

異時点間集約を伴う森林資源管理最適化モデルの比較

For. Sci. (2021) DOI:10.1093/forsci/fxab025

吉本 敦 モデリング研究系 教授

集約: 小規模に区分、管理されてきた林分ユニットに対し、隣接する他のユニットとの統合により、規模を拡大した集約ユニットとして区分を形成・管理
異時点間: 時点の異なる期間において、集約ユニットのパターン変化を許容できるように、時間軸を基準としたパターン形成の柔軟化を図る

本研究の目的: 2つの主要な森林管理モデルModel IとModel II(Johnson & Scheurman, For. Sci. 1977)を使用して集約ユニットを形成できるモデル, MF-Model I, MF-Model IIを用いて、異時点間集約に対する比較を行い、モデル間の差異を分析する

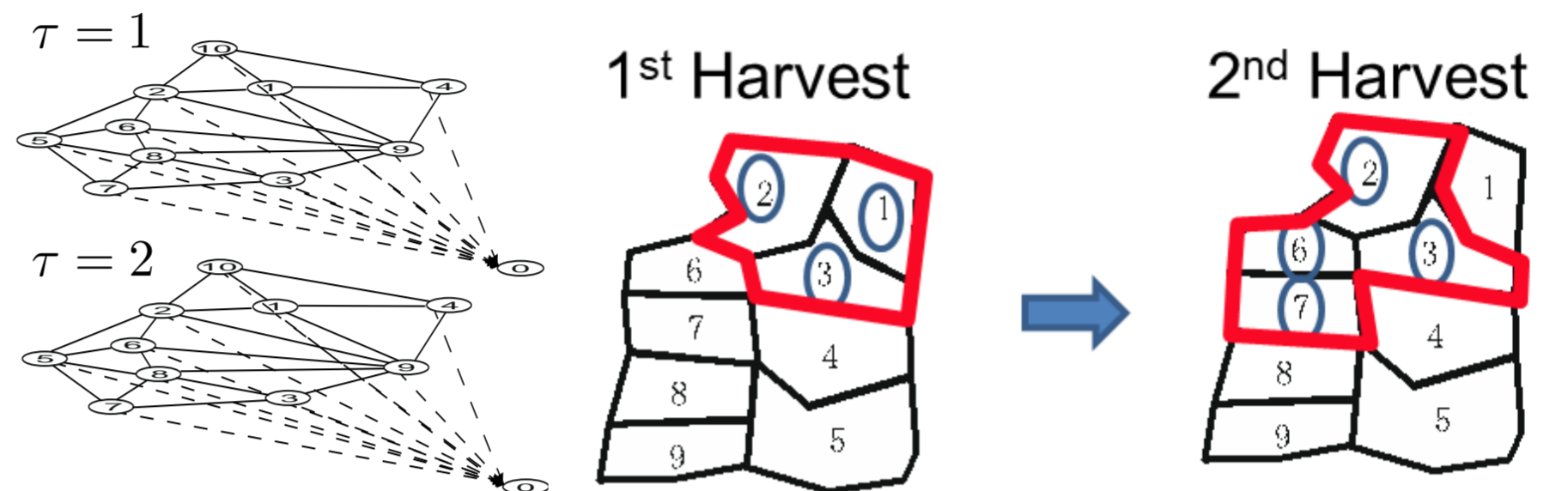
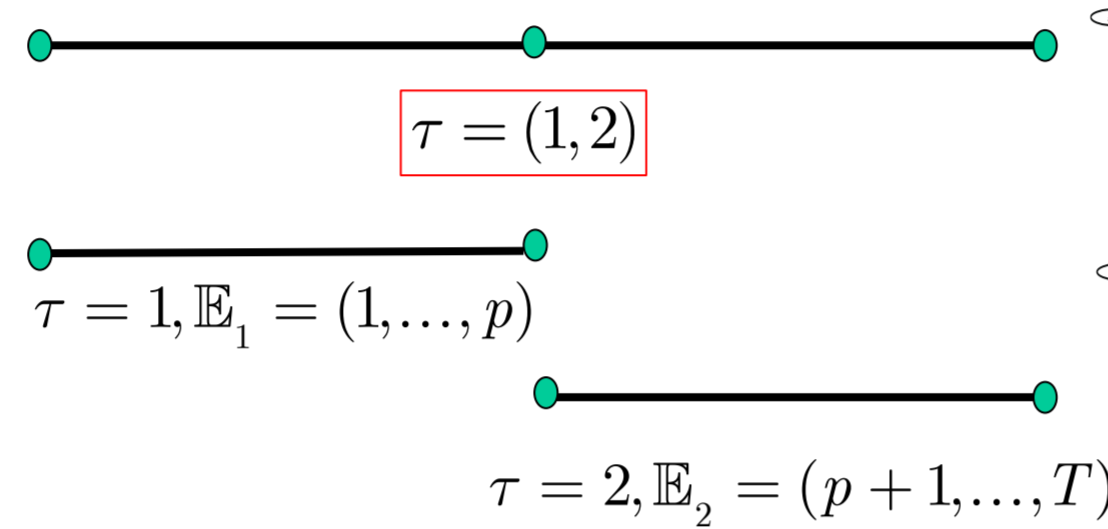
管理目的: 伐採から得られる収益の現在価値最大化

1.時間的制約: 与えられた森林資源において複数回伐採制約および収穫量制約、**2.空間的制約:** 異時点間での最大許容面積内での林分ユニットの集約

異時点間集約

- 複数伐採に有効
- 柔軟な集約グループの形成
- 柔軟な集約サイズの適用

マルチレイヤーによる異時点間集約
異時点間durationを設定



1. Temporal harvest scheduling Module (TM): Johnson & Scheurman (1977) For. Sci.

Model I: 静的施業によるアプローチ

決定変数: 伐採の組合せの利用による施業
施業例 “i林分を1期間目と7期間目に伐採?”

$$x_{ih} = 1 \text{ if the } h\text{-th treatment is implemented for } i\text{-th unit}$$

$$J = \max \sum_{i=1}^m \sum_{h=1}^H c_{ih} \cdot x_{ih}$$

$$\sum_{h=1}^H x_{ih} = 1, \quad \forall i$$

$$(1-\alpha) \cdot v_{it} \leq \sum_{h=1}^H v_{ih}^t \cdot x_{ih} \leq (1+\alpha) \cdot v_{it}, \quad \forall t$$

10期間、最小伐期齢6期での可能な施業

Treatment	No.	Unit	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	x									
1	2	2		x								
1	3	3			x							
1	4	4				x						
1	5	5					x					
1	6	6						x				
1	7	7							x			
1	8	8								x		
1	9	9									x	
1	10	10										x
2	1	1										x
2	2	2										x
2	3	3										x
2	4	4										x
2	5	5										x
2	6	6										x
2	7	7										x
2	8	8										x
2	9	9										x
2	10	10										x

Model II: 動的施業によるアプローチ

決定変数: 各期での伐採
例. “i林分を1期間目に伐採?”

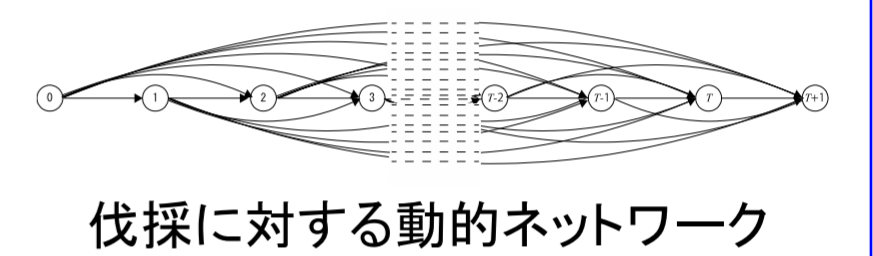
$$x_{st}^i = 1 \text{ stage } s \text{ (} 0 < s+k < t \text{) or from the current stage } 0 \text{ (} s=0 \text{) as the first harvest, given the minimum rotation period or stage by } k$$

$$J = \max \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^T \sum_{s=0}^{\max(0,t-k)} c_{st}^i \cdot x_{st}^i$$

$$\sum_{s=0}^{\max(0,t-k)} x_{st}^i = \sum_{t=\min(i+k, T+1)}^{T+1} x_{st}^i, \quad \forall i, s=1, \dots, T$$

$$\sum_{t=1}^T x_{0t}^i = 1, \quad \forall i$$

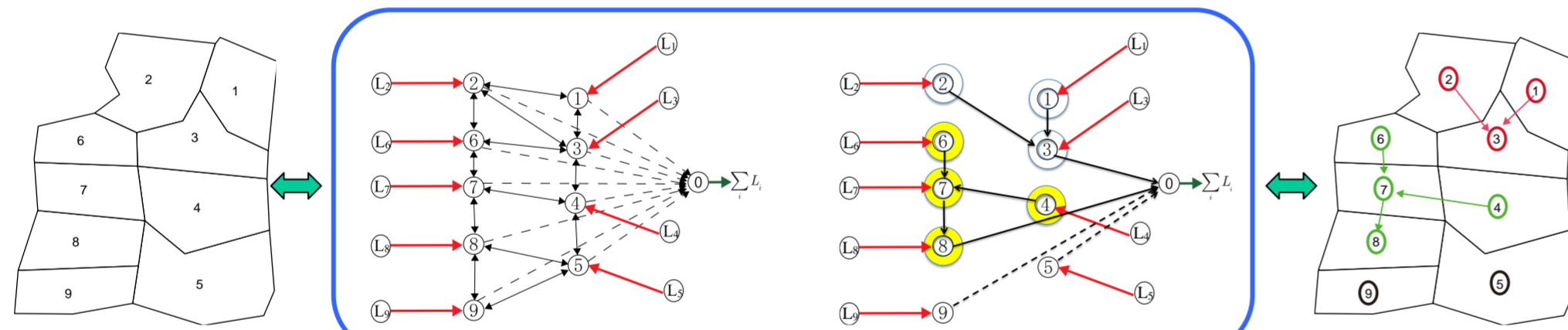
$$y_{ij}^{B(n)} \leq \sum_{k \in (\text{MB}_i \cap \text{MB}_j)} u_{ik}^{(n)}, \quad \forall j \in \text{MB}_i, \forall i, n=1, \dots, N$$



伐採に対する動的ネットワーク

2. Spatial component Module (SM): Yoshimoto & Asante (2018) For. Sci.

Maximum Flow Constraints (MFC)



$y_{ij}^{\tau} = 1$ if an arc is connected between i -th and j -th node during τ duration
 w_{ij}^{τ} : flow from i - to j -th node during τ duration
 L_i : area flow from i -th node
 L_{\max}^{τ} : maximum size for a cluster during τ duration
 NB_i : a set of units adjacent to i -th unit over common boarder
 C^{τ} : a set of units with $L_i \leq L_{\max}^{\tau}$

$$y_{ij}^{\tau} + y_{ji}^{\tau} \leq 1, \forall j \in \text{NB}_i, \forall i \in \text{C}^{\tau}, \forall \tau$$

$$y_{ij}^{\tau} + \sum_{j \in \text{NB}_i} y_{ij}^{\tau} = 1, \forall i \in \text{C}^{\tau}, \forall \tau$$

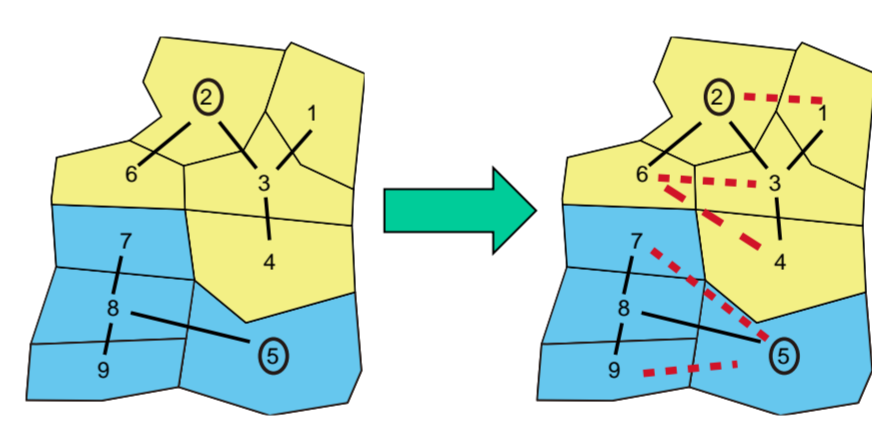
$$w_{ij}^{\tau} \leq L_{\max}^{\tau} \cdot y_{ij}^{\tau}, \forall j \in \text{NB}_i, \forall i \in \text{C}^{\tau}, \forall \tau$$

$$w_{ij}^{\tau} + \sum_{j \in \text{NB}_i} w_{ij}^{\tau} = \sum_{j \in \text{NB}_i} w_{ji}^{\tau} + L_i, \forall i \in \text{C}^{\tau}, \forall \tau$$

$$\sum_{i=1}^m w_{i0}^{\tau} = \bar{L}, \forall \tau$$

$$w_{i0}^{\tau} \leq L_{\max}^{\tau} \cdot y_{i0}^{\tau}, \forall i \in \text{C}^{\tau}, \forall \tau$$

Sequential Triangle Connection (STC)



$y_{ij}^{B(n)} = 1$ if connecting arc from i -th to j -th units adjacent over common boarder and edge at n -th ordered process for τ duration
 $u_{ijk}^{(n)} = 1$ if forming a triangle among i -, j - and k -th units adjacent over common boarder and edge at n -th ordered process for τ duration
 MB_i : a set of units adjacent to i -th unit over common boundary and edge
 N : the maximum number of STC processes

$$y_{ij}^{B(n)} = y_{ij}^{\tau} + y_{ji}^{\tau}, \forall j \in \text{NB}_i, \forall i \in \text{C}^{\tau}$$

$$2 \cdot u_{ijk}^{(n)} + 3 \cdot \sum_{l=1}^{n-1} u_{ijk}^{(l)} \leq \sum_{l=1}^n \{y_{ij}^{B(l)} + y_{jk}^{B(l)} + y_{ki}^{B(l)}\} \leq 2 \cdot u_{ijk}^{(n)} + 3 \cdot \sum_{l=1}^{n-1} u_{ijk}^{(l)} + 1, \forall k \in (\text{MB}_i \cap \text{MB}_j), \forall j \in \text{MB}_i, \forall i \in \text{C}^{\tau}, n=1, \dots, N-1, \forall \tau$$

$$3 \cdot u_{ijk}^{(n)} \leq \sum_{l=1}^{n-1} \{y_{ij}^{B(l)} + y_{jk}^{B(l)} + y_{ki}^{B(l)}\}, \forall k \in (\text{MB}_i \cap \text{MB}_j), \forall j \in \text{MB}_i, \forall i \in \text{C}^{\tau}, n=1, \dots, N-1, \forall \tau$$

$$y_{ij}^{B(n+1)} \leq \sum_{k \in (\text{MB}_i \cap \text{MB}_j)} u_{ijk}^{(n)}, \forall j \in \text{MB}_i, \forall i \in \text{C}^{\tau}, n=1, \dots, N-1, \forall \tau$$

$$\sum_{n=1}^N y_{ij}^{B(n)} \leq 1, \forall j \in \text{MB}_i, \forall i \in \text{C}^{\tau}$$

3. Linkage Module (LM) MF-Model I

Concurrent harvest by static treatment

$$z_{ij}^t = \left(\sum_{k \in \text{MB}_i} x_{ik} \right) \cdot \left(\sum_{k \in \text{MB}_j} x_{jk} \right)$$

$$2 \cdot z_{ij}^t \leq \sum_{k \in \text{MB}_i} x_{ik} + \sum_{k \in \text{MB}_j} x_{jk} \leq 2 \cdot z_{ij}^t + 1, \forall j \in \text{NB}_i, \forall i, \forall t$$

$$\sum_{n=1}^N y_{ij}^{B(n)} = \sum_{t \in \text{EB}_i} z_{ij}^t, \forall \tau$$

$$\sum_{k \in \text{MB}_i} x_{ik} + \sum_{p=t+1}^{t+g} \sum_{k \in \text{MB}_j} x_{jk} \leq 1, \forall j \in \text{NB}_i, \forall i, t=1, \dots, T-g+1$$

MF-Model II

Concurrent harvest by dynamic treatment

$$z_{ij}^t = \left(\sum_{s=0}^{\max(0,t-k)} x_{is} \right) \cdot \left(\sum_{s=0}^{\max(0,t-k)} x_{js} \right)$$

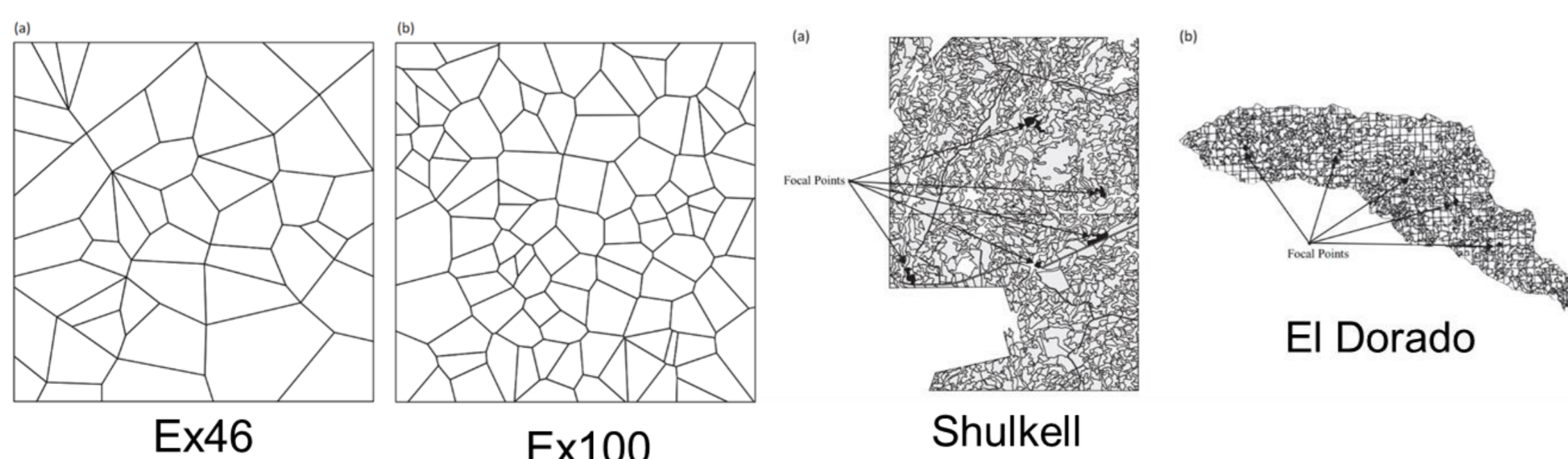
$$2 \cdot z_{ij}^t \leq \sum_{s=0}^{\max(0,t-k)} (x_{is} + x_{js}) \leq 2 \cdot z_{ij}^t + 1, \forall j \in \text{NB}_i, \forall i, \forall t$$

$$\sum_{n=1}^N y_{ij}^{B(n)} = \sum_{t \in \text{EB}_i} z_{ij}^t, \forall \tau$$

$$\sum_{s=0}^{\max(0,t-k)} x_{is} + \sum_{p=t+1}^{t+g} \sum_{s=0}^{\max(0,t-k)} x_{js} \leq 1, \forall j \in \text{NB}_i, \forall i, t=1, \dots, T-g+1$$

結果: 計画期間: 10, 15, 20期

最大許容伐採面積: 第一期間20ha、第二期間30ha、第三期間40ha、第四期間50ha



Forest	Model	T	Max	Binary	Const	Obj	CPU	Gap	Cluster
Ex46 46units	I-D	10	(20,30)	5282	8763	*62282.5	5000.01	0.32	(8,8)
		15	(20,30,40)	9740	12985	*61899.5	5000.02	0.59	(3,3,8)
		20	(20,30,40,50)	20178	17298	*60315.5	5000.04	1.65	(4,1,3,7)
	II	10	(20,30)	5742	9132	*62267.0	5000.02	0.34	(3,10)
		15	(20,30,40)	9970	13675	*61716.9	5000.02	0.90	(2,1,8)
		20	(20,30,40,50)	15348	18218	*59831.0	5000.03	2.48	(6,4,4,7)
Ex100 100units	I-D	10	(20,30)	10886	16918	*261437.0	5000.02	0.13	(11,23)
		15	(20,30,40)	20279	25325	*259642.4	5000.04	0.34	(5,11,21)
		20	(20,30,40,50)	42672	33732	*254726.0	5000.23	0.75	(5,12,13,19)
	II	10	(20,30)	11886	17918	*261436.7	5000.03	0.13	(11,22)
		15	(20,30,40)	20779	26825	*259787.9	5000.04	0.29	(6,12,21)
		20	(20,30,40,50)	32172	35732	*254732.8	5000.10	0.74	(5,9,11,20)
Shulkell 1039units	I-D	10	(20,30)	91359	134616	*613686.2	5000.14	0.08	(106,191)
		15	(20,30,40)	178079	198285	*603095.2	5000.40	0.04	(86,57,181)
		20	(20,30,40,50)	398969	264028	*587316.8	5001.21	0.12	(66,67,76,160)
	II	10	(20,30)	101749	142932	*613464.3	5000.24	0.11	(97,173)
		15	(20,30,40)	183274	213870	*602938.5	5000.47	0.07	(85,61,182)
		20	(20,30,40,50)	290774	284808	*587549.6	5002.47	0.07	(77,74,83,158)
El Dorado 1363units	I-D	10	(50,60)	161701	263694	*5493505.0	5000.49	0.24	(180,306)
		15	(50,60,70)	296390	389434	*5482889.0	5004.06	0.17	(141,154,275)
		20	(50,60,70,80)	608269	518791	*5402137.5	5000.35	0.32	(122,125,167,265)
	II	10	(50,60)	175331	273707	*5494991.0	5000.24	0.21	(182,275)
		15	(50,60,70)	303205	409879	*5481753.5	5000.18	0.19	(143,151,272)
		20	(50,60,70,80)	465154	546051	*5396184.5	5000.35	0.43	(129,128,163,271)