

ภูมิสารสนเทศอัจฉริยะเพื่อการฟื้นฟูระบบนิเวศเชิงกลยุทธ์: การจัดลำดับความสำคัญพื้นที่วิกฤตในอุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน (เตรียมการ)

ปิยะพงษ์ ศรีไชย^{1,2} สารภี จุลแก้ว³ และ นิตติ เอี่ยมชื่น^{2*}

Geospatial AI for Strategic Ecosystem Restoration: Prioritizing Critical Hotspots in Tham Luang–Khun Nam Nang Non National Park (under gazettement)

Piyapong Sornchai^{1,2} Sarapee Chunkaew³ and Niti Iamchuen^{2*}

¹ Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation, Bangkok, 10900

² Geographic Information Science, School of Information and Communication Technology, University of Phayao, Phayao, 56000

³ Computer Science Program, Faculty of Science and Technology, Songkhla Rajabhat University, Songkhla, 90000

* Corresponding author: niti.in@up.ac.th

Received: 18 October 2025; Revised: 20 January 2026; Accepted: 17 February 2026

บทคัดย่อ

อุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน (เตรียมการ) ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 12,000 ไร่ เป็นระบบนิเวศที่มีความเปราะบางและเผชิญความเสี่ยงสูงต่อการพังทลายของดินและการเสื่อมโทรมของป่าไม้ การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนารอบแนวคิดและแบบจำลองทางพื้นที่ (Spatial Model) สำหรับการจัดลำดับความสำคัญพื้นที่ฟื้นฟูระบบนิเวศอย่างเป็นระบบ โดยบูรณาการเทคนิคภูมิสารสนเทศบนแพลตฟอร์ม Google Earth Engine (GEE) ร่วมกับการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ข้อมูลหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วยภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ปี พ.ศ. 2567 และแบบจำลองความสูงเชิงเลข (DEM) เพื่อประเมินปัจจัยความเสี่ยงเชิงพื้นที่ 3 ปัจจัย ได้แก่ ความลาดชัน (Slope) ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (NDVI) และการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land Use) โดยเกณฑ์การให้คะแนนและค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยถูกกำหนดโดยฉันทามติของผู้เชี่ยวชาญ (Expert Consensus) การจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินใช้อัลกอริทึม Random Forest โดยแบ่งข้อมูลเพื่อตรวจสอบความถูกต้องแบบ Split-validation (70:30) ผลการทดสอบพบว่าแบบจำลองให้ค่าความแม่นยำโดยรวม (Overall Accuracy) ที่ 88.24% และค่าสัมประสิทธิ์แคปปา (Kappa Coefficient) ที่ 0.82 จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการประเมินแบบหลายหลักเกณฑ์ (Multi-Criteria Evaluation: MCE) โดยให้น้ำหนักความสำคัญสูงสุดแก่ปัจจัยความลาดชัน (50.00%) ผลการวิจัยชี้ว่า พื้นที่ที่ต้องได้รับการฟื้นฟูในระดับสูงและสูงสุด (Priority Level 3 และ 4) มีเนื้อที่รวม 5,340.94 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 44.48 ของพื้นที่อุทยานฯ โดยพื้นที่ส่วนใหญ่จัดอยู่ในระดับมีความต้องการฟื้นฟูสูง (Level 3) จำนวน 5,322.64 ไร่ ในขณะที่พื้นที่วิกฤตเร่งด่วนสูงสุด (Level 4) มีเนื้อที่ 18.30 ไร่ ซึ่งแม้จะมีปริมาณไม่มากแต่มีลักษณะรวมคือเป็นพื้นที่ลาดชันสูงมากและมีพืชพรรณปกคลุมเบาบาง แผนที่ลำดับความสำคัญที่ได้จากการวิจัยนี้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ที่สำคัญ สำหรับการจัดสรรทรัพยากรในโครงการฟื้นฟูระบบนิเวศให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

คำสำคัญ: ภูมิสารสนเทศ, การเรียนรู้ของเครื่อง, การประเมินความเสี่ยงเชิงพื้นที่, การฟื้นฟูระบบนิเวศ, ความลาดชัน, ถ้ำหลวง

¹ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช กรุงเทพฯ 10900

² สาขาวิชาภูมิสารสนเทศศาสตร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยพะเยา จังหวัดพะเยา 56000

³ สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา จังหวัดสงขลา 90000

Abstract

Tham Luang–Khun Nam Nang Non National Park (under gazettement) (proposed), covering approximately 12,000 rai, represents a fragile ecosystem facing high risks of soil erosion and forest degradation. This research aims to develop a systematic spatial model for prioritizing ecosystem restoration areas by integrating geospatial techniques on the Google Earth Engine (GEE) platform with machine learning. The primary data included Sentinel-2 satellite imagery from 2024 and a Digital Elevation Model (DEM) to assess three spatial risk factors: Slope, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and Land Use. Scoring criteria and importance weights were determined through expert consensus. Land use classification utilizing the Random Forest algorithm, validated through a 70:30 split-validation method, achieved an Overall Accuracy of 88.24% and a Kappa Coefficient of 0.82. Through Multi-Criteria Evaluation (MCE), assigning the highest weight to slope (50.00%), results indicate that areas requiring high to highest restoration priority (Levels 3 and 4) comprise a total of 5,340.94 rai (44.48%) of the park. The majority of these areas fall under the high priority category (Level 3), covering 5,322.64 rai. Notably, the highest urgency areas (Level 4), covering 18.30 rai, are characterized by extremely steep slopes and sparse vegetation. The resulting prioritization map serves as a critical strategic decision-support tool for optimizing resource allocation in ecosystem restoration projects.

Keywords: Geoinformatics, Machine learning, Spatial risk assessment, Ecosystem restoration, Slope, Tham Luang

Introduction

การเสื่อมโทรมของระบบนิเวศป่าไม้เป็นวิกฤตการณ์ด้านสิ่งแวดล้อมที่สำคัญระดับโลก ส่งผลกระทบต่อความหลากหลายทางชีวภาพ วัฏจักรของน้ำ และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations, n.d.) ในบริบทของประเทศไทย พื้นที่ป่าไม้จำนวนมาก โดยเฉพาะในเขตภูเขาสูงทางภาคเหนือ กำลังเผชิญกับความท้าทายจากการพังทลายของดินและการลดลงของความสมบูรณ์ของป่า อุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน (เตรียมการ) จังหวัดเชียงราย มีลักษณะธรณีสัณฐานแบบหินปูน (Karst Topography) ที่โดดเด่น เป็นหนึ่งในพื้นที่ที่มีความเปราะบางทางนิเวศวิทยาสูง นำไปสู่ปัญหาการเสื่อมโทรมของป่าไม้และการพังทลายของดินอย่างรุนแรง (กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2565)

การวางแผนฟื้นฟูระบบนิเวศในพื้นที่ขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนเช่นนี้ หากอาศัยวิธีการดั้งเดิมอาจนำไปสู่การใช้ทรัพยากรที่ไม่มีประสิทธิภาพ (Chuvieco & Huete, 2020) เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (Geoinformatics) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวิเคราะห์ข้อมูลระยะไกล (Remote Sensing) และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ได้กลายเป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพสูงในการประเมินและติดตามทรัพยากรธรรมชาติอย่างเป็นระบบ (Gorelick et al., 2017) การประยุกต์ใช้เทคนิคการประเมินแบบหลายหลักเกณฑ์ (Multi-Criteria Evaluation: MCE) ช่วยให้ผู้มีส่วนได้ส่วนเสียสามารถบูรณาการปัจจัยทางกายภาพและชีวภาพที่หลากหลายเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจที่ซับซ้อนได้ (Malczewski, 2006) นอกจากนี้ การมาถึงของแพลตฟอร์มการประมวลผลบนคลาวด์ เช่น Google Earth Engine (GEE) และอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) อย่าง Random Forest ได้ปฏิวัติการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ขนาดใหญ่ ทำให้สามารถจำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินได้อย่างรวดเร็วและมีความแม่นยำสูง (Belgiu & Drăgut, 2016)

ในฐานะหัวหน้าโครงการปลูกป่าฟื้นฟู การจัดทำแผนปฏิบัติการจำเป็นต้องมีข้อมูลเชิงพื้นที่ที่แม่นยำเพื่อจัดลำดับความสำคัญของพื้นที่เป้าหมายอย่างมีประสิทธิภาพ การวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนารอบการประเมินเชิงพื้นที่เพื่อจัดลำดับความสำคัญของพื้นที่ที่ต้องการการฟื้นฟูอย่างเร่งด่วนในอุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน (เตรียมการ) โดยการบูรณาการปัจจัยความเสี่ยงที่สำคัญ 3 ประการ ได้แก่ ความลาดชัน (Slope) ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (NDVI) และการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land Use) ผ่านกระบวนการ MCE บนแพลตฟอร์ม GEE ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์สำหรับผู้บริหารในการกำหนดพื้นที่วิกฤต (Critical Hotspots) และจัดสรรทรัพยากรเพื่อการฟื้นฟูได้อย่างตรงจุดและมีประสิทธิภาพสูงสุด

Objectives

เพื่อพัฒนารอบแนวคิดและแบบจำลองทางพื้นที่ (Spatial Model) สำหรับการจัดลำดับความสำคัญพื้นที่ฟื้นฟูระบบนิเวศ โดยบูรณาการเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล (Remote Sensing) และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) บนแพลตฟอร์ม Google Earth Engine (GEE) ร่วมกับเทคนิคการประเมินแบบหลายหลักเกณฑ์ (MCE) ในพื้นที่อุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน (เตรียมการ)

Methodology

การวิจัยนี้ดำเนินการบนแพลตฟอร์ม Google Earth Engine เป็นระบบคลาวด์สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลภูมิสารสนเทศขนาดใหญ่ โดยมีรายละเอียดดังนี้:

Tools and Data

Table 1 Tools and Software

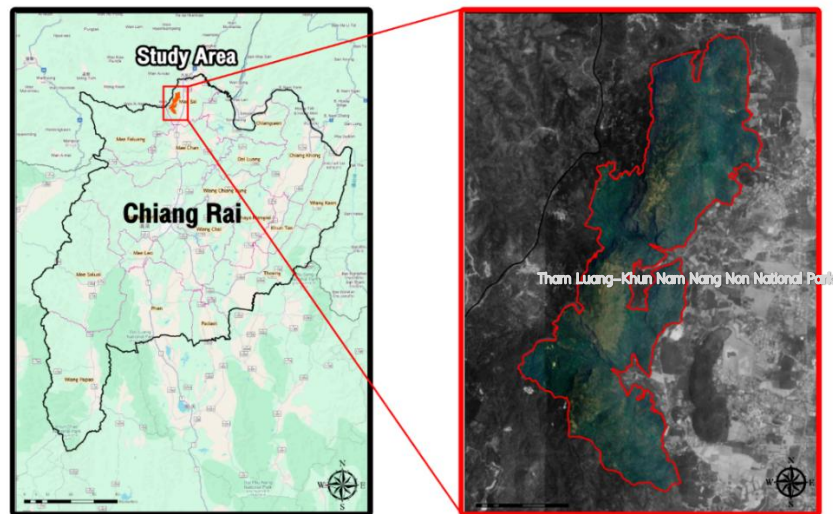
Category	Item	Details	Application
GIS Software	QGIS	Version 3.28	Used for spatial data management, DEM processing (Slope Analysis), reclassification, and Multi-Criteria Evaluation (Weighted Overlay).
Remote Sensing Software	Google Earth Engine (GEE)	Cloud-based platform	Used for processing Sentinel-2 satellite imagery, calculating NDVI, and performing machine learning classification.
Hardware	High-performance PC	RAM ≥16 GB	Required for efficient processing of large datasets.

Table 2 Data Used in the Research

Data Type	Data Source	Spatial Resolution	Data Year	Application
Satellite Imagery	Sentinel-2A (Level-2A)	10 meters (Bands 2, 3, 4, 8)	2024	Used for NDVI calculation and land use classification.
Digital Elevation Model (DEM)	NASA/NASADEM HGT	30 meters	Most recent version	Used for calculating slope and defining the study area boundary.
Boundary Data	Dept. of National Parks, Wildlife and Plant Conservation	Vector Data	2024	Used to define the analysis extent (Masking).
Training Data	Created by experts	360 points	2024	Used to train the Random Forest classification model.

Study Area

การวิจัยนี้ดำเนินการในพื้นที่อุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน (เตรียมการ) จังหวัดเชียงราย ประเทศไทย มีพื้นที่ตามประกาศรวมประมาณ 12,000 ไร่ (19.2 ตารางกิโลเมตร) (Figure 1)



Source: Sentinel-2 imagery processed in GEE (2024)

Figure 1 The study area in the Tham Luang–Khun Nam Nang Non National Park Area, with an inset map showing its location in Chiang Rai Province. The magnified view details the specific polygons for the study area. Background imagery source: Google Earth, March 2025.

Data Analysis Framework

การเตรียมข้อมูลปัจจัยและการให้คะแนน (Factor Preparation and Scoring)

กระบวนการวิจัยประกอบด้วย 5 ขั้นตอนหลัก (Figure 2) โดยมีขั้นตอนการเตรียมข้อมูลปัจจัยดังนี้:

การกำหนดปัจจัยวิเคราะห์ (Factor Selection)

ในการประเมินความเสี่ยงการเสื่อมโทรมของระบบนิเวศและการจัดลำดับความสำคัญพื้นที่พื้นที่นั้น มีปัจจัยเชิงพื้นที่หลายประการที่สามารถนำมาพิจารณาได้ เช่น ความลาดชัน, NDVI, การใช้ประโยชน์ที่ดิน, ความเสี่ยงไฟฟ้า และระยะห่างจากแหล่งน้ำ (Vrieling et al., 2011) อย่างไรก็ตาม การวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพแบบ "Parsimonious Model" โดยคัดเลือก 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่:

- **ความลาดชัน (Slope):** เป็นปัจจัยทางกายภาพที่สำคัญที่สุดในการควบคุมอัตราการไหลบ่าของน้ำผิวดินและการพังทลายของดินในพื้นที่ภูเขา (Sudana et al., 2020)
- **ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (NDVI):** เป็นตัวชี้วัดทางชีวภาพที่สะท้อนความหนาแน่นและสุขภาพของพืชพรรณ ทำหน้าที่ปกป้องหน้าดินโดยตรง (Rouse et al., 1974)
- **การใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land Use):** สะท้อนถึงผลกระทบจากการรบกวนของมนุษย์ เป็นสาเหตุหลักที่เร่งให้เกิดการเสื่อมโทรม (Belgiu & Drăgut, 2016)

เหตุผลที่คัดเลือกเฉพาะ 3 ปัจจัยนี้ เนื่องจากเป็นตัวขับเคลื่อนหลัก (Key Drivers) ของการพังทลายของดินในพื้นที่ภูเขาสูงชัน และเพื่อลดปัญหาความซ้ำซ้อนของข้อมูล (Multicollinearity) เช่น ปัจจัยความเสี่ยงไฟป่ามีความสัมพันธ์สูงกับค่า NDVI และ Land Use อยู่แล้ว การใช้ตัวแปรที่น้อยแต่จะช่วยให้การประมวลผลรวดเร็วและเหมาะสมกับการตัดสินใจเบื้องต้น

แม้ว่าปัจจัยแวดล้อมอื่น ๆ เช่น ระยะห่างจากแหล่งน้ำ หรือความเสี่ยงไฟฟ้า จะมีผลต่อระบบนิเวศ แต่การศึกษานี้เจาะจงคัดเลือก 3 ปัจจัยหลัก (Slope, NDVI, Land Use) เนื่องจาก:

ความเป็นตัวแทนหลัก (Primary Drivers): งานวิจัยในพื้นที่ภูเขาสูง (Mountainous terrain) ชี้ให้เห็นว่า 'ความลาดชัน' เป็นปัจจัยวิกฤตที่สุดต่อการพังทลายของดิน (Reference...) ในขณะที่ NDVI และ Land Use สะท้อนสถานะพืชพรรณปัจจุบันได้ครอบคลุมผลกระทบจากไฟป่าและการรบกวนของมนุษย์ทางอ้อมแล้ว

ลดความซ้ำซ้อน (Reducing Collinearity): การเพิ่มปัจจัยที่สัมพันธ์กันสูง (เช่น NDVI กับ Fire Risk มักสัมพันธ์กัน) อาจทำให้การให้ค่าน้ำหนักใน MCE เบี่ยงเบนไป (Bias) ดังนั้น การใช้โมเดลที่มีปัจจัยน้อยแต่เป็นปัจจัยวิกฤต (Parsimonious Model) จึงเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ที่เน้นความรวดเร็วและการตัดสินใจเบื้องต้น

การจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินและการตรวจสอบความถูกต้อง (Classification and Validation)

การจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินใช้อัลกอริทึม Random Forest (RF) โดยใช้ข้อมูลจุดตัวอย่างภาคสนาม (Ground Control Points) จำนวน 360 จุด ซึ่งคำนวณขนาดกลุ่มตัวอย่างตามสูตรของ Cochran (1977) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เพื่อประเมินความถูกต้องของแบบจำลองอย่างแม่นยำ การวิจัยนี้ใช้วิธี Split-validation โดยแบ่งข้อมูลจุดตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ (1) ข้อมูลสำหรับสอนแบบจำลอง (Training Set) จำนวน 70% (ประมาณ 252 จุด) และ (2) ข้อมูลสำหรับทดสอบความถูกต้อง (Testing Set) จำนวน 30% (ประมาณ 108 จุด) โดยใช้ฟังก์ชัน confusionMatrix() ใน GEE คำนวณค่า Overall Accuracy และ Kappa Coefficient จากข้อมูลชุดทดสอบเท่านั้น เพื่อลดปัญหาการเรียนรู้เกิน (Overfitting) ได้มาจากการคำนวณขนาดกลุ่มตัวอย่างตามหลักสถิติ โดยใช้สูตรของ Cochran (1977) สำหรับประชากรที่ไม่ทราบจำนวนที่แน่นอน:

$$n = \frac{Z^2 pq}{E^2}$$

โดยที่:

- n = ขนาดกลุ่มตัวอย่าง
- Z = ค่า Z-score ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (เท่ากับ 1.96)
- p = สัดส่วนความแปรปรวนสูงสุด (กำหนดที่ 0.5 เพื่อให้ได้ n ที่มากที่สุด)
- q = $1 - p$ (เท่ากับ 0.5)
- E = ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (กำหนดที่ 5% หรือ 0.05)

การคำนวณให้ค่า $n \approx 384$ จุด อย่างไรก็ตาม เพื่อให้สอดคล้องกับการกระจายตัวของพื้นที่และการเข้าถึงได้จริง จึงกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่างที่ 360 จุด ยังคงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ทางสถิติ จากนั้นจึงดำเนินการสุ่มตัวอย่างแบบแบ่งชั้น (Stratified Random Sampling) โดยอ้างอิงจากการแปลตีความภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดสูงบน Google Earth เพื่อให้มั่นใจว่าได้ข้อมูลตัวอย่างครบถ้วนทั้ง 3 ประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน (ป่าสมบูรณ์, ป่าเสื่อมโทรม, พื้นที่โล่ง)

เกณฑ์การให้คะแนนและค่าน้ำหนัก (Scoring and Weighting)

ปัจจัยทั้ง 3 ถูกแปลงเป็นคะแนนความเสี่ยง (Risk Score) ตั้งแต่ 1 (ต่ำสุด) ถึง 5 (สูงสุด) ตามเกณฑ์มาตรฐานสากลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Table 3) สำหรับการกำหนดค่าน้ำหนัก (Weighting) ในขั้นตอน MCE ใช้วิธีฉันทามติจากผู้เชี่ยวชาญ (Expert Consensus) โดยรวบรวมความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน (นักวิชาการป่าไม้และผู้เชี่ยวชาญด้านภูมิสารสนเทศ) ผ่านการสัมภาษณ์เจาะลึก โดยให้ผู้เชี่ยวชาญจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยตามบริบทของพื้นที่ภูเขาหินปูน จากนั้นนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic Mean) เพื่อให้ได้ค่าน้ำหนักที่เป็นกลางและลดความลำเอียง (Table 4) ดังนี้:

- **คะแนนความลาดชัน (SSlope):** เกณฑ์การแบ่งชั้นอ้างอิงตามแนวทางสากล เช่น Food and Agriculture Organization (FAO, 2006) ที่จำแนกพื้นที่ที่มีความลาดชันสูงกว่า 30–35% ว่าเป็นพื้นที่ "สูงชันมาก" (Very Steep) ซึ่งมีศักยภาพในการถูกชะล้างพังทลายสูงที่สุด
- **คะแนนดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (SNDVI):** เกณฑ์การแบ่งชั้นอ้างอิงตามหลักการแปลความหมายค่า NDVI (Rouse et al., 1974) โดยทั่วไปค่า NDVI ที่ต่ำกว่า 0.2 แสดงถึงพื้นที่ว่างเปล่าหรือดิน ในขณะที่ค่าสูง (เช่น >0.8) แสดงถึงป่าไม้ที่หนาแน่นและสมบูรณ์
- **คะแนนการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Landuse Classification):** การให้คะแนน (1, 3, 5) ถูกกำหนดขึ้นตามหลักการทางนิเวศวิทยา โดยพื้นที่ป่าสมบูรณ์ (Intact Forest) มีความเสี่ยงต่ำสุด (คะแนน 1) และพื้นที่โล่ง/ไร้ร้าง (Bare Land) มีความเสี่ยงสูงสุด (คะแนน 5) สอดคล้องกับการจำแนกด้วย RF

การวิเคราะห์แบบหลายหลักเกณฑ์ (MCE)

นำชั้นข้อมูลคะแนนของทั้งสามปัจจัยมาซ้อนทับเชิงพื้นที่แบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted Overlay) เพื่อคำนวณดัชนีความเร่งด่วนในการฟื้นฟู (Restoration Priority Index: R) การกำหนดค่าน้ำหนัก (Weighting) ใช้วิธี Expert Consensus โดยรวบรวมความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน ประกอบด้วยนักวิชาการป่าไม้ 3 ท่าน และผู้เชี่ยวชาญด้านภูมิสารสนเทศ 2 ท่าน ผ่านการสัมภาษณ์เจาะลึก (In-depth Interview) โดยให้ผู้เชี่ยวชาญจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยตามบริบทของพื้นที่ภูเขาหินปูน จากนั้นนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic Mean) เพื่อให้ได้ค่าน้ำหนักที่เป็นกลางและลดความลำเอียงส่วนบุคคล (Table 4)

Table 3 Risk Scoring and Classification Criteria (Xi)

Factor (Xi)	Criteria/Value Range	Risk Level	Score (Si)
Slope (°)	>35	Very High	5
	25–35	High	4
	15–24.9	Moderate	3
	5–14.9	Low	2
	<5	Very Low	1
NDVI	<0.2	Very High	5
	0.2–0.4	High	4
	0.4–0.6	Moderate	3
	0.6–0.8	Low	2
	>0.8	Very Low	1
Land Use	Bare Land / Abandoned Farmland	Very High	5
	Degraded / Sparse Forest	Moderate	3
	Intact Forest	Very Low	1

Table 4 Factor Weights for MCE Analysis

Risk Factor	Weight (Wi)	Rationale for Weight Assignment
Slope (S_{slope})	50.00%	A primary physical factor controlling soil erosion and of highest importance for restoring mountainous areas.
NDVI (S_{NDVI})	31.25%	A direct indicator of vegetation density and health, which serves to protect the topsoil.
Land Use (Landuse Classification)	18.75%	Reflects the impact of human disturbances, a primary cause of degradation.
Total	100.00%	

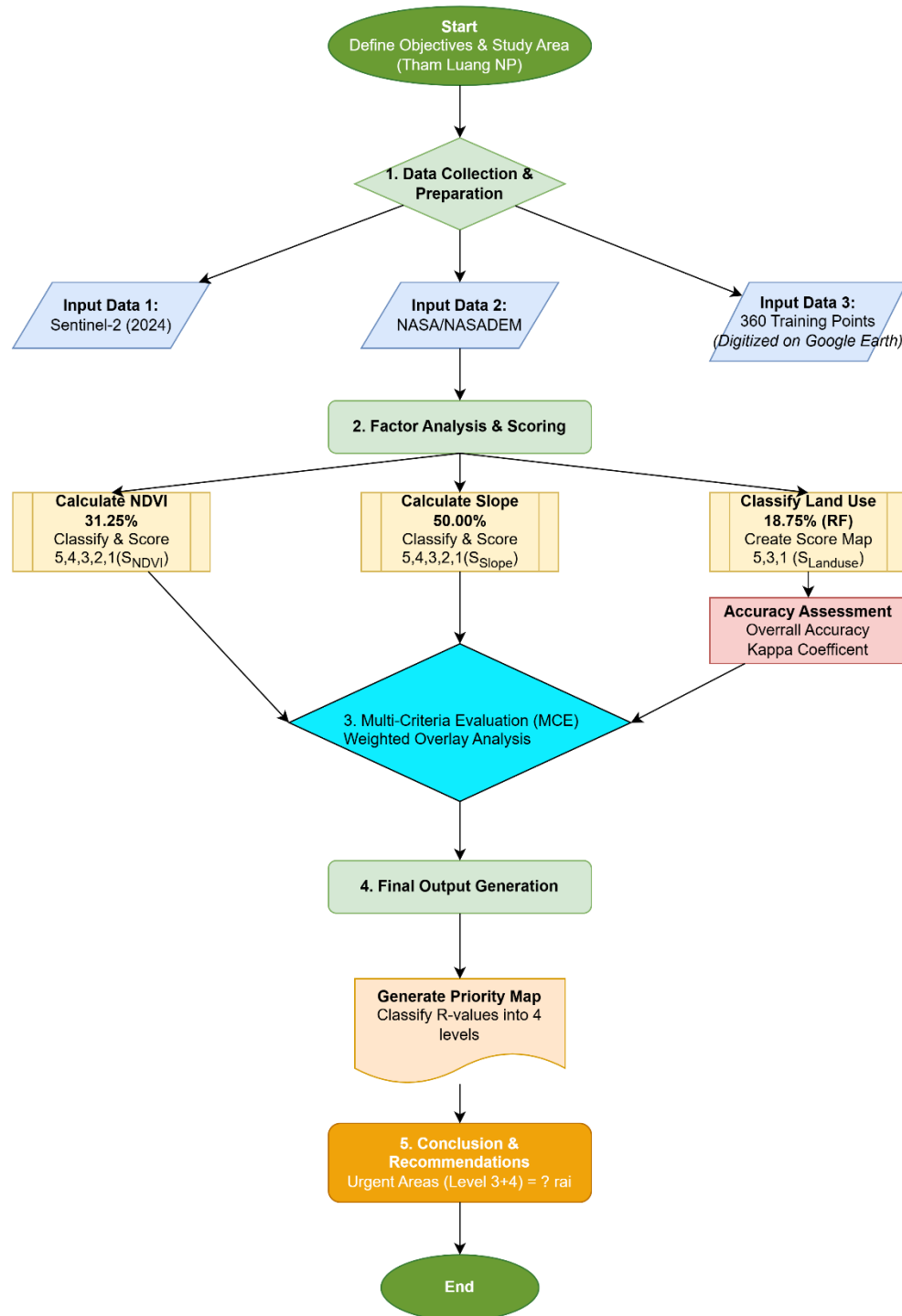


Figure 2 The analytical framework flowchart, illustrating the main data processing workflow. The process begins with the collection of satellite (Sentinel-2) and Digital Elevation Model (DEM) data, followed by the analysis of three spatial factors (Slope, NDVI, and Land Use). Finally, these factors are integrated using Multi-Criteria Evaluation (MCE) to produce the ecosystem restoration prioritization map.

Results

ผลการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน การวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง Random Forest (RF) ในการจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อสร้างชั้นข้อมูลคะแนนความเสี่ยง (Landuse Classification) โดยใช้ข้อมูลจุดตัวอย่างจำนวน 360 จุด แบ่งเป็นชุดข้อมูลสำหรับสอนแบบจำลอง (Training Set) จำนวน 70% (238 จุด) และชุดข้อมูลสำหรับทดสอบ (Testing Set) จำนวน 30% (119 จุด)

ผลการตรวจสอบความถูกต้องกับข้อมูลชุดทดสอบพบว่า แบบจำลองมีประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ดี โดยมีค่าความแม่นยำโดยรวม (Overall Accuracy) เท่ากับ 88.24% และค่าสัมประสิทธิ์แคปปา (Kappa Coefficient) เท่ากับ 0.82 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือในการจำแนกประเภทความเสี่ยง รายละเอียดความถูกต้องจำแนกตามประเภท (Confusion Matrix) (Table 5)

Table 5 Confusion Matrix (Testing Set: 119 points)

Actual Class \ Predicted	Low Risk (1)	Medium Risk (3)	High Risk (5)	Total (Actual)
Low Risk (1)	33	3	4	40
Medium Risk (3)	4	36	1	41
High Risk (5)	1	1	36	38
Total (Predicted)	38	40	41	119

Note: Please insert the summarized matrix based on your GEE result image: Accuracy 88.24%, Kappa 0.82

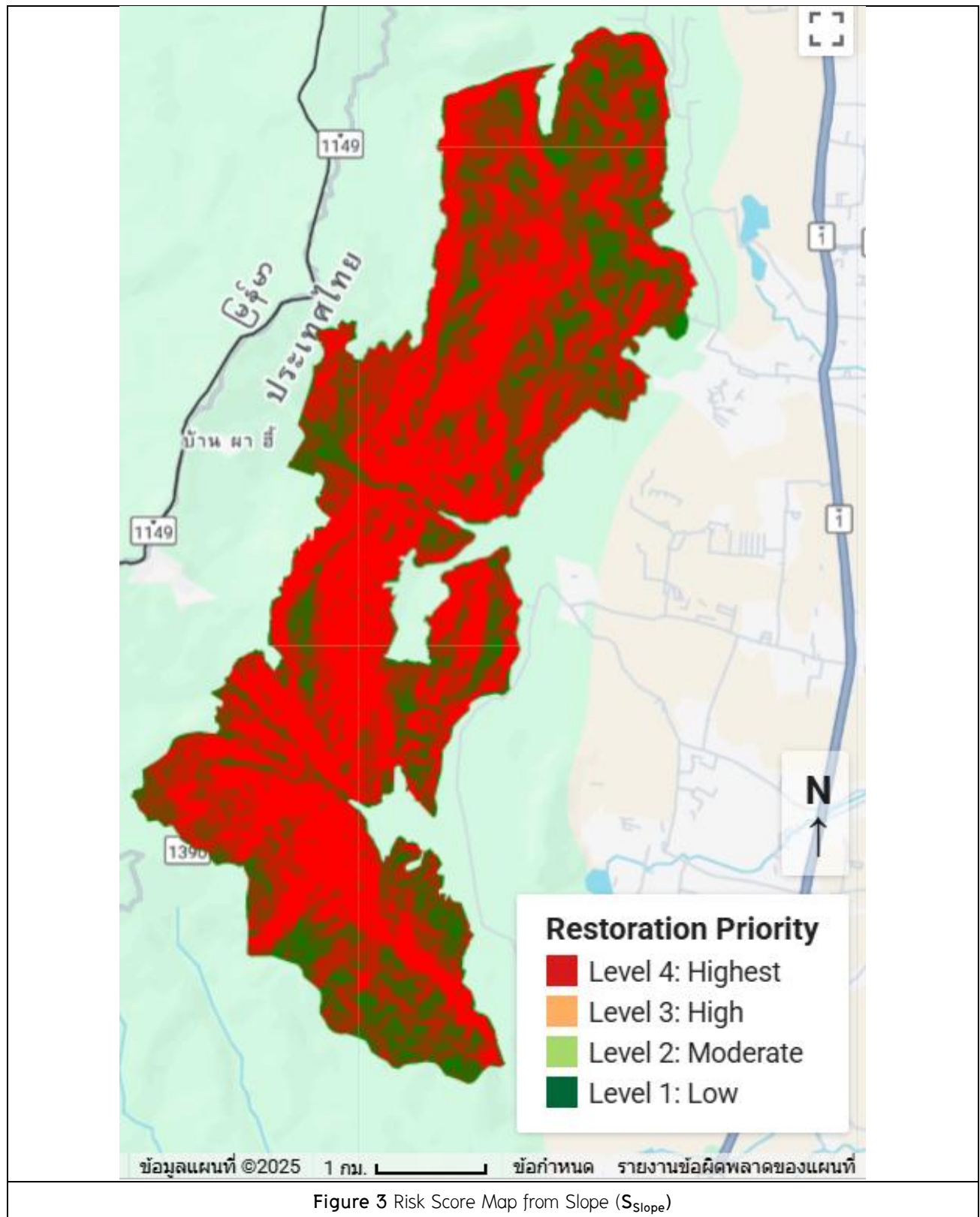
(Table 5) พบว่าแบบจำลองสามารถจำแนกพื้นที่ความเสี่ยงสูง (High Risk) ได้ถูกต้องจำนวน 36 จุด จาก 38 จุด และจำแนกพื้นที่ความเสี่ยงปานกลาง (Medium Risk) ได้ถูกต้อง 36 จุด จาก 41 จุด ในขณะที่พื้นที่ความเสี่ยงต่ำ (Low Risk) มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยโดยถูกจำแนกผิดไปเป็นความเสี่ยงสูง 4 จุด อาจเกิดจากความคล้ายคลึงกันของการสะท้อนแสงในบางพื้นที่ อย่างไรก็ตาม ค่าความแม่นยำรวมที่ 88.24% ถือว่าเพียงพอสำหรับการนำไปวิเคราะห์ในระดับภูมิทัศน์

ผลการจัดลำดับความสำคัญพื้นที่ฟื้นฟู เมื่อนำชั้นข้อมูลคะแนนของปัจจัยทั้งสาม (Slope, NDVI, Land Use) มารวมกันผ่านกระบวนการ MCE และแบ่งระดับความสำคัญตามเกณฑ์ที่กำหนด ผลการวิเคราะห์พบว่า พื้นที่ที่ต้องการการฟื้นฟูในระดับ "สูง" (Level 3) และ "สูงสุด" (Level 4) มีเนื้อที่รวมกัน 5,340.94 ไร่ คิดเป็น 44.48% ของพื้นที่อุทยานฯ ทั้งหมด โดยกลุ่มพื้นที่ที่มีความเร่งด่วนสูงสุด (Level 4: Highest Priority) มีเนื้อที่ 18.30 ไร่ (0.15%) ซึ่งเป็นจุดวิกฤต (Critical Hotspots) ที่กระจายตัวอยู่ในบริเวณที่มีความลาดชันสูงชันมากและขาดแคลนพืชพรรณปกคลุม จึงจำเป็นต้องได้รับการจัดการดูแลเป็นพิเศษเพื่อป้องกันการพังทลายของดิน สำหรับพื้นที่ที่มีความจำเป็นในการฟื้นฟูระดับ "สูง" (Level 3: High Priority) เป็นกลุ่มพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่ที่สุด ครอบคลุมเนื้อที่ 5,322.64 ไร่ (44.33%) ควรเป็นเป้าหมายหลักในแผนปฏิบัติการปลูกป่าฟื้นฟูระยะแรก ในขณะที่พื้นที่ระดับ "ปานกลาง" (Level 2) มีเนื้อที่ 4,945.97 ไร่ (41.19%) และพื้นที่ "ต่ำ" (Level 1) ซึ่งเป็นป่าสมบูรณ์ มีเนื้อที่ 1,474.27 ไร่ (12.28%) (Table 6)

Table 6 Restoration Prioritization Results for Tham Luang–Khun Nam Nang Non National Park (under gazetting)

Priority Level	Range of R value	Area (Rai)	Proportion (%)	Key Recommended Actions
 Level 4 (Highest Priority)	$4.0 < R \leq 5.0$	18.30	0.15%	Immediate Action: Reforestation and urgent soil and water conservation measures.
 Level 3 (High Priority)	$3.0 < R \leq 4.0$	5,322.64	44.33%	Phase 1–2 Action: Reforestation focusing on pioneer species.
 Level 2 (Moderate Priority)	$2.0 < R \leq 3.0$	4,945.97	41.19%	Long-term Action: Promote natural regeneration and maintenance.
 Level 1 (Low Priority)	$1.0 \leq R \leq 2.0$	1,474.27	12.28%	No Action Required: Area is intact forest; focus on protection.
<i>Unclassified*</i>	(Cloud/Shadow)	245.90	2.05%	–
Total		12,007.08	100.00%	

Note: Unclassified areas represent pixels masked out due to clouds or shadows during the analysis period (Jan–Dec 2024).



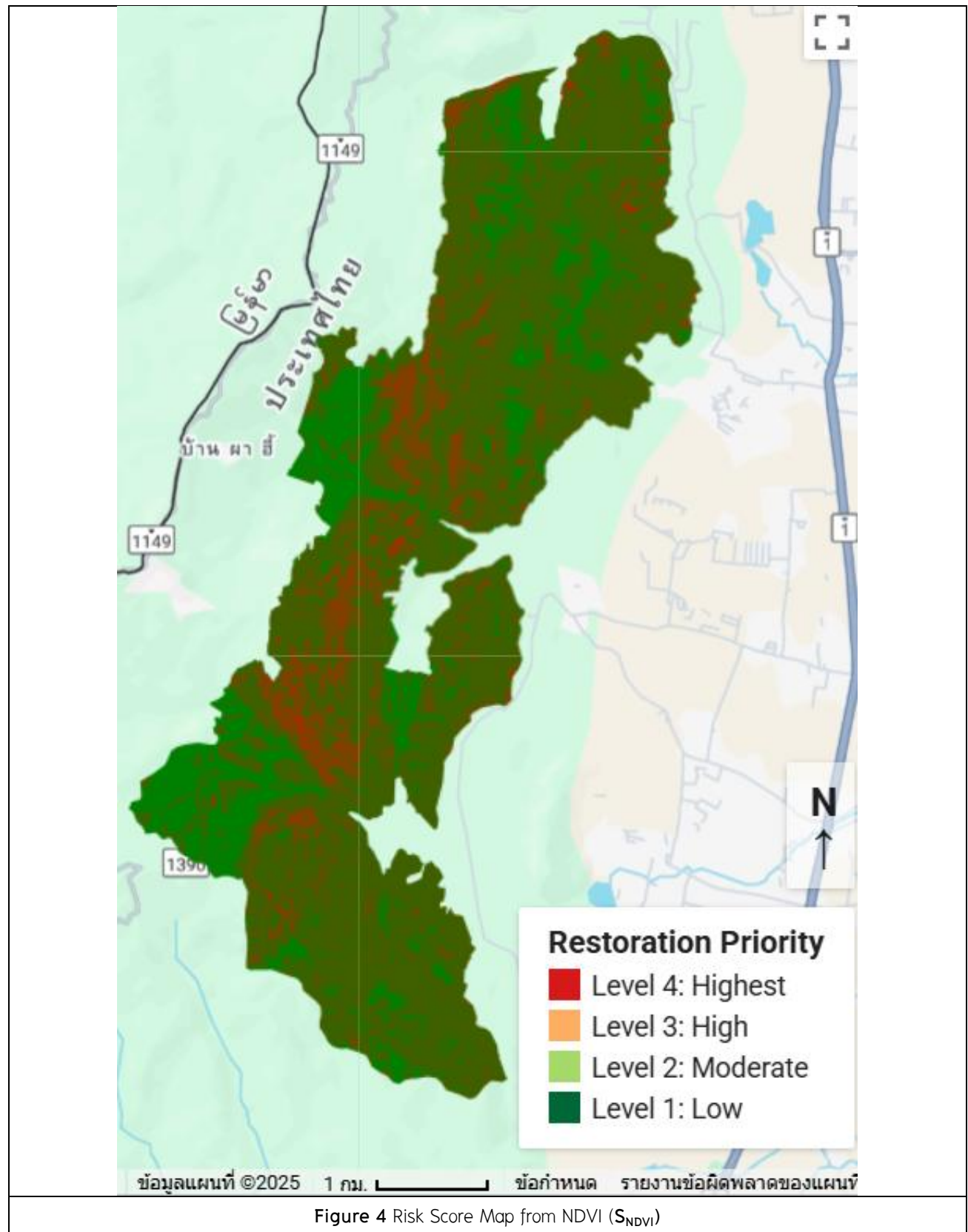
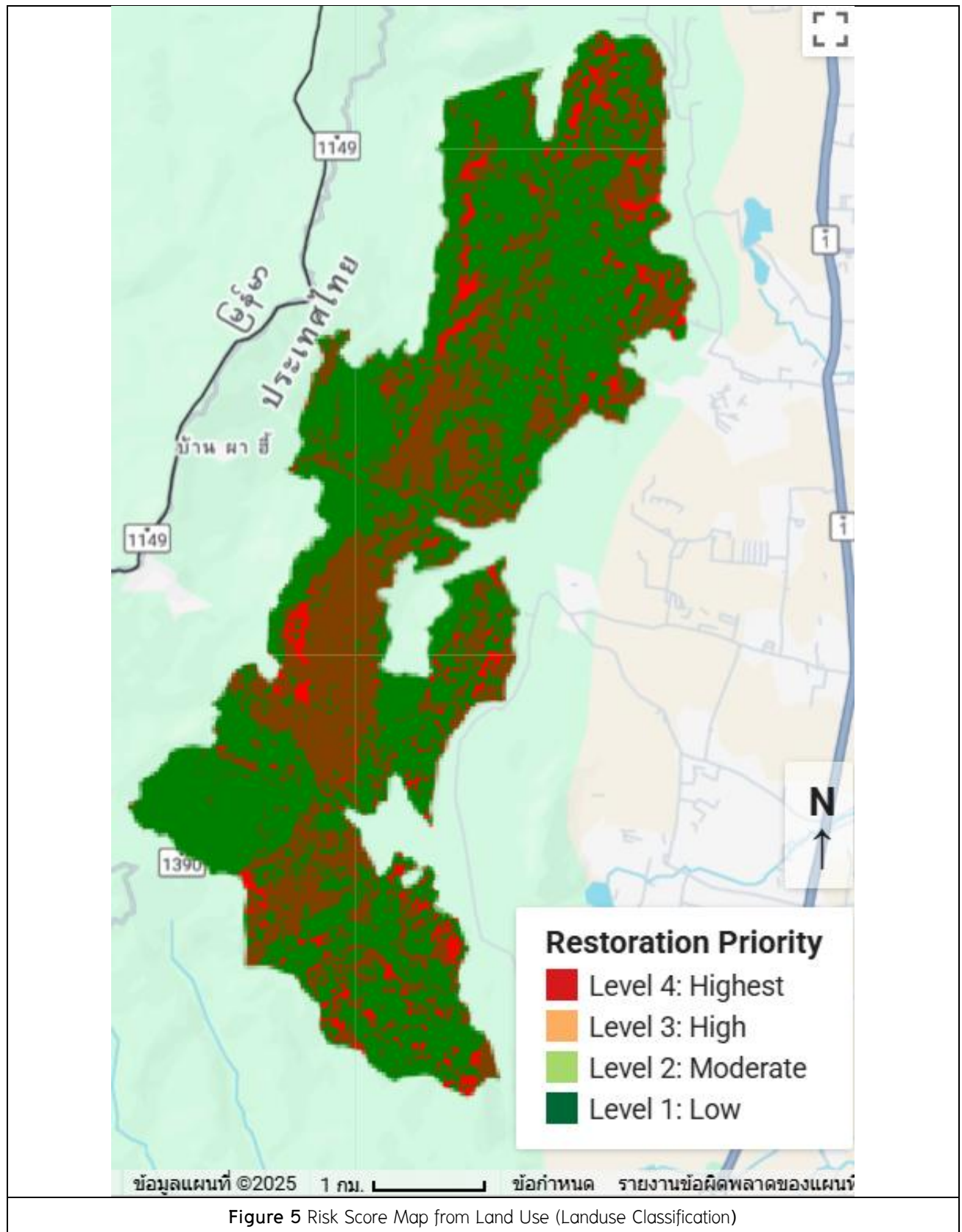


Figure 4 Risk Score Map from NDVI (S_{NDVI})



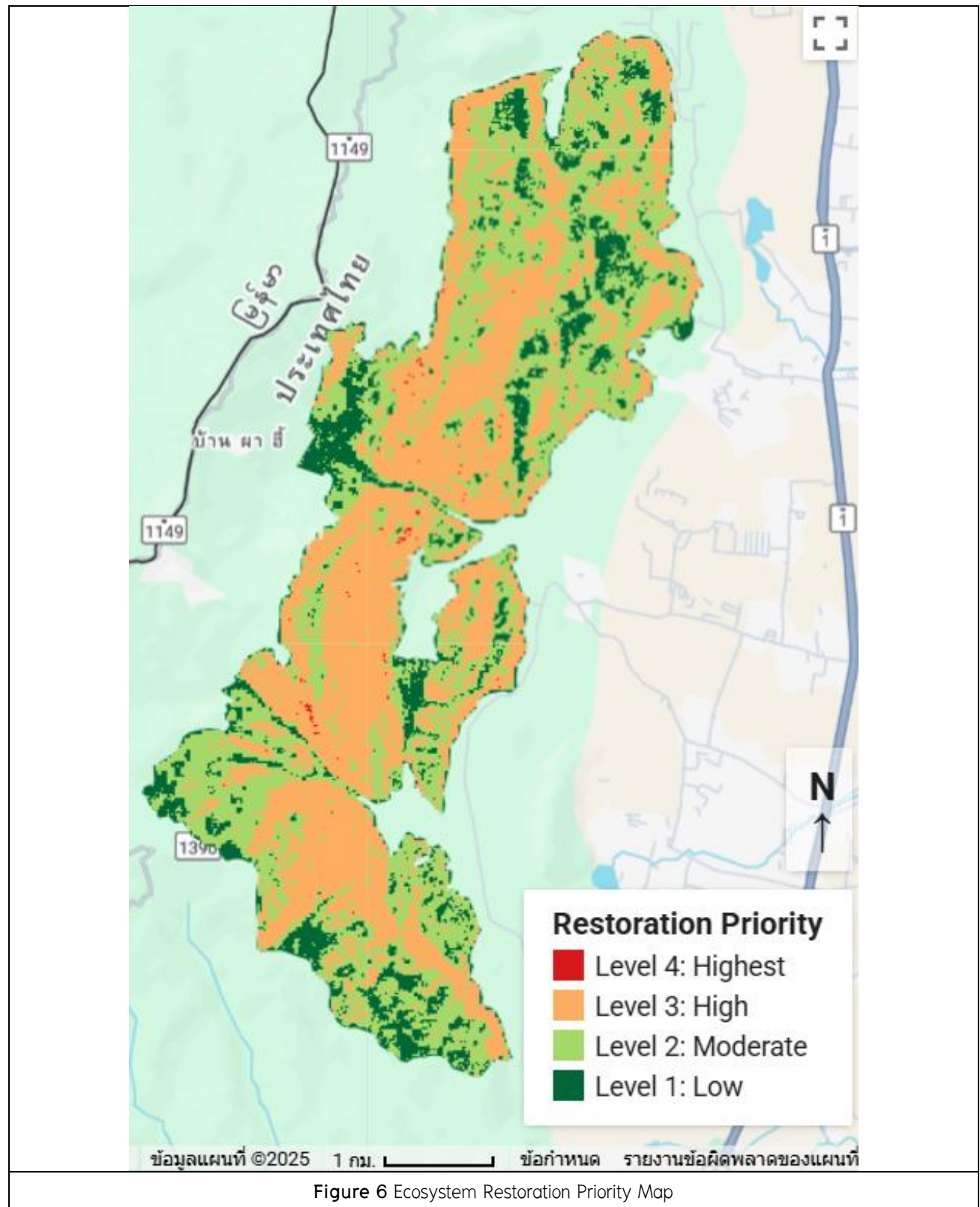


Figure 6 Ecosystem Restoration Priority Map

Discussion and Conclusion

การวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนากรอบการประเมินเชิงพื้นที่ที่มีประสิทธิภาพและรวดเร็ว โดยบูรณาการเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศบนคลาวด์ (GEE) การเรียนรู้ของเครื่อง (ML) และองค์ความรู้จากผู้เชี่ยวชาญ เพื่อจัดลำดับความสำคัญพื้นที่ที่พื้นฟูระบบนิเวศในอุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน (เตรียมการ) ผลการวิเคราะห์ที่ระบุว่าพื้นที่เกือบครึ่งหนึ่งของอุทยานฯ (44.48% หรือ 5,340.94 ไร่) ต้องการการฟื้นฟูในระดับสูงถึงสูงสุด สะท้อนถึงสถานการณ์ความเสื่อมโทรมที่น่ากังวล และตอกย้ำถึงความจำเป็นในการวางแผนจัดการอย่างจริงจังและเป็นระบบ

จุดเด่นของระเบียบวิธีวิจัยนี้คือความรัดกุมของกระบวนการ (Methodological Rigor) ตั้งแต่การกำหนดขนาดกลุ่มตัวอย่าง 360 จุด อ้างอิงตามหลักการทางสถิติ (Cochran, 1977) ไปจนถึงการใช้วิธี Split-validation (70:30) ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ให้ค่าความแม่นยำ (Overall Accuracy) ที่ 88.24% และค่า Kappa Coefficient ที่ 0.82 ทำให้ผลลัพธ์มีความน่าเชื่อถือทางวิชาการและสะท้อนความเป็นจริงมากกว่าการทดสอบแบบดั้งเดิม

ในส่วนของการคัดเลือกปัจจัย แม้ว่าการศึกษาจะจำกัดอยู่ที่ 3 ปัจจัยหลัก แต่การเลือกใช้ Slope, NDVI และ Land Use ถือว่าสอดคล้องกับงานวิจัยจำนวนมากที่ระบุว่าปัจจัยทั้งสามนี้เป็นตัวขับเคลื่อนหลักของกระบวนการเสื่อมโทรมทางกายภาพและชีวภาพ (Vrieling et al., 2011) นอกจากนี้ เกณฑ์การให้คะแนน (Scoring Criteria) ใน Table 3 ยังได้รับการสนับสนุนจากมาตรฐานสากล เช่น เกณฑ์ความลาดชันของ FAO (2006) และหลักการแปลความหมาย NDVI (Rouse et al., 1974) ทำให้การให้คะแนนมีความเป็นวัตถุวิสัย (Objective) มากขึ้น ส่วนการกำหนดค่าน้ำหนัก (Weighting) โดยการเฉลี่ยจากผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน ได้ผลลัพธ์ที่ให้น้ำหนักความสำคัญสูงสุดแก่ปัจจัยความลาดชัน (50.00%) สอดคล้องอย่างยิ่งกับบริบทของพื้นที่อุทยานฯ ที่เป็นภูเขาสูงชันและมีความเสี่ยงต่อการชะล้างพังทลายสูง (Sudana et al., 2020)

นัยเชิงปฏิบัติและข้อเสนอแนะ แผนที่ความเร่งด่วน (Figure 6) ที่ได้จากการวิจัยนี้ ถือเป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ (Strategic Decision-Support Tool) ที่มีประสิทธิภาพ จุดที่น่าสนใจคือ แม้พื้นที่วิกฤตสูงสุด (Level 4) จะมีเพียง 18.30 ไร่ แต่ถือเป็นจุดเปราะบางที่สุดที่ต้องเร่งดำเนินการเชิงรุก (Immediate Action) เพื่อป้องกันภัยพิบัติจากดินถล่ม ในขณะที่ภารกิจหลักของการฟื้นฟูควรโฟกัสไปที่พื้นที่ Level 3 ซึ่งครอบคลุมพื้นที่กว้างขวางกว่า 5,322.64 ไร่ ข้อมูลนี้จะช่วยให้ผู้บริหารอุทยานฯ สามารถจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด (งบประมาณ, กำลังพล) ได้อย่างแม่นยำและทันทั่วถึง นอกจากนี้ ยังควรใช้เทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล เช่น อากาศยานไร้คนขับ (โดรน) ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่เป้าหมายเหล่านี้อย่างต่อเนื่อง

ข้อจำกัดและแนวทางการวิจัยในอนาคต แม้ว่าแบบจำลองจะให้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือ แต่ยังมีข้อจำกัดบางประการที่ควรพิจารณา 1) ความละเอียดของข้อมูล DEM (30 เมตร) อาจไม่สามารถจับรายละเอียดลักษณะภูมิประเทศขนาดเล็ก เช่น ร่องน้ำเล็ก ๆ ในพื้นที่ซับซ้อนได้อย่างครบถ้วน 2) การใช้ค่า NDVI จากช่วงเวลาเดียวอาจได้รับผลกระทบจากความแปรผันตามฤดูกาล (Seasonality) เช่น การผลัดใบในฤดูแล้งอาจทำให้ค่าต่ำกว่าความเป็นจริง ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตจึงควรพิจารณาประยุกต์ใช้ข้อมูลแบบอนุกรมเวลา (Time-series Analysis) เพื่อหาค่าเฉลี่ยรายปี และเพิ่มปัจจัยอื่น ๆ เช่น ความเสี่ยงต่อการเกิดไฟป่า เข้ามาร่วมวิเคราะห์

สรุป การวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการบูรณาการเทคโนโลยี GEE และ ML ร่วมกับคันทามติของผู้เชี่ยวชาญ ในการสร้างแบบจำลองเพื่อจัดลำดับความสำคัญพื้นที่ที่พื้นฟูระบบนิเวศได้อย่างเป็นรูปธรรมและแม่นยำ ผลลัพธ์ที่ได้ไม่เพียงแต่ช่วยให้ผู้บริหารอุทยานแห่งชาติถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน (เตรียมการ) สามารถจำแนกพื้นที่วิกฤตเร่งด่วน (Level 4) เพื่อเข้าดำเนินการป้องกันภัยพิบัติได้ทันทั่วถึง และวางแผนฟื้นฟูพื้นที่เป้าหมายหลัก (Level 3) ได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่านั้น แต่ยังทำ

หน้าที่เป็นต้นแบบ (Prototype) ที่สำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้ในพื้นที่อนุรักษ์อื่นที่มีลักษณะภูมิประเทศซับซ้อน เพื่อยกระดับการบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติด้วยนวัตกรรมภูมิสารสนเทศอย่างยั่งยืนต่อไป

References

- Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24–31. form <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>.
- Chuvieco, E., & Huete, A. (2020). *Fundamentals of satellite remote sensing: An environmental approach* (3rd ed.). CRC Press.
- Cochran, W. G. (1977). *Sampling techniques* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation. (2022). *Management Plan for Tham Luang–Khun Nam Nang Non National Park (under gazetting), 2023–2027*. (in Thai).
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2006). *Guidelines for soil description* (4th ed.). FAO.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. form <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703–726. form <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Special Publication*, 351, 309.
- Sudana, I. W., Danoedoro, P., & Hartono, H. (2020). Soil erosion hazard assessment using GIS and remote sensing in mountain area of Bali, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 478(1), 012028. form <https://doi.org/10.1088/1755-1315/478/1/012028>.
- United Nations. (n.d.). *The UN Decade on Ecosystem Restoration*. Retrieved from <https://www.decadeonrestoration.org/>.
- Vrieling, A., Sterk, G., & de Jong, S. M. (2011). Satellite-based assessment of ecosystem degradation in the Ethiopian Highlands. *Land Degradation & Development*, 22(3), 263–276. form <https://doi.org/10.1002/ldr.1017>.