíváme 1 mapu zalesnění, do které se zároveň generuje výsledek.

Umělé mapy simulace jsou abstrakce inspirované rozmístěním a statistikou mapy Brazílie. Brazílie má 8 547 403 km². Každá mapa je zapsaná v matici 100x100, kde je tedy 10 000 čtverečků a každý čtvereček reprezentuje území 29km * 29km, tedy 841 km². Pro zlehčení výpočtů je tedy tato pracovní verze "Brazílie" velká 8 410 000 km². Všechny mapy vychází z dat reálného zaplnění Brazílie pracovními prvky a jejich přepočtu pro rozměry projektu a dle toho je také určena jejich poloha. Prvky zabírají celé políčko a to kvůli rozsahu jejich vlivu a také pro usnadnění zobrazování. Proto je také výhodné využít vícevrstvé mapy, jelikož na políčku, kde je např. situována cesta, je vhodné mít i informace o její zalesněnosti kvůli výpočtům okolí. Také je možné, že se některé prvky přispívající k destrukci mohou překrývat (např. městem prochází cesta). Pokud by tedy byly všechna data zapsaná pouze v jedné matici docházelo by ke ztrátě dat a proto ke zkreslení výsledku.



Obrázek 2: Mapa Brazílie
Převzato z www.mundomapa.com

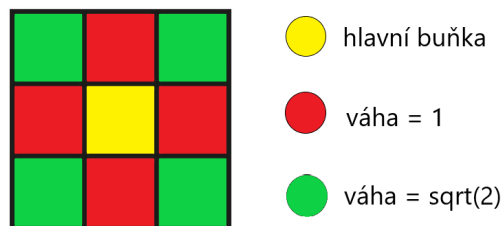


Obrázek 3: Projektová abstrakce mapy Brazílie, průnik všech 5 map

Na obrázku 3 je míra zalesnění zobrazena odstíny zelené - tmavě zelená (kolem 100 %), neonově zelená (kolem 80 %), světle zelená (kolem 60 %), žlutá (kolem 40 %), bílá (kolem 20 %). Modrou barvou jsou zobrazeny vodstva. Černá znázorňuje doly a těžební oblasti. Červená znázorňuje města. Šedá znázorňuje významné dopravní cesty (silnice, dálnice).

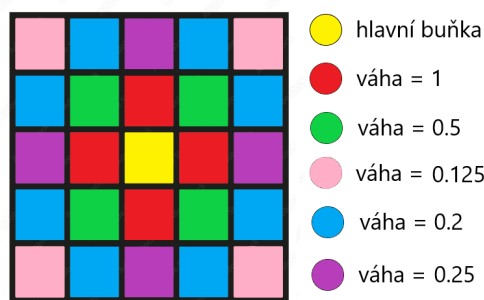
2.1.2 Okolí buněk

Pro okolí (IMS prezentace - s. 213) buněk v matici s mírou zalesnění je využito Moorovo okolí (IMS prezentace - s. 213) s upravenými vahami. Buňky, které by byly součástí Von Neumannova okolí (IMS prezentace - s. 213) mají každá váhu 1. Buňky v rozích Moorova okolí jsou vyděleny hodnotou $\sqrt{2}$, což odpovídá euklidovské vzdálenosti. Tento přístup jsme zvolili z důvodu delší vzdálenosti, kterou by např. lidé vypalující lesy pro pastvu dobytka museli ujít ve srovnání s cestou v rámci Von Neumannova okolí.



Obrázek 4: Okolí buňky zalesnění

Okolí pro zjištění vzdálenosti a působivosti různých destrukčních rizik je použito okolí o velikosti 5x5. Toto rozšířené okolí bylo vybráno, jelikož tyto prvky mají širší pole působivosti (např. největší destruktivita lesů dolů je viditelná do okolí 70 km) [13]. Váhy, které jsou přiřazovány různým sousedům, jsou vidět na obrázku 5. Jsou to mocniny 2, které jsou, podobně jako u okolí zalesnění, vypočítané podle jejich vzdálenosti od středu.



Obrázek 5: Okolí buňky typu destrukčních rizik

2.2 Popis původu použitých metod/technologií

I přes širokou dostupnost technických zpráv existujících návrhů postupů jsme se rozhodli, že v rámci projektu vytvoříme vlastní algoritmus. Algoritmus je inspirovaný projektem [9], který pro nás ale nebylo vhodné plně zreplicovat kvůli odlišným vstupním datům. Tento projekt nám poskytl pevný základ pro náš přístup k implementaci. Provedli jsme srovnání s dostupnými simulacemi a provedli testy, abychom zajistili efektivitu a správnost našeho vlastního řešení (např. generování od roku 2015, abychom výsledek mohli porovnat s reálnými daty). Tím jsme chtěli zaručit, že naše rozhodnutí přispěje k úspěšnému a promyšlenému průběhu našich experimentů.

Pro projekt byl využit jazyk C++. Díky své výpočetní rychlosti je vhodný pro vytvoření simulací, které jsou náročná na výpočty.

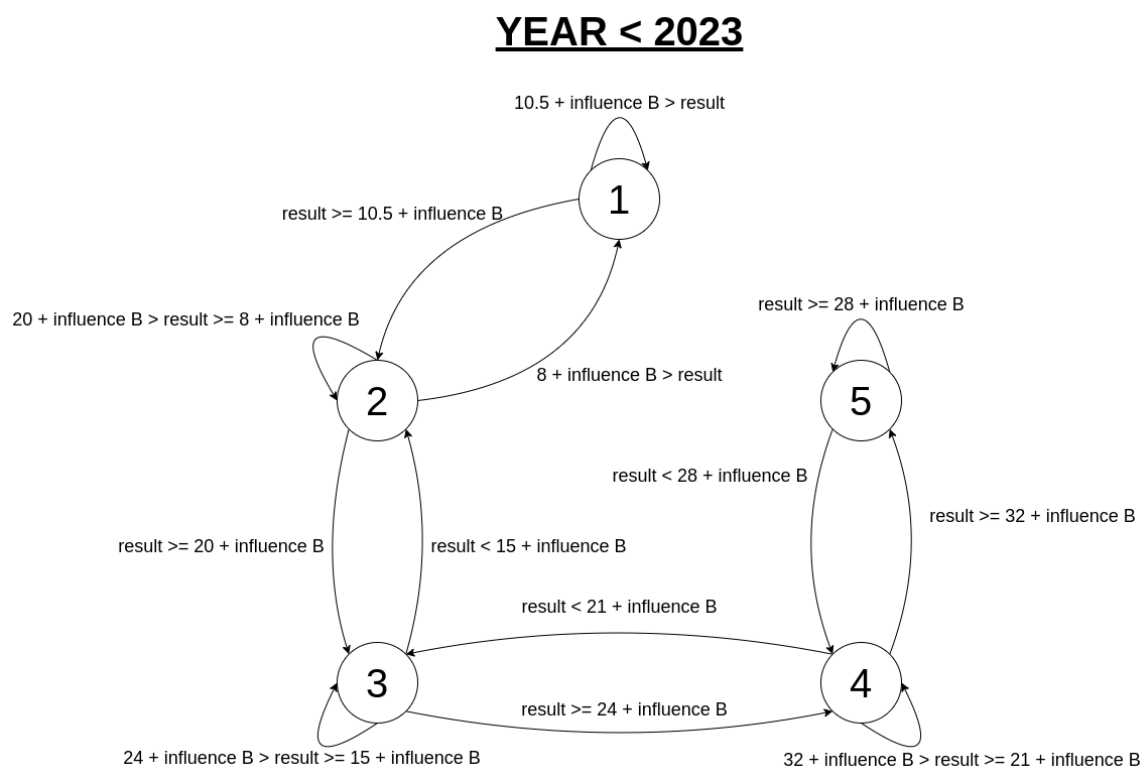
K vizualizaci a základní tvorbě mapových matic byl využit Godot Engine 4.1, do kterého byl kód přenesen v jazyce GDScript. Jeho klíčovým prvkem je Node TileMap, který umožňuje intuitivní kreslení mapy přímo v editoru. Díky němu máme schopnost vizuálně definovat strukturu mapy a následně z ní automaticky generovat odpovídající matici, což výrazně zjednodušuje proces vývoje.

3 Koncepce - modelářská témata

3.1 Způsob vyjádření konceptuálního modelu

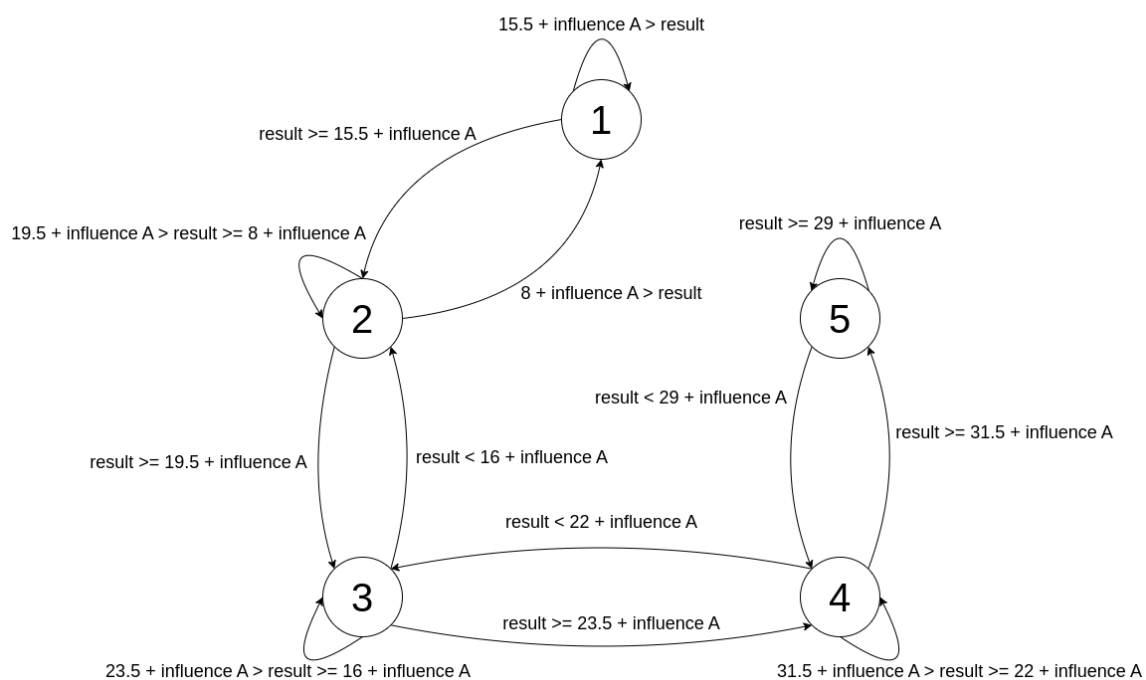
Na obrázcích 6 a 7 je diagram pravidel celulárních automatů využívaný v simulaci pro změnu stavu buňky matice zalesnění, které mohou nabývat hodnot 5 až 1. Každý stav může v jednom průchodu nabít pouze stavu svého, či o jedna menšího, nebo většího.

3.2 Formy konceptuálního modelu



Obrázek 6: Automat do roku 2023

YEAR ≥ 2023

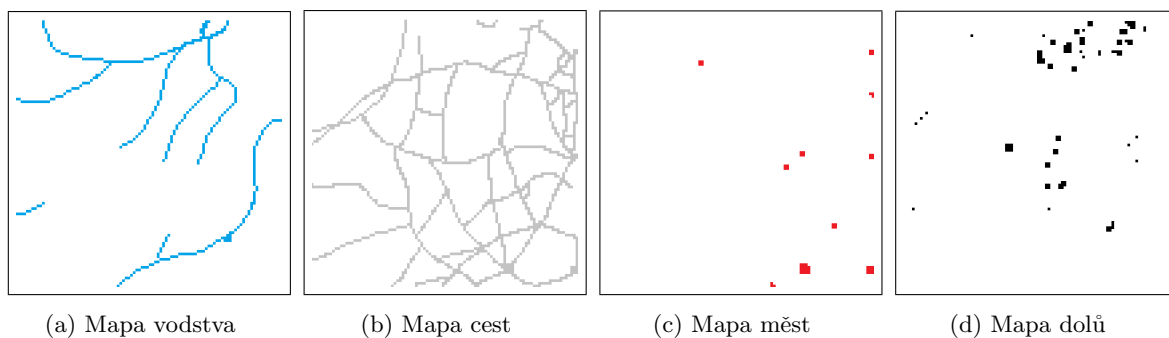


Obrázek 7: Automat od roku 2023

4 Koncepce - implementační témata

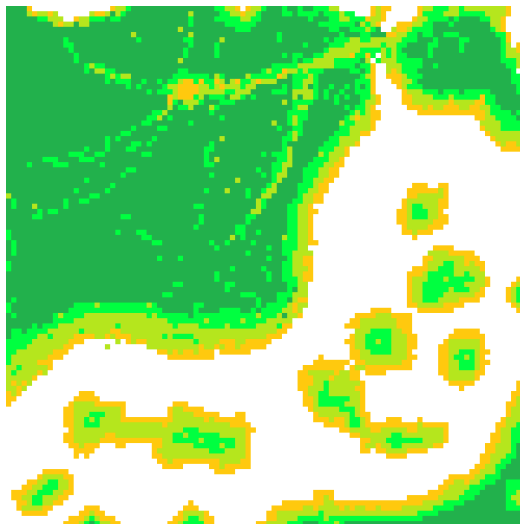
Po překladu a spuštění programu (bez parametrů) se po každém stisku tlačítka **Enter** je pomocí celulárního automatu vygenerována a následně vypsána statistika zalesnění pro nový rok. Ve statistice jsou vypsána tato data: modelovaný rok, zalesnění v km^2 , ztráta v km^2 oproti roku minulému. Simulace začíná s rokem 2015. Program se ukončuje pomocí **Ctrl + C**.

Každá mapa je vyobrazena maticí o velikosti 100x100. V následujícím obrázku jsou matice graficky znázorněny. První 4 obrázky ukazují destrukční prvky u kterých jsou barevné buňky znázorněné jako 1 a bílé jako 0.



Obrázek 8: Mapy destrukčních faktorů/prvků

Hlavní mapa, mapa zalesnění, je výsledkem dvou průchodů CA a to kvůli ustálení generování hodnot. Je vyobrazovaná pomocí 5 druhů barevných buněk. Nejvyšší hodnota (5) - tmavě zelená zobrazuje území se zalesněním na úrovni kolem 100 %. Dále pokračuje neonově zelená (4) - zalesnění kolem 80 %, světle zelená (3) - zalesnění kolem 60 %, žlutá (2) - zalesnění kolem 40 % a bílá (1) se zalesněním pohybujícím se kolem 20 % až 0. Hodnoty zalesnění jsou abstrakcí brazilských lesů v roce 2015.



Obrázek 9: Počáteční mapa zalesnění - rok 2015

Tyto mapy jsou následně "naskládány na sebe" (viz obrázek 3) a následně se vyhodnocují nové hodnoty každé buňky matice zalesnění.

Každá buňka v tomto celulárním automatu získá svoji hodnotu na základě zalesněnosti okolního prostředí a faktorů destrukce, které se v její blízkosti vyskytují. Každý faktor má svoji vlastní váhu podle jejího zastoupení jakožto původce deforestace. Tato váha je po v roce 2023 pozměněna, aby odrážela snahu o zmírnění deforestace. Spojením těchto hodnot dostaneme výsledek. Podle tohoto výsledku a původní hodnotou buňky je vybíráno pravidlo, podle kterého se vyhodnotí nový stav (5 - 1) aktuálně řešené buňky.

Data: matice, okolí buňky na mapě zalesnění, destrukční faktory v okolí buňky

Vstup : matice (matrix), řada buňky (row), sloupec buňky (col)

Výstup: nová hodnota buňky

```
// Získej hodnotu buňky (cell_value) a její okolí
cell_value ← matrix[row][col];
neighborhood ← direct_neighbors +  $\frac{\text{corner\_neighbors}}{\sqrt{2}}$ ;

// Vzdálenosti od všech typů destrukčních faktorů se započítanou vahou
mining_contribution ← mining_weight × near_mine;
roads_contribution ← roads_weight × near_road;
water_contribution ← water_weight × near_water;
cities_contribution ← cities_weight × near_city;

// Výpočet rozhodovacího výsledku
result = neighborhood - (mining_contribution + roads_contribution + water_contribution +
    cities_contribution);

// Výběr nové hodnoty buňky na základě result a cell_value
```

Algorithm 2: Algoritmus výběru nové hodnoty zalesnění pro buňku

Důležitým prvkem pro zachování konzistence implementace je, že každá buňka může změnit hodnotu svého zalesnění pouze o 1 stupeň, ať už je to přidání či odečtení. Toto zabraňuje nerealistickým nekontrolovatelným vymycováním velkých ploch.

5 Architektura simulačního modelu/simulátoru

Celý projekt je složen ze 4 C++ souborů: `all_matrix.cpp`, `all_matrix.h`, `generation.cpp` a `generation.h`.

Hlavní kód pro simulování je v `generation.cpp`. Po každém stisku tlačítka **Enter** funkce `update()` projde buňky matice zalesnění a vyhodnotí jejich novou hodnotu díky celulárnímu automatu ve funkci `deforestation()`. Následně na standardní výstup vytiskne informace o aktuálně modelovaném roku díky funkci `forest_info()`.

Funkce `deforestation()` aplikuje pravidla celulárního automatu na zadanou buňku. Získá jeho Von Neumannovy sousedící buňky do proměnné `int direct_neighbors` a rohové (rozšíření do Moorova sousedství) `float corner_neighbors`, které jsou následně vyděleny $\sqrt{2}$ kvůli jejich větší vzdálenosti od aktuálně přepočítávané buňky. Tyto hodnoty se sečtou pro získání hodnoty `float neighborhood`. Pomocí rozšířeného sousedství (viz obrázek 5) se získá informace zda je v blízkosti buňky některý z deforestačních faktorů a jich váhy. Tato informace je uložena individuálně ke každému faktoru v proměnné `float near_xxxx`. Tyto hodnoty jsou následně vynásobeny vahou každého faktoru. Tato váha byla pro každý faktor vypočítána z procenta jejich podílu na deforestaci, s ohledem na jejich rozšíření na mapě, a počtu průměrně zabraných buněk, a tedy i rozsahu, jedné instance.

$$\begin{aligned}\text{mining_weight} &= \frac{0.4 \times 2.0}{3.0} \\ \text{roads_weight} &= \frac{1.5 \times 2.0}{3.0} \\ \text{water_weight} &= \frac{1.1 \times 2.0}{3.0} \\ \text{cities_weight} &= \frac{1.3 \times 2.0}{3.0}\end{aligned}$$

Z těchto získaných dat je následně vypočítán `float result`:

```
result = neighborhood - (mining_contribution + roads_contribution + water_contribution + cities_contribution)
```

Výpočet této proměnné má 2 verze - pro data po roce 2022 je v příkladu snížena váha všech deforestujících podílů. Je to pro modelování snížení odlesňování na základě zvýšení ochrany lesa brazilským prezidentem [10].

Využitím hodnoty `result`, simulovaného roku a hodnoty zadané buňky je vybráno pravidlo, dle kterého buňka změní svoji hodnotu, či si ponechá aktuální. Je důležité počítat s hodnotou zadané buňky, jelikož díky ní je naimplementovaná funkce projektu, která zabráňuje buňkám nerealistické změny. Buňka může měnit svoji hodnotu pouze o 1 stupeň. Podle simulovaného roku je také upravena sbírka pravidel, které mají poupravené hodnoty aby reflektovaly změnu ve snížení váhy vlivů odlesňování. Oba automaty jsou zobrazeny na obrázcích 6 a 7.

5.1 Mapování abstraktního modelu do simulačního

Každá z 5 map je uložena do své vlastní 100x100 `vector<std::vector<int>>` matice, které jsou pevně dané a definované v `all_matrix.cpp`. Matice pro prvky způsobující deforestaci (`matrixWater`, `matrixCities`, `matrixMines`, `matrixRoads`) jsou neměnné. Matice zalesnění `matrixForest` se s každým průchodem cyklu celulárního automatu přepisuje s daty pro daný rok.

6 Podstata simulačních experimentů a jejich průběh

Cílem našich experimentů bylo ověřit, zda je možné splnit slib brazilského prezidenta Luiz Inácio Lula da Silva, že do roku 2030 ukončí brazilské odlesňování [2].

Na základě experimentování jsme také upravovali některá pravidla CA, aby odpovídala očekávání a výsledkům zaznamenaných v průběhu let (2015 - 2021) [16]. Tyto chyby se vyskytovaly kvůli chybnému určení pravidel na změnu stavu buňky (např. buňky vymíraly či se regenerovaly moc rychle a výsledky neodpovídaly dosažitelným situacím).

6.1 Postup experimentování

Naším prvním krokem bylo navrhnout pomocí výpočtů a odhadů základní pravidla celulárního automatu. Ty jsme následně testovali a upravovali podle výsledků v několika prvních rocích a na základě podobných simulací, aby se co nejvíce shodovaly. Jako první jsme se zaměřili na buňky s nejvyššími hodnotami a jejich nárůsty, jelikož obnova lesů zabere delší dobu než jejich destrukce. Po úpravě nárůstu jsme se zaměřili na upravování pravidel některých úbytků.

6.2 Dokumentace jednotlivých experimentů

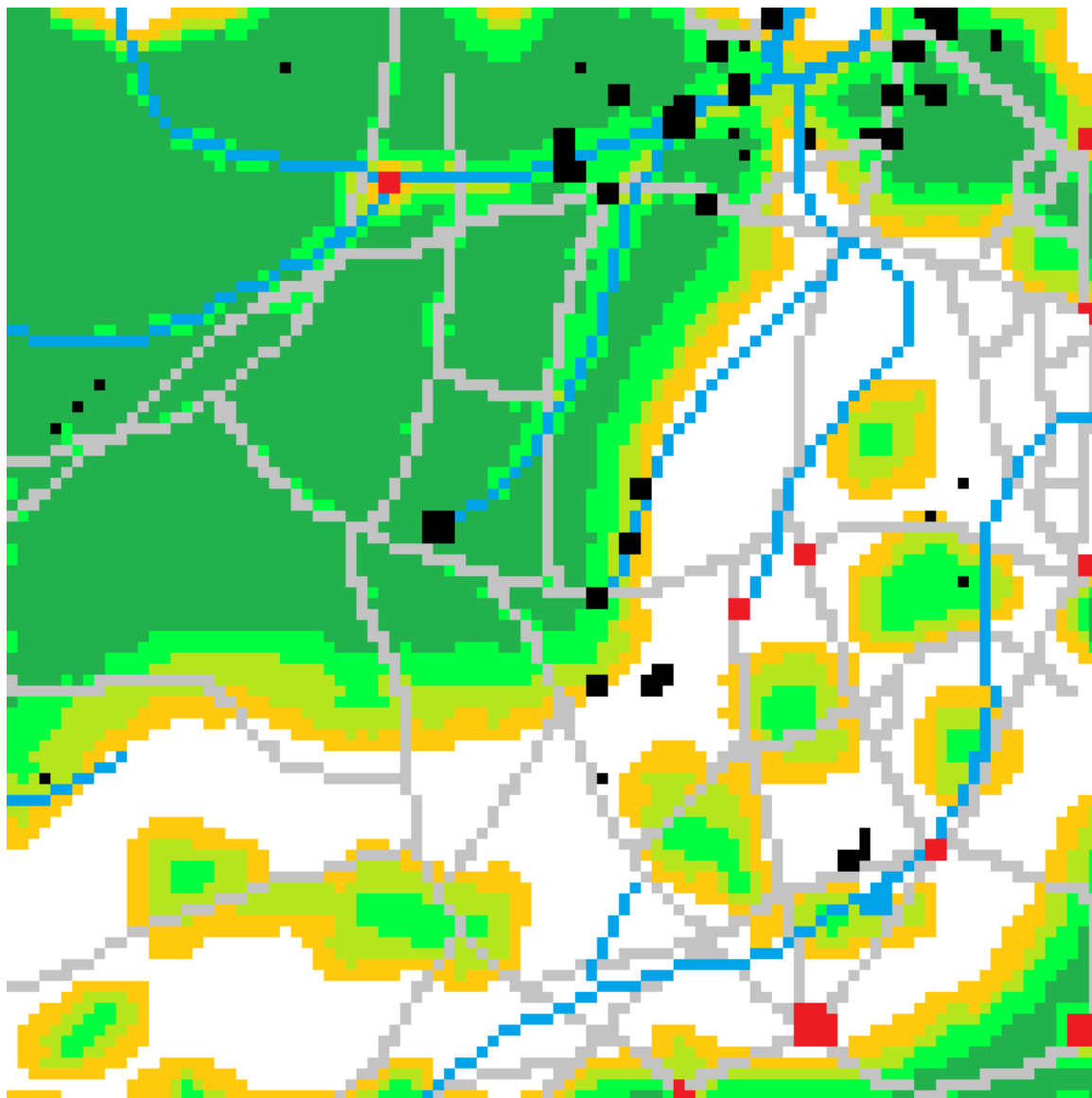
Náš experiment má pouze jeden výstup, jelikož začíná vždy s fixním vstupem (5 mapových matic). Matici zalesnění obměňuje na základě pravidel CA, které vychází z hodnot buněk všech mapových matic. V následující tabulce jsou vypsány získaná data pro roky 2015 - 2034:

Rok	Zalesněná plocha (km ²)	Ztráta oproti minulému roku (km ²)
2015	5030189.0	—
2016	5026152.5	4036.5
2017	5022115.5	4037.0
2018	5018247.0	3868.5
2019	5013201.0	5046.0
2020	5008659.5	4541.5
2021	5003277.0	5382.5
2022	4997558.5	5718.5
2023	4992176.0	5382.5
2024	4987466.5	4709.5
2025	4984439.0	3027.5
2026	4983261.5	1177.5
2027	4981747.5	1514.0
2028	4981243.0	504.5
2029	4980570.0	673.0
2030	4980234.0	336.0
2031	4980065.5	168.5
2032	4979561.0	504.5
2033	4979561.0	0.0
2034	4979561.0	0.0

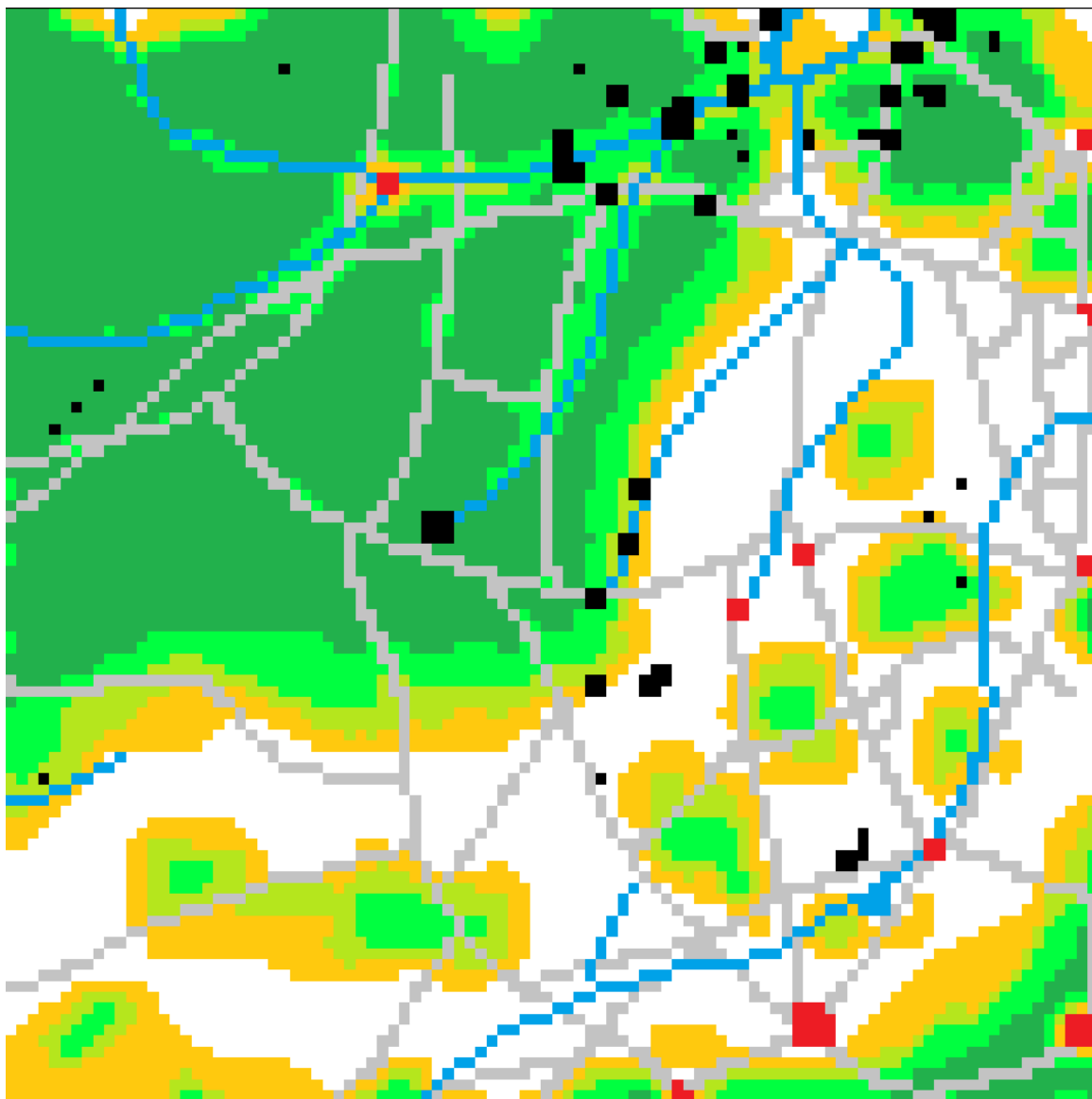
Tabulka 1: Výsledky experimentů pro roky 2015 - 2033

Z tabulky lze vyčíst, že po roku 2023 začíná deforestace ustupovat. Od roku 2028 si můžeme všimnout, že ztráty jsou jen v řádech stovek a po roce 2032 se již úroveň úbytku a nárůstu vyrovná natolik, že výsledná ztráta je nulová.

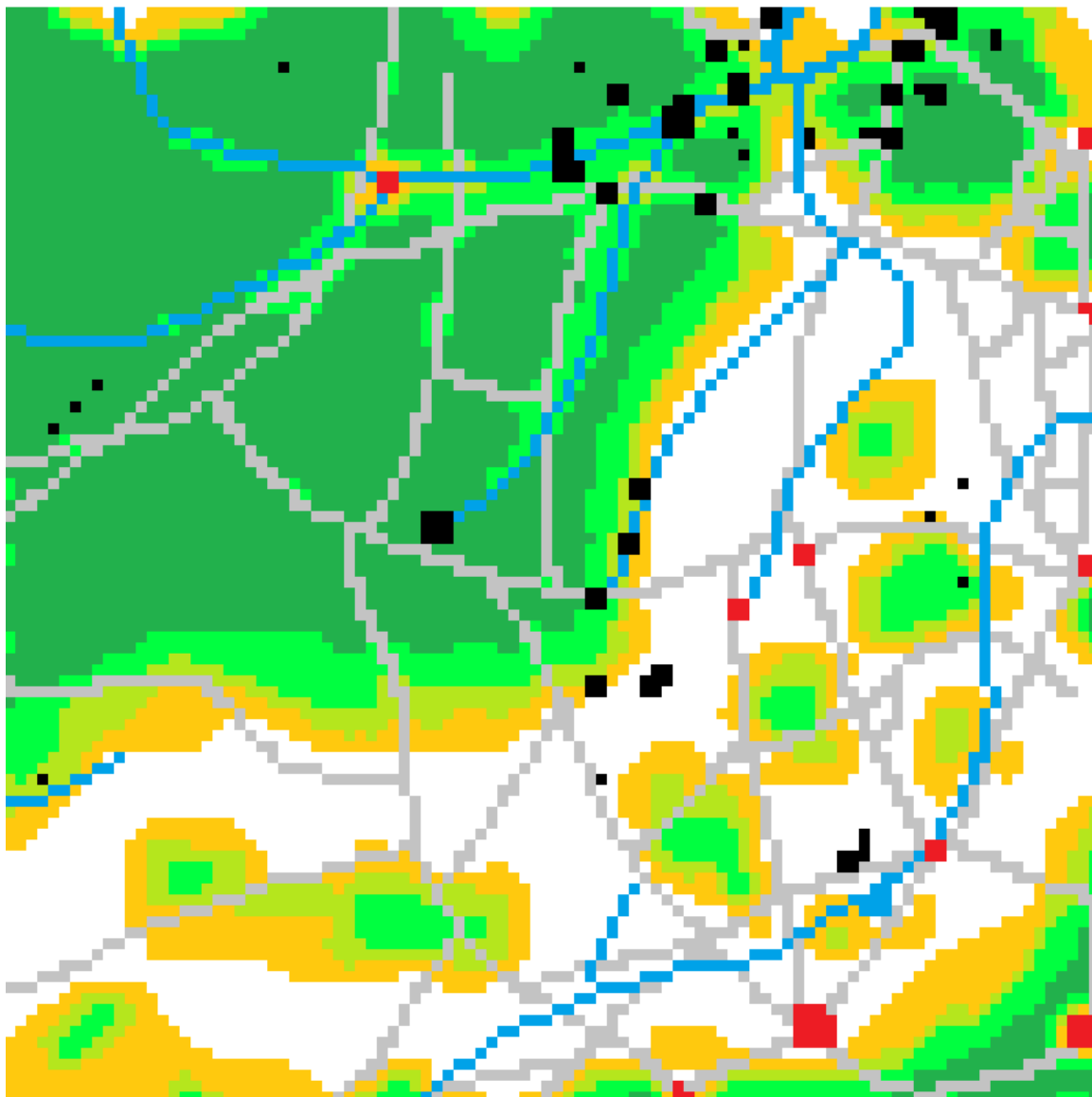
Vizualizace vybraných let:



Obrázek 10: Vizualizace výsledku experimentu z roku 2015



Obrázek 11: Vizualizace výsledku experimentu z roku 2024



Obrázek 12: Vizualizace výsledku experimentu z roku 2030

6.3 Závěry experimentů

V průběhu experimentování bylo odstraněno několik chyb v modelu celulárního automatu a to zejména v rychlosti úbytku buněk. Provedené experimenty odpovídají očekávanému chování dle zjištěných statistik o deforestaci Brazílie v průběhu let, čímž byla ověřena validita modelu.

7 Shrnutí simulačních experimentů a závěr

Z výsledků experimentů vyplývá, že slib prezidenta je dosažitelný za předpokladu dostatečných omezení lidské činnosti odpovídajících našemu modelu. Kolem roku 2030 by mohla deforestace Brazílie ustát a to při předpokladu, že bude pokračovat s aktuálními restrikcemi největších odlesňovacích faktorů ((nelegální) těžba dřeva, destruktivní chov dobytka a farmaření, přehnaná těžba). Validita modelu byla ověřena díky porovnávání dat se statistikami předešlých let, kterým naše simulace odpovídá.

Reference

- [1] BBC. Bbc. <https://www.bbc.com/>. Accessed: December 10, 2023.
- [2] BBC. Update on the situation in latin america. <https://www.bbc.com/news/world-latin-america-66129200>, 2023.
- [3] Dan Charles. Why clearing brazil's forests for farming can make it harder to grow crops. <https://www.npr.org/2021/07/13/1015373344/why-clearing-brazils-forests-for-farming-can-make-it-harder-to-grow-crops>, 2021. Accessed: December 10, 2023.
- [4] Madeleine Cuff. Cop27: Brazil's lula promises zero deforestation in the amazon by 2030. <https://www.newscientist.com/article/2347429-cop27-brazils-lula-promises-zero-deforestation-in-the-amazon-by-2030/>, 2022. Accessed: December 10, 2023.
- [5] Esri. Predict deforestation in the amazon rain forest, 2023. Accessed on December 10, 2023.
- [6] Phillip Fearnside. Deforestation of the brazilian amazon, 09 2017.
- [7] World Wildlife Fund. Deforestation and forest degradation. <https://www.worldwildlife.org/threats/deforestation-and-forest-degradation>. Accessed: December 10, 2023.
- [8] World Wildlife Fund. World wildlife fund. <https://wwf.panda.org/>. Accessed: December 10, 2023.
- [9] B. Mirbagheri M. Naghdizadegana, M. Behifara. Spatial deforestation modelilng using cellular automata (case study: Central zagros forests). *ISPRS Archives*, XL-1/W3:289–2013, 2013.
- [10] Fabiano Maisonnave. In lula's first six months, brazil amazon deforestation dropped 34 <https://apnews.com/article/brazil-amazon-deforestation-lula-climate-change-2fe225f71a8f484e8d365ea641acd65e>, 2023. Accessed: December 10, 2023.
- [11] Mongabay. Mongabay. <https://news.mongabay.com/>. Accessed: December 10, 2023.
- [12] Mongabay. Building roads for agricultural expansion in brazil aiding the spread of insects that harm crops. <https://news.mongabay.com/2016/04/building-roads-agricultural-expansion-brazil-aiding-spread-insects-harm-crops/>, 2016. Accessed: December 10, 2023.
- [13] Mongabay. Mining activity causing nearly 10 percent of amazon deforestation. <https://news.mongabay.com/2017/11/mining-activity-causing-nearly-10-percent-of-amazon-deforestation/>, 2017. Accessed: December 10, 2023.
- [14] Mongabay. 2021 amazon deforestation map shows devastating impact of ranching, agriculture. <https://news.mongabay.com/2022/03/2021-amazon-deforestation-map-shows-devastating-impact-of-ranching-agriculture/>, 2022. Accessed: December 10, 2023.

- [15] Mongabay. In brazil’s agricultural heartland, rivers run dry as monoculture advances. <https://news.mongabay.com/2022/12/in-brazils-agricultural-heartland-rivers-run-dry-as-monoculture-advances/>, 2022. Accessed: December 10, 2023.
- [16] Mongabay. Deforestation in the brazilian amazon falls 22% in 2023. <https://news.mongabay.com/2023/11/deforestation-in-the-brazilian-amazon-falls-22-in-2023/>, 2023. Accessed: December 10, 2023.
- [17] Isabel M. D. Rosa, Drew Purves, Carlos Souza, Jr, and Robert M. Ewers. Predictive modelling of contagious deforestation in the brazilian amazon. *PLOS ONE*, 8(10):1–14, 10 2013.
- [18] Britaldo Silveira Soares-Filho, Gustavo Coutinho Cerqueira, and Cássio Lopes Pennachin. dinamica—a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, 154(3):217–235, 2002.
- [19] Statista. Brazil: Amazon deforestation rate, 2022. Accessed on December 10, 2023.
- [20] Thales A.P. West and Philip M. Fearnside. Brazil’s conservation reform and the reduction of deforestation in amazonia. *Land Use Policy*, 100:105072, 2021.
- [21] World Wildlife Fund. Logging in the amazon. https://wwf.panda.org/discover/knowledge_hub/where_we_work/amazon/amazon_threats/other_threats/logging_amazon/. Accessed: December 10, 2023.